

RESEARCH

Michael Schluse

Experimentierbare Digitale Zwillinge

Konvergenz von Simulation und
Realität

MOREMEDIA



Springer Vieweg


Experimentierbare Digitale Zwillinge

Michael Schluse

Experimentierbare Digitale Zwillinge

Konvergenz von Simulation und
Realität

 Springer Vieweg

Michael Schluse 
Institut für
Mensch-Maschine-Interaktion
RWTH Aachen University
Aachen, Deutschland

ISBN 978-3-658-44444-0 ISBN 978-3-658-44445-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-44445-7>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Carina Reibold
Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recycelbar.

Danksagung

Dieses Buch entstand im Kontext meiner Tätigkeit am Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen. Mein besonderer Dank gilt dem Institutsleiter, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Thematik unter besten Rahmenbedingungen mit den notwendigen Freiheiten zu bearbeiten. Ein besonderer Dank gilt ebenfalls meinen Kolleginnen und Kollegen am MMI, die mich in vielen Diskussionen und mit ihren Anwendungen unterstützt haben. Gleiches gilt für Forschungs- und Industriepartner und hier insbesondere für die Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Robotertechnik am RIF Institut für Forschung und Transfer e.V., mit denen ich viele der Arbeiten durchführen durfte.

Ich möchte mich ebenfalls dafür bedanken, dass ich die entwickelten Methoden im Rahmen diverser Forschungsvorhaben anwenden konnte. Beispiele hierfür sind Vorhaben zur Weltraumrobotik¹ (z. B. FastMap, Invirtes, iBOSS, ViTOS

¹ Diese wurden gefördert vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

und KImaDiZ), zur Unterstützung von Auszubildenden und Arbeitern² (FeDiNAR, T-EXDIZ), in der Forstwirtschaft³ (z. B. Virtueller Wald und KWH4.0), zur Waldbesitzerunterstützung⁴ (iWald), zur Robotik⁵ (z. B. ReconCell, IntellAct, Centauro) und zum Virtual Robotics Lab.

² Diese wurden gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Fachprogramms „Digitale Medien in der beruflichen Bildung“ und über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), jeweils aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

³ Diese wurden gefördert durch das Land Nordrhein-Westfalen unter Einsatz von Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).

⁴ Diese wurden gefördert vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

⁵ Diese wurden im Rahmen von Horizon 2020 von der Europäischen Union gefördert.

Kurzfassung

Im Kontext der Digitalisierung von Ökosystemen wird der Digitale Zwilling als einer der maßgeblichen technologischen Trends des Jahrzehnts gesehen. Simulationstechnik erweckt Digitale Zwillinge zum Leben, macht sie und ihr Verhalten erfahrbar und analysierbar. Aus Digitalen Zwillingen werden Experimentierbare Digitale Zwillinge (EDZ), Digitale Zwillinge zusammen mit aktueller Simulationstechnik bzw. Digitale Zwillinge betrachtet aus der Perspektive der Simulationstechnik. Ein Experimentierbarer Digitaler Zwilling beschreibt Semantik, Struktur, Verhalten und Interaktion seines Realen Zwillings. Seine Interaktion mit weiteren Experimentierbaren Digitalen Zwillingen in unterschiedlichen Domänen ermöglicht die umfassende Abbildung und eingehende Analyse von Systemen von Mechatronischen/Cyber-Physischen Systemen in unterschiedlichen Einsatzumgebungen und -situationen; die Vernetzung von Experimentierbaren Digitalen Zwillingen mit Realen Zwillingen führt Simulation und Realität symbiotisch zusammen. Diese Konvergenz von Simulation und Realität ist die Grundlage für eine große Bandbreite an EDZ-Methoden zum Einsatz in Entwicklung und Betrieb. Als strukturbildendes Element der EDZ-Methodik schließt der Experimentierbare Digitale Zwilling die Lücke zwischen Model-based Systems Engineering und Simulation und hebt das Potenzial moderner Modellierungs-, Simulations- und Co-Simulationsansätze über den gesamten Lebenszyklus (nicht nur) technischer Systeme. Dies führt zu einem interdisziplinären, domänen-, system-, prozess-, anwendungs- und lebenszyklusübergreifenden Einsatz von Digitalen Zwillingen.

Nomenklatur

Die verwendete Notation mathematischer Symbole und die verwendeten Formelzeichen sind im Folgenden zusammengefasst. Auf der rechten Seite ist zudem das Kapitel angegeben, in dem das entsprechende Symbol eingeführt wird.

Symbol	Bezeichnung	Kap.
$c \in \mathbb{R}$	Skalar, z. B. aus der Menge \mathbb{R}	
$\underline{c} \in \mathbb{R}^n$	Vektor der Dimension $n \in \mathbb{N}$	
$c_i \in \mathbb{R}$	i -te Komponente des Vektors $\underline{c} \in \mathbb{R}^n$ mit $1 \leq i \leq n, i \in \mathbb{N}$	
$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n$	Vektor mit den Elementen c_i in Elementschreibweise	
$f : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{Z}$	Definition einer Funktion mit Definitions- und Zielmenge	
\mathbb{T}	Menge der (Simulations-) Zeitpunkte, z. B. $\mathbb{T} = \mathbb{R}$	3.1.1
$t \in \mathbb{T}$	(Simulations-) Zeit	3.1.1
$f : \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{Z}$	Definition einer ausschließlich von der Zeit t als Parameter abhängigen Funktion	
$\mathbb{Z}^{\mathbb{T}}$	Menge aller Funktionen von \mathbb{T} nach \mathbb{Z}	

(Fortsetzung)

(Fortsetzung)

Symbol	Bezeichnung	Kap.
$\mathbb{T}' := \langle t_1, t_2 \rangle := \{t \in \mathbb{T} \mid t_1 \leq t \leq t_2\}$	Zeitintervall $\langle t_1, t_2 \rangle$ zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 mit $t_1 \leq t_2 \in \mathbb{T}$ (ein Zeitintervall ist eine Menge von Zeitpunkten)	3.1.3
$f _{\mathbb{T}'} : \mathbb{T}' \rightarrow \mathbb{Z}$	Funktionssegment $f _{\mathbb{T}'}$ mit $f _{\mathbb{T}'}(t) := \{f(t) \in \mathbb{Z} \mid t \in \mathbb{T}'\}$ (ein Funktionssegment ist eine Menge von Funktionswerten)	3.1.3
(\mathbb{Z}, \mathbb{T})	Menge aller Funktionssegmente von \mathbb{T} nach \mathbb{Z}	3.1.3
$\underline{c}(t) \in \mathbb{R}^n$	Vektor mit Elementen z. B. aus \mathbb{R} als Funktion der Zeit $t \in \mathbb{T}$	
$\dot{\underline{c}}(t) = \frac{d}{dt} \underline{c}(t) \in \mathbb{R}^n$	1. Ableitung dieses Vektors nach der Zeit	
$\ddot{\underline{c}}(t) = \frac{d^2}{dt^2} \underline{c}(t) \in \mathbb{R}^n$	2. Ableitung dieses Vektors nach der Zeit	
$\underline{C} \in \mathbb{R}^{n \times m}$	Allgemeine Matrix mit $n \in \mathbb{N}$ Zeilen und $m \in \mathbb{N}$ Spalten	
$\underline{C}^T \in \mathbb{R}^{m \times n}$	Transponierte einer Matrix $\underline{C} \in \mathbb{R}^{n \times m}$	
$\underline{C}^{-1} \in \mathbb{R}^{m \times m}$	Inverse einer quadratischen Matrix $\underline{C} \in \mathbb{R}^{m \times m}$	
$(a, b, c) \in \mathbb{G}$	Geordnetes Tupel aus der Menge $\mathbb{G} = \mathbb{A} \times \mathbb{B} \times \mathbb{C}$	
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen	
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen	
\mathbb{W}_a	Menge konkreter Werte (natürliche Zahl, reelle Zahl, boolescher Wert, Zeichenkette, ...) aller Datentypen	3.1.1
\mathbb{D}_a	Menge der Datentypen dieser Werte (natürliche Zahl, reelle Zahl, boolescher Wert, Zeichenkette, ...)	3.1.1
\mathbb{L}_a	Menge der Einheiten dieser Werte (s, m, g, ...)	3.1.1
$\mathbb{V}_a := \mathbb{W}_a \times \mathbb{D}_a \times \mathbb{L}_a$	Menge konkreter typisierter und mit Einheiten versehener Werte	3.1.1
$a_i = (w_{a,i}, d_{a,i}, l_{a,i}) \in \mathbb{V}_a$	Wert $w_{a,i} \in \mathbb{W}_a$ mit Datentyp $d_{a,i} \in \mathbb{D}_a$ und ggfls. Einheit $l_{a,i} \in \mathbb{L}_a$	3.1.1

(Fortsetzung)

(Fortsetzung)

Symbol	Bezeichnung	Kap.
$\underline{x} \in \mathbb{V}_a^{n_x}$	Zustandsvektor des zu Grunde liegenden bzw. simulierten Systems	3.1.1
$\underline{a} \in \mathbb{V}_a^{n_a}$	Parametervektor des Modells M mit Elementen unterschiedlichen Typs	3.1.2
\mathbb{W}_A	Menge der Algorithmen (MATLAB-Quellcode, SIMULINK-Blockschaltbild, ...)	3.1.2
\mathbb{D}_A	Menge der Algorithmen-Beschreibungsformen (MATLAB-Quellcode, SIMULINK-Blockschaltbild, ...)	3.1.2
$\mathbb{V}_A := \mathbb{W}_A \times \mathbb{D}_A$	Menge konkreter typisierter Algorithmen	3.1.2
$A_i = (w_{A,i}, d_{A,i}) \in \mathbb{V}_A$	Konkreter Algorithmus $w_{A,i} \in \mathbb{W}_A$ mit Beschreibungsform $d_{A,i} \in \mathbb{D}_A$	3.1.2
$\underline{A} \in \mathbb{V}_A^{n_A}$	Vektor der Algorithmen des Modells M mit Algorithmen in unterschiedlichen Beschreibungsformen	3.1.2
$\mathbb{W} := \mathbb{W}_a \cup \mathbb{W}_A$	Menge aller Parameter und Algorithmen (Variante 1)	3.1.2
$\mathbb{D} := \mathbb{D}_a \cup \mathbb{D}_A$	Menge aller Parametertypen und Algorithmen-Beschreibungsformen (Variante 1)	3.1.2
$\mathbb{V} := \mathbb{W} \times \mathbb{D} \times \mathbb{L}_a$	Menge aller typisierten Parameter und Algorithmen (Variante 1)	3.1.2
$(w_i, d_i, l_i) \in \mathbb{V}$	Konkreter Parameter oder Algorithmus $w_i \in \mathbb{W}$ mit Typ $d_i \in \mathbb{D}$ und ggfls. Einheit $l_i \in \mathbb{L}_a$	3.1.2
\mathbb{B}	Menge aller Portbezeichner	3.1.2
$U_i = (b_i, d_i, l_i)$	Definition eines Eingangs mit Portbezeichner $b_i \in \mathbb{B}$, Datentyp $d_i \in \mathbb{D}$ und Einheit $l_i \in \mathbb{L}_a$	3.1.2
$Y_i = (b_i, d_i, l_i)$	Definition eines Ausgangs mit Portbezeichner $b_i \in \mathbb{B}$, Datentyp $d_i \in \mathbb{D}$ und Einheit $l_i \in \mathbb{L}_a$	3.1.2
$\mathbb{P} := \mathbb{B} \times \mathbb{D} \times \mathbb{L}_a$	Menge der Ports	3.1.2
$\mathbb{M}_S := \mathbb{V}_a^{n_a} \times \mathbb{V}_A^{n_A} \times \mathbb{P}^{n_u} \times \mathbb{P}^{n_y}$	Menge aller Simulationsmodelle (Variante 1)	3.1.2

(Fortsetzung)

(Fortsetzung)

Symbol	Bezeichnung	Kap.
$M_S \in \mathbb{M}_S$	Konkretes Simulationsmodell	3.1.2
$\underline{s} \in \mathbb{V}^{n_s}$	Simulationszustandsvektor	3.1.3
$\underline{u} \in \mathbb{V}^{n_u}$	Vektor der Eingangsgrößen	3.1.3
$\underline{y} \in \mathbb{V}^{n_y}$	Vektor der Ausgangsgrößen	3.1.3
$\Gamma : \mathbb{V}^{n_s} \times (\mathbb{V}^{n_u}, \mathbb{T}) \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_s}$	Simulationsübergangsfunktion für ein System	3.1.3
$\Phi : \mathbb{V}^{n_s} \times \mathbb{V}^{n_u} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_y}$	Simulationsausgangsfunktion für ein System	3.1.3
$M_E \in \mathbb{M}_E$	Konkretes Experimentierbares Modell	3.1.3
$\underline{u}_{edz} \in \mathbb{V}^{n_{u_{edz}}}$	Eingangsvektor eines EDZ	3.2.1
$\underline{u}_{sivs}^{strg} \in \mathbb{V}^{n_{u_{sivs, strg}}}$	Ext. Steuerungsanweisungen der IVS-Komponente	3.2.1
$\underline{u}_{sivs}^{sen} \in \mathbb{V}^{n_{u_{sivs, sen}}}$	Sensoreingänge der IVS-Komponente	3.2.1
$\underline{y}_{sivs}^{akt} \in \mathbb{V}^{n_{y_{sivs, akt}}}$	Steuerungsausgänge der IVS-Komponente	3.2.1
$\underline{u}_{smms}^{sen} \in \mathbb{V}^{n_{u_{smms, sen}}}$	Sensoreingänge der MMS-Komponente	3.2.1
$\underline{y}_{edz} \in \mathbb{V}^{n_{y_{edz}}}$	Ausgangsvektor eines EDZ	3.2.1
$\underline{s}_{spsys}^{akt} \in \mathbb{V}^{n_{s_{spsys}}}$	Simulationszustand der Aktorkomponente	3.2.1
$\underline{s}_{spsys}^{sys} \in \mathbb{V}^{n_{s_{spsys}}}$	Simulationszustand der Systemkomponente	3.2.1
$\underline{s}_{spsys}^{sen} \in \mathbb{V}^{n_{s_{spsys}}}$	Simulationszustand der Sensorkomponente	3.2.1
$\underline{s}_{sivs} \in \mathbb{V}^{n_{s_{sivs}}}$	Simulationszustand der IVS-Komponente	3.2.1
$\underline{s}_{smms} \in \mathbb{V}^{n_{s_{smms}}}$	Simulationszustand der MMS-Komponente	3.2.1
$M_{S, komp} \in \mathbb{M}_{S, komp}$	Modell einer EDZ-Komponente	3.2.1
$\hat{i}_f : \mathbb{V}^{n_y} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_u}$	Interaktionsform	3.2.1
\mathbb{W}_I	Menge der Interaktionsformen (als MATLAB-Quellcode, SIMULINK-Blockschaltbild, ...)	3.2.1
\mathbb{D}_I	Menge der Beschreibungsformen der Interaktionsformen (MATLAB-Quellcode, SIMULINK-Blockschaltbild, ...)	3.2.1

(Fortsetzung)

(Fortsetzung)

Symbol	Bezeichnung	Kap.
$\mathbb{V}_I = \mathbb{W}_I \times \mathbb{D}_I$	Menge konkreter typisierter Interaktionsformen	3.2.1
$I_i = (w_{I,i}, d_{I,i}) \in \mathbb{V}_I$	Konkrete Interaktionsform $w_{I,i} \in \mathbb{W}_I$ mit Beschreibungsform $d_{I,i} \in \mathbb{D}_I$	3.2.1
$\underline{I} \in \mathbb{V}_I^n$	Vektor der Interaktionsformen des Modells M_S	3.2.1
$\mathbb{W} := \mathbb{W}_a \cup \mathbb{W}_A \cup \mathbb{W}_I$	Menge aller Parameter, Algorithmen und Interaktionsformen (Variante 2)	3.2.1
$\mathbb{D} := \mathbb{D}_a \cup \mathbb{D}_A \cup \mathbb{D}_I$	Menge aller Parametertypen und Algorithmen-/ Interaktions-Beschreibungsformen (Variante 2)	3.2.1
$\mathbb{V} := \mathbb{W} \times \mathbb{D} \times \mathbb{L}_a$	Menge aller Parameter, Algorithmen und Interaktionsformen (Variante 2)	3.2.1
$\xi_{a \rightarrow b, a}^i : \mathbb{V}^{n_{\text{ykomp}, a}} \rightarrow \mathbb{V}^{n_{\text{yverb}, i}}$	Selektion der von EDZ-Komponente a zur Komponente b zu übertragenden Ausgangsgrößen	3.2.1
$\xi_{a \rightarrow b, b}^i : \mathbb{V}^{n_{\text{yverb}, i}} \rightarrow \mathbb{V}^{n_{\text{ukomp}, b}}$	Zuweisung der von EDZ-Komponente a zur Komponente b zu übertragenden Ausgangsgrößen zu den jeweiligen Eingangsgrößen	3.2.1
$\hat{i}_{f, a \rightarrow b}^i : \mathbb{V}^{n_{\text{ykomp}, a}} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_{\text{ukomp}, b}}$	Übertragung der Ausgänge von EDZ-Komponente a in die Eingänge von EDZ-Komponente b	3.2.1
$\hat{i}_{f, b} : \mathbb{V}^{n_{\text{yedz}}} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_{\text{ukomp}, b}}$	Übertragung der Ausgänge aller EDZ-Komponenten in die jeweils verbundenen Eingänge von EDZ-Komponente b	3.2.1
$\hat{i}_{f, \text{edz}} : \mathbb{V}^{n_{\text{yedz}}} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_{\text{uedz}}}$	Übertragung der Ausgänge aller EDZ-Komponenten in die jeweils verbundenen Eingänge	3.2.1
$\mathbb{V}_v := \mathbb{B} \times \mathbb{B}$	Menge konkreter Verbindungen	3.2.1
$v_i = (b_{i,1}, b_{i,2}) \in \mathbb{V}_v$	Konkrete Verbindung zwischen den durch $b_{i,1}$ und $b_{i,2}$ referenzierten Ports	3.2.1
$\mathbb{M}_{S, \text{komp}} = \mathbb{V}_a^{n_a} \times \mathbb{V}_A^{n_A} \times \mathbb{P}^{n_u} \times \mathbb{P}^{n_y} \times \mathbb{V}_v^{n_v} \times \mathbb{V}_I^{n_I} \times \mathbb{M}_{S, \text{unterkomp}}^{n_{\text{unterkomp}}}$	Menge aller Modelle von EDZ-Komponenten	3.2.3

(Fortsetzung)

(Fortsetzung)

Symbol	Bezeichnung	Kap.
$M_{S,\text{komp}} \in \mathbb{M}_{S,\text{komp}}$	Konkretes Modell einer EDZ-Komponente	3.2.3
$M_{S,\text{edz}} \in \mathbb{M}_{S,\text{komp}}$	Konkretes Modell eines EDZ	3.2.3
$\underline{a}_{\text{komp}} \in \mathbb{V}_a^{n_a}$	Parametervektor einer EDZ-Komponente	3.2.3
$\underline{A}_{\text{komp}} \in \mathbb{V}_A^{n_A}$	Vektor der Algorithmen einer EDZ-Komponente	3.2.3
$\underline{U}_{\text{komp}} \in \mathbb{P}^{n_u}$	Vektor der Eingangsdefinitionen einer EDZ-Komponente	3.2.3
$\underline{Y}_{\text{komp}} \in \mathbb{P}^{n_y}$	Vektor der Ausgangsdefinitionen einer EDZ-Komponente	3.2.3
$\underline{v}_{\text{komp}} \in \mathbb{V}_v^{n_v}$	Vektor der Verbindungen innerhalb einer EDZ-Komponente	3.2.3
$\underline{I}_{\text{komp}} \in \mathbb{V}_I^{n_I}$	Vektor der Interaktionsformen einer EDZ-Komponente	3.2.3
$\underline{M}_{S,\text{unterkomp}} \in \mathbb{M}_{S,\text{unterkomp}}^{n_{\text{komp}}}$	Vektor der Unterkomponenten einer EDZ-Komponente	3.2.3
$m \in \mathbb{V}^n$	Reglerausgangsgröße	3.3
$y \in \mathbb{V}^n$	Stellgröße	3.3
$x \in \mathbb{V}^n$	Regelgröße	3.3
$s \in \mathbb{V}^n$	Messsignal	3.3
$r \in \mathbb{V}^n$	Rückführgröße	3.3
$c \in \mathbb{V}^n$	Zielgröße	3.3
$w \in \mathbb{V}^n$	Führungsgröße	3.3
$e \in \mathbb{V}^n$	Regeldifferenz	3.3
$z \in \mathbb{V}^n$	Störgröße	3.3
$\underline{u}_{\text{real}} \in \mathbb{V}^{n_{\text{real}}}$	Eingangsvektor eines realen Physischen Systems	3.4.4
$\underline{y}_{\text{real}} \in \mathbb{V}^{n_{\text{real}}}$	Ausgangsvektor eines realen Physischen Systems	3.4.4
$\underline{s}_{\text{vtb}}, \underline{s}_{\text{szenario}} \in \mathbb{V}^{n_{\text{szenario}}}$	Zustandsvektor eines VTB bzw. eines Szenarios	3.6.1
$\underline{s}_{\text{edz}} \in \mathbb{V}^{n_{\text{edz}}}$	Zustandsvektor eines EDZ	3.6.1
$\Gamma : \mathbb{V}^{n_{\text{szenario}}} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_{\text{szenario}}}$	Simulationsfunktion für ein Szenario	3.6.1
$\mathbb{T} = \mathbb{R} \times \mathbb{N}$	Menge der „super-dense time“	3.6.2

(Fortsetzung)

(Fortsetzung)

Symbol	Bezeichnung	Kap.
$t = (t_R, t_I)$	Simulationszeitpunkt entsprechend der „super-dense time“	3.6.2
$t^\bullet \in \mathbb{T}$	Nächster Simulationszeitpunkt in „super-dense time“	3.6.2
$\mathbb{V}_k \subset \mathbb{V}_a$	Kontinuierlicher Systemzustand	3.6.2
$\underline{s}_k \in \mathbb{V}_k^{n_{sk}}$	Vektor kontinuierlicher Systemzustände	3.6.2
$\underline{s}_d \in \mathbb{V}_a^{n_{sd}}$	Vektor diskreter Systemzustände	3.6.2
$f_k : \mathbb{V}_k^{n_{sk}} \times \mathbb{V}^{n_u} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{V}_k^{n_{sk}}$	Übergangsfunktion eines zeitkontinuierlichen Systems mit n_{sk} kontinuierlichen Zustands- und n_u Eingangsgrößen	3.6.2
$f_d : \mathbb{V}^{n_{sd}} \times \mathbb{V}^{n_u} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_{sd}}$	Übergangsfunktion eines ereignisdiskreten Systems mit n_{sd} diskreten Zustands- und n_u Eingangsgrößen	3.6.2
$h_k : \mathbb{V}_k^{n_{sk}} \times \mathbb{V}_k^{n_{sk}} \times \mathbb{V}^{n_u} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$	Nebenbedingungen eines zeitkontinuierlichen Systems mit n_{sk} kontinuierlichen Zustands- und n_u Eingangsgrößen	3.6.2
$h_d : \mathbb{V}^{n_{sd}} \times \mathbb{V}^{n_u} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{R}$	Nebenbedingungen eines ereignisdiskreten Systems mit n_{sd} kontinuierlichen Zustands- und n_u Eingangsgrößen	3.6.2
$g : \mathbb{V}^{n_s} \times \mathbb{V}^{n_u} \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{V}^{n_y}$	Ausgangsfunktion des zeitkontinuierlichen oder ereignisdiskreten Modellteils mit n_s Zustands-, n_u Eingangs- und n_y Ausgangsgrößen	3.6.2
$T : \mathbb{V}^{n_s} \times \mathbb{V}^{n_u} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$	Zeitpunkt des nächsten Ereignisses	3.6.2
$e \in \mathbb{E}$	Entscheidung	3.7.2
$o \in \mathbb{O}$	Ergebnis	3.7.2
$\zeta : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{O}$	Abbildung einer Entscheidung auf ein Ergebnis	3.7.2
$N_O : \mathbb{O} \rightarrow \mathbb{R}$	Bewertung des Nutzens eines Ergebnisses	3.7.2
$N_E : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{R}$	Bewertung des Nutzens einer Entscheidung	3.7.2

(Fortsetzung)

(Fortsetzung)

Symbol	Bezeichnung	Kap.
${}^K \underline{p} \in \mathbb{R}^3$	Koordinatenvektor für einen Punkt im Koordinatensystem K	4.3.2
${}^K \underline{v} \in \mathbb{R}^3$	Translatorische Geschwindigkeit eines Punktes im Koordinatensystem K	4.3.2
${}^K \underline{\omega} \in \mathbb{R}^3$	Rotatorische Geschwindigkeit eines Punktes im Koordinatensystem K	4.3.2
${}^B \underline{T}_A \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$	Homogene Transformation aus dem Koordinatensystem A in B	4.3.2
$T_S \in \mathbb{T}_S$	Simulationsaufgabe	5.5.1
$R_T \in \mathbb{R}_S$	Ressource zur Ausführung einer Simulationsaufgabe T_S	5.5.1
$C \in \mathbb{C} := \mathbb{C}_{TR} \cup \mathbb{C}_{TT}$	Constraints zur Ausführung von Simulationsaufgaben T_S	5.5.1
$C_{TR} : \mathbb{T}_S \times \mathbb{R}_T \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{R}$	Constraint zur Zuordnung von Simulationsaufgaben T_S zu Ressourcen R_T	5.5.1
$C_{TT} : \mathbb{T}_S \times \mathbb{T}_S \times \mathbb{T} \rightarrow \mathbb{R}$	Constraint zur Beschreibung von Abhängigkeiten zwischen Simulationsaufgaben T_S	5.5.1
$P \in \mathbb{P}^n$ mit $\mathbb{P} := \mathbb{T}_S \times \mathbb{T}$	Schedulingplan mit n Elementen	5.5.1
$f_P : \mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{R}$	Funktion zur Bewertung eines Plans aus n Aufgaben $T_{S,i}$	5.5.1

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der Experimentierbare Digitale Zwilling: Ausgangssituation, Ziele, Begriffe und Konzept	11
2.1	Neue Anforderungen an Modellierung und Simulation – Motivation und Ziele des Experimentierbaren Digitalen Zwillings	12
2.1.1	Digitalisierung von Systemen und Prozessen	13
2.1.2	Entwicklung von Systemen aus (Cyber-Physischen) Systemen	15
2.1.3	Zusammenführung von Daten und Modellen	22
2.1.4	Sicherstellung der Qualität von Simulationen	23
2.1.5	Entwicklung und Betrieb KI-gestützter Systeme	24
2.1.6	Durchführung eines übergreifenden (Model-based) Systems Engineerings	26
2.1.7	Durchgängiger Einsatz von Simulation im Lebenszyklus von Systemen	28
2.1.8	Modellierung und Simulation in ausgewählten Anwendungsbereichen	29
2.1.9	Anforderungen der Nutzer von Simulationstechnik	31
2.2	Der Digitale Zwilling: Abbildung realer Systeme in der virtuellen Welt seit 2003	35
2.2.1	Hardware-Zwillinge im Apollo-Programm	37
2.2.2	Digitale Zwillinge für das Product Lifecycle Management	37

2.2.3	Der Digitale Zwilling als Virtual Digital Fleet Leader	41
2.2.4	Digitale Zwillinge für Industrie 4.0 und Simulation	43
2.2.5	Digitale Zwillinge für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge	44
2.2.6	Erweiterung des Model-based zum Digital Twin-based Systems Engineering	48
2.3	Der Digitale Zwilling: Maßgebliche Aspekte und Fragestellungen	50
2.3.1	Wo werden Digitale Zwillinge eingesetzt?	51
2.3.2	Wozu werden Digitale Zwillinge genutzt?	53
2.3.3	Was wird unter einem Digitalen Zwilling verstanden?	73
2.3.4	Welche Technologien sind zur Umsetzung notwendig?	82
2.3.5	Wie ist der Bezug zwischen Digitalem und Realem Zwilling?	88
2.4	Der Digitale Zwilling: Eine übergreifende Definition erschließt sein Potenzial	91
2.4.1	Die Bedeutung des Wortes „Zwilling“	92
2.4.2	Definition des „Digitalen Zwillings“ (DZ)	93
2.4.3	Unterschiedliche Betrachtungsgegenstände	98
2.4.4	Digitale Artefakte eines Digitalen Zwillings	100
2.4.5	Technische Umsetzung des Digitalen Zwillings und DZ-Plattform	102
2.4.6	Aufgaben des Digitalen Zwillings	106
2.4.7	Anwendungsperspektiven auf den Digitalen Zwilling	107
2.4.8	Lebenszyklusphasen des Digitalen Zwillings	108
2.4.9	Nutzersichten auf den Digitalen Zwilling	109
2.5	Der Experimentierbare Digital Zwilling: Die Perspektive der Simulationstechnik	109
2.5.1	Definition des „Experimentierbaren Digitalen Zwillings“ (EDZ)	111
2.5.2	Die EDZ-Methodik legt den übergreifenden Rahmen fest	113
2.5.3	Zwillinge interagieren in Szenarien	115
2.5.4	Szenarien werden in Virtuellen Testbeds ausgeführt	117

2.5.5	Zwillinge werden durch Methoden genutzt	119
2.5.6	Arbeitsabläufe organisieren den Einsatz von Zwillingen und Methoden	122
2.6	Der Anwendungsraum Experimentierbarer Digitaler Zwillinge	125
2.6.1	Lebenszyklus-Dimensionen	127
2.6.2	Methoden-Dimension	128
2.6.3	Infrastruktur-Dimension	128
2.6.4	Simulationsdomänen-Dimension	128
2.6.5	Disziplinen- und Nutzer-Dimension	128
2.6.6	Komplexitäts-Dimension	129
2.6.7	Perspektiven-Dimension	129
2.6.8	Anwendungsbereich-Dimension	129
2.6.9	Der Anwendungsraum im Beispiel	129
2.7	Zusammenfassung	133
3	Experimentierbare Digitale Zwillinge im Detail	137
3.1	Grundlegende Begriffe	138
3.1.1	System	138
3.1.2	Simulationsmodell	142
3.1.3	Simulation und Experimentierbares Modell	147
3.1.4	Simulator	152
3.1.5	Verifikation und Validierung eines Modells	154
3.1.6	Disziplin, Domäne und Anwendungsbereich	161
3.2	Struktur und Modellierung des Experimentierbaren Digitalen Zwillings	162
3.2.1	Aufbau	162
3.2.2	Interaktion und Interaktionsformen	165
3.2.3	Modell	167
3.2.4	Simulation	169
3.2.5	Realitätsnähe	171
3.2.6	Maschinelles Lernen	172
3.3	Die Komponenten des Experimentierbaren Digitalen Zwillings	174
3.3.1	Physisches System	176
3.3.2	Informationsverarbeitendes System	181
3.3.3	Mensch-Maschine-Schnittstelle	182
3.3.4	Interaktionsinfrastruktur	183

3.4	Die Interaktion Experimentierbarer Digitaler Zwillinge	192
3.4.1	Systemdekomposition mit Experimentierbaren Digitalen Zwillingen	192
3.4.2	Vernetzung von Experimentierbaren Digitalen Zwillingen in EDZ-Szenarien	198
3.4.3	Hierarchische und kaskadierte Experimentierbare Digitale Zwillinge	202
3.4.4	Hybride Szenarien und Hybride Zwillingspaare	204
3.5	Semantische Modellbildung für Experimentierbare Digitale Zwillinge	209
3.5.1	Modellbildung in Entwicklungsprozessen	210
3.5.2	Modellbildung durch Sensordatenverarbeitung	211
3.5.3	Domänenspezifische Modellierung domänenübergreifender EDZ	212
3.5.4	Sukzessive Detaillierung von Experimentierbaren Digitalen Zwillingen	213
3.5.5	Heterogene Szenariomodelle und übergreifendes Datenmanagement	213
3.6	Virtuelle Testbeds als Laufzeitumgebung für Experimentierbare Digitale Zwillinge	215
3.6.1	Überführung des EDZ-Szenarios in ein Netzwerk aus Simulationsaufgaben	217
3.6.2	Einheitliche Beschreibung von Simulationsfunktionen in Simulationseinheiten	226
3.6.3	Kopplung von Simulationseinheiten und -aufgaben	237
3.6.4	Ausführung von Experimentierbaren Digitalen Zwillingen in Virtuellen Testbeds	248
3.6.5	Interaktion mit Experimentierbaren Digitalen Zwillingen	251
3.7	EDZ-Methoden	251
3.7.1	Systems Engineering	252
3.7.2	Optimierung	256
3.7.3	Entscheidungsunterstützung	262
3.7.4	Verifikation & Validierung von Systemen	265
3.7.5	Steuerung von Systemen	269
3.7.6	Virtuelle Inbetriebnahme	273
3.7.7	Vorausschauende Wartung	275
3.7.8	Entscheidungsfindung	276
3.7.9	Training Neuronaler Netze	281

3.7.10	Verwaltungsschalen	284
3.7.11	Mensch-Maschine-Schnittstellen	286
3.7.12	Training	289
3.8	Zusammenfassung	290
4	Grundlagen der Simulationstechnik	291
4.1	Computergestützte Simulation als Grundlage	
Experimentierbarer Digitaler Zwillinge		293
4.1.1	Der Begriff „Simulation“	294
4.1.2	Von der Simulation zur computergestützten Simulation	295
4.1.3	Modelle als Grundlage der Simulation	297
4.1.4	Simulation als Prozess	300
4.1.5	Klassifizierung von Simulationen	301
4.1.6	Einsatz und Ziele von Simulation	305
4.1.7	Geltungsbereich von Simulation, Verifikation & Validierung	308
4.1.8	eRobotik zur übergreifenden Betrachtung technischer Systeme	314
4.2	Domänenübergreifende Simulationsverfahren	317
4.2.1	Gleichungsbasierte Simulation	317
4.2.2	Signalorientierte Simulation	326
4.2.3	Bondgraphen	331
4.2.4	Physikalisch-objektorientierte Simulation	339
4.2.5	Ereignisdiskrete Simulation	343
4.2.6	Agentenbasierte Simulation	358
4.3	Domänenspezifische Simulationsverfahren für die Robotik	364
4.3.1	CAD-Techniken	365
4.3.2	Kinematik	367
4.3.3	Starrkörperdynamik	375
4.3.4	Finite-Elemente-Methode	385
4.3.5	Sensorsimulation	396
4.3.6	Aktorsimulation	403
4.3.7	Weitere Verfahren	406
4.4	Übergreifende Simulation von Systemen	409
4.4.1	Klassifizierung von Modellen und Kopplungsvarianten	411
4.4.2	Kopplungsverfahren und modellübergreifende Simulation	415

4.4.3	Virtuelle Testbeds	419
4.4.4	Simulation und Optimierung	419
4.5	Model-based Systems Engineering	422
4.5.1	Model-based Systems Engineering mit SysML	424
4.5.2	Anforderungsdiagramm (req)	426
4.5.3	Blockdefinitionsdiagramm (bdd)	427
4.5.4	Internes Blockdiagramm (ibd)	428
4.5.5	Aktivitätsdiagramm (act)	429
4.5.6	MBSE-Prozesse	430
4.6	Model-Driven Engineering	431
4.6.1	Grundidee	431
4.6.2	Daten und Modelle auf vier Ebenen	434
4.6.3	Modelltransformationen ermöglichen Interoperabilität	438
4.6.4	Technische Umsetzung mit der Model-Driven Architecture der OMG	440
4.6.5	Domänenspezifische Modelle mit der UML (M1)	441
4.6.6	Metamodell der UML (M2)	444
4.6.7	Meta Object Facility (M3)	445
4.7	X-in-the-Loop-Konzepte zur Kopplung von Simulation und Realität	447
4.8	Infrastrukturaspekte für den Einsatz von Simulationstechnik	449
4.8.1	Datenformate	450
4.8.2	Simulation und Geoinformation	452
4.8.3	Simulation in der Cloud	452
4.8.4	Visualisierung, Interaktion, Feedback, Virtual Reality	453
4.9	Zusammenfassung	454
5	Virtuelle Testbeds als Laufzeitumgebung für Experimentierbare Digitale Zwillinge	457
5.1	Anforderungen an Virtuelle Testbeds	459
5.1.1	Funktionale Anforderungen	459
5.1.2	Nichtfunktionale Anforderungen	465
5.2	Architektur Virtueller Testbeds	470
5.2.1	Virtuelle Testbeds als Simulationsplattform	471
5.2.2	Mikro-Kernels und Mikro-Services als Grundelemente	474
5.2.3	Architekturelemente und deren Kombination	478

5.3	Modell- und Datenmanagement in Virtuellen Testbeds	485
5.3.1	Repräsentation und Verwaltung heterogener Modelldaten	486
5.3.2	Konzeptuelle, logische und physikalische Datenmodelle	488
5.3.3	Das physikalische Datenmodell des VTB-Kernels	490
5.3.4	Metadaten, Daten und Kommunikation im VTB-Kernel	493
5.3.5	Der VTB-Kernel als aktive Simulationsdatenbank	496
5.3.6	Abbildung Experimentierbarer Digitale Zwillinge	499
5.3.7	Funktionale Modellabbildung	504
5.4	Modellierung und Simulation von Interaktion	506
5.4.1	Modellierung von Ports und Verbindungen	506
5.4.2	Simulation von Verbindungen	512
5.4.3	Kommunikation mit realen Systemen	513
5.5	Zeitsteuerung	514
5.5.1	Szenarioübergreifendes Scheduling	517
5.5.2	Modellanalyseprozess für das prädiktive Scheduling	520
5.5.3	Ausführung der Simulation mittels reaktivem Scheduling	526
5.5.4	Scheduling von Simulationseinheiten und -aufgaben	527
5.6	Parallele und verteilte Simulation	531
5.6.1	Varianten und Ziele von Parallelisierung und Verteilung	532
5.6.2	Softwaretechnische Abbildung des Simulationszustands	534
5.6.3	Synchronisierung von Simulationszuständen	538
5.7	Analyse von Experimentierbaren Digitalen Zwillingen in Virtuellen Testbeds	542
5.7.1	Ein- und Ausgangsgrößen	543
5.7.2	Offline- und Online-Analyse	544
5.7.3	Interaktive und automatische Analyse	545
5.7.4	Visualisierung des Simulationszustands	546
5.7.5	Interaktion mit der Simulation	548
5.7.6	Haptisches und kinästhetisches Feedback	548

5.8	Experimentierbare Digitale Zwillinge und Virtuelle Testbeds in der Arbeitsorganisation	548
5.8.1	Arbeitsmittel	549
5.8.2	Gestaltung von Arbeitssystemen	550
5.8.3	Arbeitsabläufe	550
5.8.4	Datenmangement-Strukturen	556
5.8.5	Randbedingungen für Interoperabilität	557
5.9	Zusammenfassung	562
6	EDZ-Anwendungen	565
6.1	Die Anwendungsbereiche und Anwendungsbeispiele im Überblick	566
6.2	Weltraum	569
6.2.1	Entwicklung eines Explorationsrovers	570
6.2.2	Entwicklung eines Laufroboters	576
6.2.3	Mentales Modell für einen Laufroboter	576
6.2.4	Lokalisierung von Explorationsrobotern	577
6.2.5	Optimierung von Bildverarbeitungsparametern für die Fernerkundung	577
6.2.6	Entwicklung modularer Satellitensysteme	578
6.2.7	Materialstudien für modulare Satellitensysteme für das On-Orbit-Servicing	581
6.2.8	Die Internationale Raumstation	582
6.2.9	Analyse des Rendezvous & Docking von ATV und Internationaler Raumstation	583
6.2.10	Optimierung von Systemparametern für das Rendezvous & Docking	585
6.2.11	Übergreifende Vorgehenssystematik für die Weltraumrobotik	587
6.3	Industrie	589
6.3.1	Entwicklung rekonfigurierbarer Roboterarbeitszellen	589
6.3.2	Optimierung des Kameraeinsatzes in der Produktionstechnik	593
6.3.3	Entwicklung von Arbeitszellen für die mikrooptische Montage	594
6.3.4	Steuerung realer Manipulatoren	595
6.3.5	Entwicklung von Regelungsverfahren für Roboter	597

6.3.6	Werkerorientierte Programmierung von Manipulatoren	598
6.3.7	Intuitive Bedienoberflächen für Montagetraining und Robotersteuerung	600
6.3.8	Schulungssysteme für die berufliche Bildung	602
6.3.9	Automatische Handlungsplanung für Manipulatoren	605
6.3.10	Entscheidungsunterstützung für die Servicerobotik	606
6.3.11	Ergonomieuntersuchungen am virtuellen Menschen	607
6.4	Umwelt	608
6.4.1	Semantische Umweltmodellierung für den Wald durch Fernerkundung	608
6.4.2	Planung des Waldbaus	610
6.4.3	Entwicklung von Forstmaschinen	612
6.4.4	Training von Forstmaschinenführern	612
6.4.5	Lokalisierung von Forstmaschinen	613
6.4.6	Exakte Positionsbestimmung gefällter Bäume bei der Holzernte	618
6.4.7	Navigation von Forstmaschinen	619
6.4.8	Planung der Holzernte	620
6.4.9	Optimierung der Holzernteplanung	623
6.4.10	Fahrerassistenz für Forstmaschinen	624
6.4.11	Steuerung (teil-) autonomer Forstmaschinen	625
6.4.12	Auswirkung von Sturmereignissen im Wald	626
6.4.13	Semantische Umweltmodellierung für den Wald durch terrestrische Sensorik	628
6.4.14	Semantische Umweltmodellierung für den Wald durch halbautomatische Inventur	628
6.4.15	Entscheidungsunterstützung für Privatwaldbesitzer	629
6.4.16	Trainingssysteme für Mähdrescher und Baumaschinen	632
6.4.17	Bewegungsfeedback für das simulatorgestützte Training	632
6.4.18	Entwicklung von Unterwasserfahrzeugen	634
6.4.19	Bedienung von Rettungsrobotern	636
6.5	Automobil	638
6.5.1	Funktionale Validierung von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Fahrzeugen	638

6.5.2	Automatisiertes Training von Fahralgorithmen	641
6.5.3	Fahrerassistenz für das Rückwärtsfahren mit Anhänger	642
6.6	Stadt und Gebäude	645
6.6.1	Das hybride Smart Home	645
6.6.2	Analyse von Produktionssystemen im baulichen und städtischen Umfeld	648
6.7	Beispiele für konkrete Virtuelle Testbeds	649
6.7.1	Das Virtual Space Robotics Testbed	650
6.7.2	Das Virtual Sensor Testbed	653
6.7.3	Das Virtual Production Testbed	654
6.7.4	Das Geo-Simulation Testbed	655
6.7.5	Das Virtual BIM Testbed	657
6.7.6	Das Virtual Automotive Testbed	657
6.7.7	Der Virtuelle Wald	661
6.7.8	Visual ⁴	663
6.7.9	Das Virtual Robotics Lab	666
6.8	Zusammenfassung	668
7	Zusammenfassung	669
	Literaturverzeichnis	675

Akronyme

AAS	Asset Administration Shell
API	Application Programming Interface
AUV	Autonomes Unterwasserfahrzeug (engl. Autonomous Underwater Vehicle, AUV)
BIM	Building Information Modelling
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CIM	Computation Independent Model
CMOF	Complete MOF
CPMS	Cyber-Physisches Mechatronisches System
CPS	Cyber-Physisches System
DAE	Differential Algebraic Equation
DEVS	Discrete Event System Specification
DIS	Distributed Interactive Simulation
DSL	Domain-Spezifische Sprache
DSS	Decision Support System
DZ	Digitaler Zwilling
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EDT	Experimentable Digital Twin
EDZ	Experimentierbarer Digitaler Zwilling
EMOF	Essential MOF
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMI	Functional Mockup Interface
FMU	Functional Mockup Unit
GIS	Geografisches Informationssystem

GNSS	Globales Navigationssatellitensystem (z. B. GPS)
GPL	General-Purpose Language
GPS	Global Positioning System
HiL	Hardware-in-the-Loop
HLA	High-Level Architecture
iBLOCK	intelligent Building Block
iBOSS	intelligent Building Blocks for On-Orbit Satellite Servicing
IFC	Industry Foundation Classes
IMU	Inertial Measurement Unit
IoT	Internet of Things
ISS	Internationale Raumstation (engl. International Space Station, ISS)
IVS	Informationsverarbeitendes System
KI	Künstliche Intelligenz
KPI	Key Performance Indicator
LCIM	Levels of Conceptual Interoperability Model
LCP	Linear Complementarity Problem
M0	Modelle in der realen Welt
M000	Objekte der realen Welt
M001	Mentales Modell eines Objekts der realen Welt
M1	Modelle der Artefakte der realen Welt
M100	Datenobjekte im Modell (die „Daten“)
M101	Modell der Daten (das „Datenmodell“)
M2	Meta-Modelle der Modelle der Artefakte der realen Welt
M200	Metamodell der Datenobjekte
M201	Metamodell des Datenmodells
M3	Meta-Meta-Modell
M3	Meta-Metamodell des Datenmodells
MBSE	Model-based Systems Engineering
MCPS	Mechatronisches/Cyber-Physisches System
MDA	Model-Driven Architecture
MDD	Model-Driven Development
MDE	Model-Driven Engineering
MDSE	Model-Driven Software Engineering
MiL	Model-in-the-Loop
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
MOF	Meta Object Facility
MQTT	Message Queing Telemetry Transport
nDOM	Normalisiertes Digitales Oberflächenmodell, auch als „Differenzmodell“ bezeichnet

O0	Datenobjekte (siehe Abbildung 4.49)
O1	Modelle der Datenobjekte (siehe Abbildung 4.49)
OCL	Object Constraint Language
ODE	Ordinary Differential Equation
OMG	Object Management Group
OOA	On-Orbit Assembly
OOS	On-Orbit Servicing
PDE	Partial Differential Equation
PHM	Product Health Management
PIM	Platform Independent Model
PLM	Product Lifecycle Management
PSM	Platform Specific Model
PSYS	Physisches System
QVT	Query/View/Transformation Specification
ROS	Robot Operating System
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
RvD	Rendezvous & Docking
RZ	Realer Zwilling
SBSE	Simulation-based Systems Engineering
SCRUM	Vorgehensmodell des Projekt-und Produktmanagements
SHM	Structural Health Management
SiL	Software-in-the-Loop
SMP2	Simulation Model Portability Version 2
SOA	Service-orientierte Architektur
SoS	System of Systems
SysML	Systems Modeling Language
TM	Terra Mechanics (englisch für „Bodenmechanik“)
UML	Unified Modelling Language
VCI	Virtual Testbed Communication Infrastructure
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme
VSD	Virtual Testbed Active Simulation Database
VTB	Virtuelles Testbed

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Digitale Zwillinge sind virtuelle digitale 1-zu-1-Repräsentationen ihrer Realen Zwillinge – und sehen auch so aus. Hierdurch werden sie „greifbar“ und ihr Verhalten nachvollziehbar (Foto links Marc Priggemeyer, [PR18], Foto rechts Wald und Holz NRW).	2
Abbildung 1.2	Experimentierbare Digitale Zwillinge und die Werkzeuge, Methoden und Arbeitsabläufe der EDZ-Methodik sind Grundlage für eine Vielzahl unterschiedlicher EDZ-Anwendungen. Paare Realer Zwillinge und EDZ sind durch blaue Balken miteinander verbunden.	5
Abbildung 1.3	Die Zusammenführung von Methoden, Werkzeugen und Arbeitsabläufen aus Model-driven Engineering, Model-based Systems Engineering, Simulation, Robotik und Industrie 4.0 ermöglicht die umfassender Modellierung, Vernetzung und Simulation Experimentierbarer Digitaler Zwillinge. Diese sind die Grundlage für EDZ-Methoden und gemeinsam mit diesen Kernbestandteil der EDZ-Methodik.	6
Abbildung 1.4	Die EDZ-Methodik ermöglicht eine neue Durchgängigkeit in der Simulationstechnik und in der Anwendung Digitaler Zwillinge (aufbauend auf [RS22]).	7

Abbildung 1.5	Eine Methode, viele Anwendungen: Die Inhalte der nachfolgenden Kapitel kurz zusammengefasst	9
Abbildung 2.1	Facetten der Digitalisierung	13
Abbildung 2.2	Struktur und Interaktionen eines Mechanischen/Cyber-Physischen Systems (MCPS)	19
Abbildung 2.3	Beispiele für Systeme aus Systemen (SoS) aus der Forstwirtschaft und der Automobiltechnik und deren Interaktion auf der physischen und IT-Ebene . . .	20
Abbildung 2.4	Klassifizierung von Systemverhalten in bekannt/unbekannt und gewünscht/nicht gewünscht (übersetzt aus [GV17])	22
Abbildung 2.5	Die Lebenszyklusphasen von Systemen und deren Entwicklung in Typen sowie virtuellen und realen Instanzen	28
Abbildung 2.6	Ausgewählte Komponenten einer Forstmaschine, die in einer systemübergreifenden Simulation berücksichtigt werden müssen (Foto Wald und Holz NRW)	32
Abbildung 2.7	Qualitativer Vergleich der Entwicklung von Modelldetaillierung und Kosten für die „klassische“ und EDZ-gestützte Herangehensweise in Abhängigkeit vom Modellumfang	34
Abbildung 2.8	Die Entwicklung des (Digitalen) Zwillings von 1960 bis heute	36
Abbildung 2.9	Das Konzept des Digitalen Zwillings entsprechend [GV17]: Zur Orientierung ist hier wie auch in den folgenden Abbildungen das, was heute als Digitaler Zwilling bezeichnet wird, mit dem in Abbildung 2.17 eingeführten Symbol gekennzeichnet.	38
Abbildung 2.10	Grundlegende Technologien für einen Digitalen Zwilling (hier als „Virtual Digital Fleet Leader“ bezeichnet) und dessen Nutzen (Darstellung und Beispiele nach [GS12])	42