

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abkürzungsverzeichnis | V |
| Formelzeichen | VII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Problemstellung und Forschungsziele | 2 |
| 1.3 Struktur der Arbeit und Forschungsmethodik | 4 |
| 1.4 Veröffentlichungen | 6 |
| 2 Stand der Technik | 7 |
| 2.1 Grundlagen der Modellierung und Simulation | 7 |
| 2.1.1 Grundlegende Definitionen und Terminologie | 7 |
| 2.1.2 Arten von Modellen und Simulationen | 8 |
| 2.1.3 Qualitätsmerkmale von Modellen und Simulationen | 10 |
| 2.2 Stochastische Modellierung und Simulation | 11 |
| 2.2.1 Wahrscheinlichkeitstheorie | 11 |
| 2.2.2 Definition stochastischer Modelle und Simulationen | 16 |
| 2.3 Grundlagen der Validierung | 19 |
| 2.3.1 Grundphilosophischer Ansatz | 19 |
| 2.3.2 Grundlegende Definitionen und Terminologie | 20 |
| 2.3.3 Konventionelle Validierungsprozesse | 22 |
| 2.4 Statistische Validierung | 23 |
| 2.4.1 Grundlegender Ansatz, Definitionen und Terminologie | 24 |
| 2.4.2 Fehler und Unsicherheiten | 25 |
| 2.4.3 Statistische Validierungsmethoden und Prozesse | 26 |
| 2.4.4 Vorteile statistischer Validierungsmethoden und Prozesse | 30 |
| 2.5 Aktuelle Validierung in der Fahrzeugtechnik | 31 |
| 2.5.1 Analyse der Validierungsmethoden und Prozesse | 32 |
| 2.5.2 Kritik an der aktuellen Validierung | 36 |
| 2.5.3 Forschungslücke und Potenzial der statistischen Validierung | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Vorgehen zur Entwicklung einer Validierungsmethode | 39 |
| 3.1 | Forschungsfragen | 39 |
| 3.2 | Anforderungen an die Methode | 40 |
| 3.3 | Statistisches Validierungskonzept und Vorarbeit | 43 |
| 4 | Methode und statistisches Validierungsframework | 45 |
| 4.1 | Verifikationsdomäne | 47 |
| 4.2 | Kalibrierungsdomäne | 49 |
| 4.3 | Validierungsdomäne | 51 |
| 4.3.1 | Parameterkonfigurationen | 51 |
| 4.3.2 | System- und Anwendungsbeurteilung | 51 |
| 4.3.3 | Modell- und Anwendungsbeurteilung | 52 |
| 4.3.4 | Validierungsmetrik und Entscheidungsfindung | 53 |
| 4.3.5 | Unsicherheitslernen | 54 |
| 4.4 | Anwendungsdomäne | 57 |
| 4.4.1 | Anwendungsparameterkonfigurationen | 58 |
| 4.4.2 | Modellsimulation und Anwendungsbewertung | 58 |
| 4.4.3 | Unsicherheitsvorhersage und -integration | 58 |
| 4.4.4 | Anwendungsentscheidung | 59 |
| 5 | Anwendung I: Validierung einer modularen Verbrauchssimulation mit Realdaten | 61 |
| 5.1 | Versuchsaufbau und -durchführung | 61 |
| 5.1.1 | Versuchsaufbau | 62 |
| 5.1.2 | Versuchsdurchführung und Szenarien | 63 |
| 5.2 | Aufbau der Simulationsumgebung | 63 |
| 5.2.1 | Framework für modulare Gesamtfahrzeugsimulationen | 64 |
| 5.2.2 | Längsdynamikmodell Nutzerorientierte Elektromobilität (NEmo) | 64 |
| 5.3 | Statistische Validierung des Simulationsmodells | 65 |
| 5.3.1 | Verifikationsdomäne | 65 |
| 5.3.2 | Kalibrierungsdomäne | 66 |
| 5.3.3 | Validierungsdomäne | 68 |
| 5.3.4 | Anwendungsdomäne | 73 |
| 5.4 | Ergebnisse | 74 |
| 5.4.1 | Konfidenzanalyse der Ergebnisse | 75 |
| 5.4.2 | Relativer Vergleich von Ergebnissen | 77 |

| | | |
|------------|---|--------------|
| 6 | Anwendung II: Validierung einer Fahrdynamiksimulation mit virtuellen Daten | 79 |
| 6.1 | Versuchsaufbau und Simulationsmodell | 79 |
| 6.1.1 | Methode der erzeugten Universen | 79 |
| 6.1.2 | Virtuelle Validierungsdaten durch ein Zweispurmodell | 80 |
| 6.1.3 | Zu validierendes Einspurmodell | 82 |
| 6.2 | Verifikations- und Kalibrierungsdomäne..... | 82 |
| 6.3 | Validierungsdomäne | 83 |
| 6.4 | Anwendungsdomäne | 85 |
| 7 | Bewertung und Diskussion | 87 |
| 7.1 | Validierung der Prädiktionsmethode | 87 |
| 7.1.1 | Plausibilisierung und Robustheit der Prädiktionsmethode..... | 87 |
| 7.1.2 | Validierungsstudie mit zusätzlichen Testdaten | 88 |
| 7.1.3 | Diskussion der Prädiktionsmethode..... | 89 |
| 7.2 | Validierung der Gesamtmethode..... | 90 |
| 7.2.1 | Aussagekraft der Ergebnisse des Frameworks | 90 |
| 7.2.2 | Vergleich des Frameworks mit bestehenden Methoden..... | 94 |
| 7.2.3 | Absicherung des Gesamtkonzeptes | 95 |
| 7.3 | Überprüfung der Anforderungen..... | 96 |
| 7.4 | Beantwortung der Forschungsfragen | 96 |
| 7.5 | Erfüllung der Forschungsziele..... | 98 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 99 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 99 |
| 8.2 | Ausblick | 100 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | i |
| | Tabellenverzeichnis | iii |
| | Literaturverzeichnis | v |
| | Vorveröffentlichungsliste | xxv |
| | Betreute Studienarbeiten..... | xxvii |
| | Anhang | xxix |