

# Inhaltsverzeichnis

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| Vorwort .....              | V     |
| Nomenklatur.....           | XI    |
| Abbildungsverzeichnis..... | XV    |
| Tabellenverzeichnis .....  | XIX   |
| Kurzfassung .....          | XXI   |
| Abstract .....             | XXIII |

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

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| 1.1 Motivation.....         | 3 |
| 1.2 Aufbau der Arbeit ..... | 4 |

## **2 Stand der Technik und Grundlagen ..... 7**

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 2.1 Fahrsimulatoren .....                       | 7  |
| 2.1.1 Entwicklung dynamischer Simulatoren ..... | 7  |
| 2.1.2 Bauformen und Beispiele.....              | 9  |
| 2.1.3 Der Stuttgarter Fahrsimulator .....       | 11 |
| 2.2 Fahrzeugsimulation.....                     | 13 |
| 2.2.1 Einsatz im Simulator .....                | 14 |
| 2.2.2 Simulation in Echtzeit.....               | 15 |
| 2.3 Bewegungswahrnehmung .....                  | 16 |
| 2.3.1 Das Gleichgewichtsorgan .....             | 18 |
| 2.3.2 Simulatorkrankheit.....                   | 20 |
| 2.3.3 Wahrnehmungsschwellen .....               | 21 |

---

|          |                                                                            |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4      | Grundlagen des Motion Cueing .....                                         | 22        |
| 2.4.1    | Begriffserklärung „Motion Cue“ .....                                       | 22        |
| 2.4.2    | Einteilung der Motion Cues .....                                           | 22        |
| 2.4.3    | Fehlende und falsche Motion Cues .....                                     | 23        |
| 2.4.4    | Washout .....                                                              | 24        |
| 2.4.5    | Tilt Coordination.....                                                     | 24        |
| 2.5      | Regelungstechnische Grundlagen .....                                       | 25        |
| 2.5.1    | Betrachtungen im Frequenzbereich.....                                      | 25        |
| 2.5.2    | Filter .....                                                               | 27        |
| 2.6      | Koordinatensysteme .....                                                   | 30        |
| 2.7      | Klassische Motion-Cueing-Algorithmen .....                                 | 34        |
| 2.7.1    | Der Classical-Washout-Algorithmus .....                                    | 34        |
| 2.7.2    | Weitere klassische Algorithmen .....                                       | 37        |
| 2.7.3    | Weiterführende Ansätze.....                                                | 39        |
| <b>3</b> | <b>Zielvorgaben und Anforderungen an die<br/>Bewegungssimulation .....</b> | <b>41</b> |
| 3.1      | Anwendungsfälle .....                                                      | 41        |
| 3.1.1    | Bewertung von Fahrzeugverhalten und<br>Fahrzeugentwicklung .....           | 42        |
| 3.1.2    | Bewertung von Fahrerverhalten und Interaktion .....                        | 43        |
| 3.2      | Einteilung der Zielvorgaben zur Lösung von Zielkonflikten.....             | 44        |
| <b>4</b> | <b>Analyse und Optimierung der Bewegungsplattform .....</b>                | <b>47</b> |
| 4.1      | Optimierung der Systemdynamik .....                                        | 47        |
| 4.1.1    | Verfahren zur Bestimmung des<br>Übertragungsverhaltens .....               | 48        |

---

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.2    | Einzelne Freiheitsgrade.....                                         | 55        |
| 4.1.3    | Mechanisch gekoppelte Freiheitsgrade .....                           | 58        |
| 4.1.4    | Erzieltes Übertragungsverhalten .....                                | 62        |
| 4.2      | Optimierung des Bewegungsraumes.....                                 | 69        |
| <b>5</b> | <b>Vorausschauender Motion-Cueing-Algorithmus .....</b>              | <b>73</b> |
| 5.1      | Verfügbare Daten und Potenziale durch deren Nutzung.....             | 73        |
| 5.1.1    | Fahrzeugzustand und Fahrereingaben.....                              | 75        |
| 5.1.2    | Position und Lage des Fahrzeuges in seiner direkten<br>Umgebung..... | 76        |
| 5.1.3    | Aktuelle und zukünftige Streckenattribute.....                       | 76        |
| 5.1.4    | Verwendete Eingänge für den Motion-Cueing-<br>Algorithmus .....      | 78        |
| 5.2      | Struktur des prädiktiven Algorithmus.....                            | 79        |
| 5.3      | Elemente zur Bewegungssimulation.....                                | 81        |
| 5.3.1    | Gieren.....                                                          | 82        |
| 5.3.2    | Längsdynamik.....                                                    | 84        |
| 5.3.3    | Querdynamik.....                                                     | 92        |
| 5.3.4    | Roll-, Nick- und Vertikalbewegungen .....                            | 95        |
| 5.4      | Vorausschau und Situationsanalyse .....                              | 96        |
| 5.5      | Randbedingungen .....                                                | 98        |
| 5.5.1    | Vorausschauhorizont.....                                             | 98        |
| 5.5.2    | Streckenerstellung.....                                              | 99        |
| 5.5.3    | Parametrierung.....                                                  | 100       |
| 5.6      | Struktur des gesamten Algorithmus zur Simulatorsteuerung.....        | 101       |

|          |                                                                     |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6</b> | <b>Analyse des vorausschauenden Motion-Cueing-Algorithmus .....</b> | <b>103</b> |
| 6.1      | Studienlayout .....                                                 | 104        |
| 6.1.1    | Probandenauswahl .....                                              | 104        |
| 6.1.2    | Fahraufgabe.....                                                    | 106        |
| 6.1.3    | Streckenbeschaffenheit .....                                        | 108        |
| 6.1.4    | Befragung und Datenerhebung .....                                   | 110        |
| 6.2      | Referenzalgorithmus .....                                           | 111        |
| 6.3      | Auswertung und Ergebnisse .....                                     | 113        |
| 6.3.1    | Objektive Kriterien .....                                           | 114        |
| 6.3.2    | Subjektive Kriterien .....                                          | 123        |
| 6.4      | Bewertung der Analyse .....                                         | 126        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                           | <b>129</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis.....</b>                                    | <b>133</b> |
|          | <b>Anhang .....</b>                                                 | <b>149</b> |