

# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>                                     | <b>iv</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis.....</b>                                       | <b>v</b>    |
| <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>                                     | <b>vi</b>   |
| <b>Zusammenfassung.....</b>   | <b>vii</b>  |
| <b>Abstract.....</b>  | <b>viii</b> |
| <b>1. Einleitung.....</b>   | <b>1</b>    |
| 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           |
| <b>2 Stand der Forschung und Technik .....</b>                        | <b>11</b>   |
| 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 domänenpezifischen 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          |
| <b>3 Konzept zur dynamischen Co-Simulation .....</b>                  | <b>42</b>   |
| 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 | Datenaustauschschmittstellen .....   | 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  |
| 4     | <b>Realisierung der Co-Simulation als Framework</b> .....                            | 87  |
| 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 |
| 5     | <b>Implementierung des Co-Simulationsframeworks</b> .....                            | 102 |
| 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>   |            |