

# Inhaltsverzeichnis

**Abbildungsverzeichnis..... iv**

**Tabellenverzeichnis..... v**

**Abkürzungsverzeichnis..... vi**

**Zusammenfassung..... vii**

**Abstract..... viii**

**1. Einleitung..... 1**

1.1 Bedeutung von Simulation ..... 1

1.2 Herausforderungen der Simulation von IoT-Systemen ..... 4

1.3 Zielsetzung der Arbeit ..... 6

1.4 Abgrenzung der Arbeit ..... 8

1.5 Aufbau der Arbeit ..... 9

**2. Stand der Forschung und Technik..... 11**

2.1 Simulation..... 11

2.1.1 Bedeutung von Simulation..... 12

2.1.2 Klassifikation von Simulationsarten ..... 13

2.1.3 Simulationsphasen ..... 15

2.2 Internet der Dinge ..... 16

2.2.1 Schlüsseltechnologien im IoT ..... 17

2.2.2 Elementare Anwendungsfälle im IoT ..... 18

2.2.3 Anwendungsbeispiel des IoT ..... 19

2.3 Bestehende Ansätze zur Simulation von IoT-Systemen..... 20

2.3.1 Diskrete-Event-Simulatoren ..... 21

2.3.2 Agentenbasierte Simulatoren ..... 25

2.3.3 Zusammenfassung ..... 30

2.4 Bestehende Ansätze zur dynamischen Co-Simulation ..... 31

2.4.1 Co-Simulation ..... 32

2.4.2 Co-Simulation mit domänenspezifischen Standards ..... 33

2.4.3 Dynamische Co-Simulation mit Functional Mock-up Interface..... 33

2.4.4 Dynamische Co-Simulation mit High Level Architecture ..... 34

2.4.5 Allgemeine Co-Simulationsansätze aus der Literatur ..... 34

2.4.6 Dynamische Co-Simulation mit SOA..... 35

2.4.7 Dynamische Co-Simulation mit OSGi ..... 35

2.4.8 Dynamische Co-Simulation mit Agenten ..... 36

2.4.9 Bewertung der Co-Simulationsansätze ..... 38

2.5 Zusammenfassende Bewertung der Ansätze und Folgerung..... 40

**3. Konzept zur dynamischen Co-Simulation ..... 42**

3.1 Grundlegende Entscheidungen und Konzeptübersicht..... 44

3.1.1	Entscheidung zur Einbindung von Simulationstools .....	44
3.1.2	Überblick über die Co-Simulation .....	46
3.1.3	Co-Simulationsumgebung und Simulationsvertreter .....	49
3.1.4	Anforderungen an die Teilsimulationen und ihre Simulationstools .....	51
3.2	Datenaustausch in Co-Simulationen .....	52
3.2.1	Datenaustausch bei Co-Simulationsstandards .....	52
3.2.2	Datenaustausch in der Co-Simulationsumgebung .....	54
3.2.3	Datenaustauschschnittstellen .....	55
3.2.4	Anforderungen an die Teilsimulationen und ihre Simulationstools .....	57
3.3	Interaktionssimulationen .....	57
3.3.1	Interaktionsarten im IoT .....	58
3.3.2	Kommunikationsorientierte Interaktionssimulation .....	61
3.3.3	Prozessorientierte Interaktionssimulation .....	69
3.3.4	Anforderungen an die Teilsimulationen und ihre Simulationstools .....	76
3.4	Synchronisation der Co-Simulation .....	78
3.4.1	Synchronisationsansätze .....	79
3.4.2	Synchronisation bei Co-Simulationsstandards .....	82
3.4.3	Bewertung der Synchronisationsansätze .....	83
3.4.4	Synchronisationskonzept .....	83
3.4.5	Taktgeber .....	83
3.4.6	Synchronisationsschnittstelle .....	84
3.4.7	Anforderungen an die Teilsimulationen und ihre Simulationstools .....	85
3.4.8	Erweiterung der Synchronisation .....	85
<b>4</b>	<b>Realisierung der Co-Simulation als Framework .....</b>	<b>87</b>
4.1	Konzept des Frameworks der Co-Simulationsumgebung und der Simulationsvertreter .....	88
4.1.1	Anforderungen an das Co-Simulationsumgebungsframework .....	88
4.1.2	Realisierungsmöglichkeiten .....	90
4.1.3	Diskussion der Realisierungsmöglichkeiten .....	92
4.2	Konzept zur Erstellung der Schnittstellen .....	93
4.2.1	Konzeption der Schnittstellen .....	93
4.2.2	Befähigung von zusätzlichen Simulationstools .....	97
4.2.3	Anbindung an FMI .....	98
4.3	Modellbibliothek zur Erstellung der Interaktionssimulationen .....	99
4.3.1	Kommunikationsorientierte Interaktionssimulation .....	100
4.3.2	Prozessorientierte Interaktionssimulation .....	100
<b>5</b>	<b>Implementierung des Co-Simulationsframeworks .....</b>	<b>102</b>
5.1	Implementierung des Co-Simulationsframeworks .....	102
5.1.1	Co-Simulationsumgebung .....	102
5.1.2	Simulationsvertreter .....	103
5.1.3	Benutzeroberfläche .....	104
5.2	Implementierung der Schnittstellen .....	104
5.2.1	Generische Schnittstellen .....	105
5.2.2	Schnittstellen zu Komponentensimulationen .....	105
5.2.3	Schnittstelle zur Kommunikationssimulation .....	107
5.2.4	Schnittstelle zur Prozesssimulation .....	107

5.3	Implementierung der Synchronisation.....	107
5.3.1	Implementierung des Taktgebers.....	107
5.3.2	Realisierung der Synchronisation in den einzelnen Simulationstools.....	108
5.4	Implementierung der Interaktionssimulationen.....	109
5.4.1	Kommunikationssimulation in OMNet++ .....	109
5.4.2	Prozessinteraktion in Unity 3D.....	110
<b>6</b>	<b>Evaluierung der Co-Simulation .....</b>	<b>112</b>
6.1	Beschreibung des Szenarios .....	112
6.1.1	Simuliertes IoT-Szenario .....	113
6.1.2	Modellbeschreibung.....	117
6.1.3	Ablauf des Evaluierungsszenarios und der Simulation .....	118
6.2	Erfüllung der Herausforderungen .....	119
6.3	Erfüllung der Zielsetzung .....	121
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtungen .....</b>	<b>125</b>
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse und Bewertung .....	125
7.2	Ausblick .....	127
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>128</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>139</b>
	Erweiterung durch Hardware-in-the-Loop.....	139
	Beschreibung der Modelle .....	142
	<b>Begriffsverzeichnis .....</b>	<b>149</b>