

Inhalt

Vorwort — VII

1 Einleitung — 1

- 1.1 Bedeutung und Einordnung — 1
- 1.2 Entwicklungsstand — 2
- 1.3 Ziele und Aufgaben — 5

2 Problemstellung aktiver Fahreingriffe — 9

- 2.1 Klassifikationsschema der menschlichen Fahraufgabe — 10
 - 2.1.1 Drei-Ebenen-Modell — 10
 - 2.1.2 Regelungstechnische Betrachtungsweise — 11
- 2.2 Begriffserläuterungen der Regelungstechnik und Robotik — 13
 - 2.2.1 Trajektorien- und Pfadplanung — 13
 - 2.2.2 Optimalsteuerung — 15
 - 2.2.3 Optimale und Modellprädiktive Regelung — 16
- 2.3 Aktorik und Stellgrößen — 17
 - 2.3.1 Lenkaktorik — 17
 - 2.3.2 Bremsaktorik — 22
 - 2.3.3 Antrieb — 24
- 2.4 Sensorik, Mess- und Schätzgrößen — 27
 - 2.4.1 Fahrzustandserfassung — 27
 - 2.4.2 Eigenlokalisierung — 30
 - 2.4.3 Fahrzeugumfeld-Modellierung und -Prädiktion — 34
- 2.5 Systemaktivierung — 37
 - 2.5.1 Zustände einer unvermeidlichen Kollision — 38
 - 2.5.2 Subjektive Kritikalitätsbewertung des Fahrers — 40
- 2.6 Bewertung — 41

3 Stabilität und Robustheit optimaler Fahrmanöver — 45

- 3.1 Manöverplanung als Optimalsteuerungsproblem — 46
 - 3.1.1 Mathematische Formulierung — 46
 - 3.1.2 Modellprädiktiver Regelkreis — 48
- 3.2 Realisierbarkeits- und Stabilitätsbetrachtungen — 49
 - 3.2.1 Beispiel modellprädiktiver Abstandsregeltempomat — 50
 - 3.2.2 Invariante Mengen — 53
 - 3.2.3 Lyapunov-Stabilität — 55
 - 3.2.4 MPC-Schema mit Garantien — 58
- 3.3 Robustheit durch unterlagerte Regelungen — 62
 - 3.3.1 Motivation unterlagerter Regelungen — 62

3.3.2	Nicht-asymptotische Folgeregelung — 64
3.3.3	Asymptotische Folgeregelung — 65
3.4	Neuer Algorithmus zur Gespannstabilisierung — 68
3.4.1	Nichtlineare Anhängerdynamik — 69
3.4.2	Zeittransformation — 70
3.4.3	Nichtlinearer Reglerentwurf — 71
3.4.4	Nulldynamik und Sollwertvorgaben — 72
3.4.5	Implementierung und Evaluation im Realversuch — 76
3.5	Bewertung — 78
4	Trajektorienoptimierung mittels Dynamischer Programmierung — 81
4.1	Optimalitätsprinzip und Rekursionsformel von Bellman — 81
4.2	Suchalgorithmen — 83
4.2.1	Wert-Iteration-Verfahren — 83
4.2.2	Dijkstra-Suche — 85
4.2.3	A*-Suche — 87
4.3	Fahrzeugspezifische Problemformulierungen — 91
4.3.1	Inverse Bewegungsprimitive — 91
4.3.2	Vorwärtssimulierte Bewegungsprimitive — 92
4.3.3	Systematische Ableitung von Heuristiken — 94
4.4	Bewertung — 96
5	Trajektorienoptimierung mit direkten Methoden — 97
5.1	Statische vs. dynamische Optimierung — 97
5.1.1	Problemformulierung statische Optimierung — 98
5.1.2	Grundsätzliche Vorgehensweise der direkten Methode — 99
5.2	Direkte Optimierungsverfahren — 99
5.2.1	Direkte Einfachschießverfahren — 99
5.2.2	Direkte Mehrfachschießverfahren — 100
5.2.3	Flachheitsbasierte Ausgangsparametrierung — 102
5.3	Fahrzeugspezifische Problemformulierungen — 104
5.3.1	Systembeschreibung — 104
5.3.2	Kostenfunktional — 104
5.3.3	Nebenbedingungen — 105
5.4	Neuer Algorithmus für den aktiven Fußgängerschutz — 106
5.4.1	Systemmodellierung — 107
5.4.2	Fahrphysikalische Restriktionen und Manöurvorgaben — 109
5.4.3	Implementierung und Evaluation — 113
5.5	Bewertung — 115
6	Trajektorienoptimierung mit indirekten Methoden — 117
6.1	Unbeschränkte Optimierungsprobleme — 118

6.1.1	Problemlösung mittels Variationsrechnung —	118
6.1.2	Hamilton-Gleichungen und Transversalitätsbedingungen —	120
6.1.3	Anwendung auf optimalen Spurwechsel —	122
6.2	Beschränkte Optimierungsprobleme —	126
6.2.1	Pontryagins Maximumprinzip —	126
6.2.2	Anwendungsbeispiel Doppelintegrator —	127
6.2.3	Zustandsabhängige Eingangsbeschränkungen —	129
6.2.4	Reine Zustandsbeschränkungen bei Notbremsung —	130
6.3	Lineare Systemdynamik mit quadratischem Kostenfunktional —	133
6.3.1	Problemformulierung —	133
6.3.2	Riccati-Differentialgleichung —	135
6.4	Neuer Riccati-basierter Ausweichalgorithmus —	136
6.4.1	Formulierung des Optimalsteuerungsproblems —	136
6.4.2	Lösung des Optimalsteuerungsproblems —	138
6.4.3	Rückwärtsintegration und Zeittransformation —	139
6.4.4	Zustandstransformation für unterlagerte Folgeregelung —	140
6.4.5	Implementierung und Evaluation im Realversuch —	142
6.5	Bewertung —	146
7	Empfehlungen für den Entwurf optimaler Fahreingriffe —	149
7.1	Kombination der Optimierungsmethoden —	149
7.2	Iterativer Funktionsentwurf —	150
7.3	Durchgängige Entwicklungstoolkette —	151
8	Zusammenfassung —	153
A	Herleitungen und Ausführungen —	157
A.1	Koordinatensysteme der lokalen und globalen Eigenlokalisierung —	157
A.2	Rekursive Lösbarkeit und Stabilität der MPC —	158
A.3	Herleitung der Anhängergierdynamik —	160
Abkürzungen und Notationen —		161
Abbildungsverzeichnis —		163
Literatur —		165
Im Rahmen der Arbeit entstandene Veröffentlichungen —		177
Stichwortverzeichnis —		179