

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	Datenmanagement-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 gefälltter 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 Anhängern	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