

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	vii
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	3
<b>2. Stand der Forschung und Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Heutige und zukünftige Lenksysteme . . . . .	5
2.1.1 Funktionale Betrachtung von Lenksystemen . . . . .	5
2.1.1.1 Passive Lenksysteme . . . . .	6
2.1.1.2 Aktive Lenksysteme . . . . .	8
2.1.2 Energetische Betrachtung von Lenksystemen . . . . .	11
2.1.3 Zusammenfassung . . . . .	13
2.2 Der Fahrer als Regler . . . . .	14
2.2.1 Der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt . . . . .	15
2.2.2 Störungen des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug . . . . .	17
2.2.3 Informationsaufnahme und -verarbeitung durch den Fahrer . . . . .	20
2.2.4 Fahrer-Fahrzeugverhalten im Frequenzbereich . . . . .	21
2.3 Sicherheitsgerichtete Entwicklung mechatronischer Fahrwerkregelsysteme . .	24
2.3.1 Stand der Normung . . . . .	24
2.3.2 Entwicklungsmodelle und -prozesse . . . . .	28
2.3.2.1 Der Wandel vom Linien- zum V-Modell . . . . .	28
2.3.2.2 Beherrschbarkeit der Entwicklung von verteilten Systemen .	29
2.3.3 Funktionale Sicherheit aktiver fahrdynamischer Regelsysteme . . . . .	30
<b>3. Überlagerungslenkung</b>	<b>33</b>
3.1 Aufbau . . . . .	33
3.2 Funktionen . . . . .	35
3.2.1 Agilitätsfunktionen . . . . .	36
3.2.1.1 Variable Lenkübersetzung . . . . .	36
3.2.1.2 Vorhaltelenkung . . . . .	37
3.2.2 Stabilitätsfunktionen . . . . .	37
3.2.2.1 Gierratenregelung . . . . .	38
3.2.2.2 Gierrmomentenkompensation . . . . .	39
3.2.3 Fahrerassistenzfunktionen . . . . .	40
<b>4. Empirische Untersuchung von Lenksystemstörungen aus Fahrersicht</b>	<b>41</b>
4.1 Hypothesen . . . . .	41
4.2 Versuchsdesign . . . . .	42
4.2.1 Versuchsablauf . . . . .	42

4.2.2	Versuchsträger und Messaufbau . . . . .	43
4.2.3	Fehlerbilder und Testszenarien . . . . .	45
4.2.3.1	Untersuchte Stellfehler . . . . .	45
4.2.3.2	Testszenarien . . . . .	45
4.2.4	Stichprobe . . . . .	46
4.2.5	Bewertungskriterien . . . . .	48
4.2.5.1	Subjektive Kriterien . . . . .	49
4.2.5.2	Objektive Kriterien . . . . .	50
4.3	Versuchsdurchführung . . . . .	51
4.3.1	Lenksystemstörungen im Normalfahrbereich . . . . .	51
4.3.1.1	Geradeausfahrt . . . . .	51
4.3.1.2	Kurvenfahrt . . . . .	52
4.3.2	Lenksystemstörungen während der Fahrdynamikregelung . . . . .	52
4.3.2.1	Bremsen $\mu$ -split . . . . .	53
4.3.2.2	Untersteuernde Kurvenfahrt . . . . .	55
4.3.2.3	ISO Spurwechsel . . . . .	58
4.3.2.4	ABS Bremsung . . . . .	59
4.4	Versuchsauswertung und -ergebnisse . . . . .	60
4.4.1	Auswertungsstrategie . . . . .	61
4.4.2	Normalfahrbereich . . . . .	62
4.4.2.1	Geradeausfahrt . . . . .	62
4.4.2.2	Kurvenfahrt . . . . .	72
4.4.2.3	Ermittlung objektiver Grenzwerte . . . . .	74
4.4.3	Bereich der Fahrdynamikregelung . . . . .	78
4.4.3.1	Bremsen $\mu$ -split . . . . .	78
4.4.3.2	Untersteuernde Kurvenfahrt . . . . .	81
4.4.3.3	ISO - Spurwechsel . . . . .	83
4.4.3.4	ABS Bremsung auf $\mu_{high}$ . . . . .	86
4.4.3.5	Ermittlung objektiver Grenzwerte . . . . .	87
4.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse . . . . .	87
<b>5.</b>	<b>Analyse und Prädiktion der Fahrerurteile</b>	<b>91</b>
5.1	Problemstellung . . . . .	91
5.2	Ansatz . . . . .	91
5.3	Theorie der Klassifikationsmethoden . . . . .	92
5.3.1	Prinzip der Klassifikation . . . . .	92
5.3.2	Classification und Regression Trees – CART . . . . .	93
5.3.2.1	Splitting . . . . .	94
5.3.2.2	Pruning . . . . .	95
5.3.3	Random Forest RF . . . . .	96
5.3.4	Feature Importance . . . . .	96
5.3.5	OOB-Fehler . . . . .	97
5.4	Analyse und Prädiktion der Fahrerurteile durch Random Forest . . . . .	98
5.4.1	Implementierung des Random Forest-Algorithmus . . . . .	98
5.4.1.1	Merkmalsextraktion subjektiver und objektiver Daten . . . . .	98
5.4.1.2	Beschreibung der Datensätze . . . . .	101

5.4.2	Klassifikationsszenarien . . . . .	101
5.4.2.1	Szenario 1 - Ermittlung der Feature Importance . . . . .	101
5.4.2.2	Szenario 2 - Training des Random Forest . . . . .	102
5.4.2.3	Szenario 3 - Validierung und Bewertung des Random Forest . . . . .	102
5.4.3	Klassifikationsergebnisse . . . . .	103
5.4.3.1	Szenario 1 - Feature Importance und Selection . . . . .	103
5.4.3.2	Validierung des Random Forest . . . . .	106
5.4.3.3	Ansatz zur Absicherung von Lenksystemstörungen . . . . .	107
5.5	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	110
<b>6.</b>	<b>Modellbasierte Anforderungsanalyse durch stochastische Fahrdynamiksimu-</b>	<b>111</b>
	<b>lation</b>	
6.1	Problemstellung . . . . .	111
6.2	Ansatz . . . . .	113
6.3	Grundlagen stochastischer Simulationen . . . . .	114
6.4	Simulationsumgebung . . . . .	115
6.4.1	Erweitertes Einspurmodell . . . . .	116
6.4.1.1	Querndynamik . . . . .	116
6.4.1.2	Längsdynamik . . . . .	122
6.4.1.3	Überlagerungslenksystem . . . . .	122
6.4.2	Signalverarbeitung . . . . .	123
6.4.2.1	Signaldatenaufbereitung . . . . .	123
6.4.2.2	Signaldatenmanipulation . . . . .	124
6.4.3	Lenkungsregler . . . . .	125
6.4.4	Validierung des Fahrzeugmodells . . . . .	126
6.4.4.1	Stationäre Kreisfahrt . . . . .	126
6.4.4.2	Lenkwinkelsprung . . . . .	129
6.4.4.3	Frequenzganganalyse . . . . .	130
6.4.4.4	ISO-Spurwechsel . . . . .	132
6.5	Simulationssetup . . . . .	134
6.5.1	Simulationsszenarien . . . . .	134
6.5.2	Bewertungskriterium . . . . .	135
6.5.3	Beschreibung der Datensätze . . . . .	136
6.5.4	Klassifikationsszenarien . . . . .	136
6.5.4.1	Szenario 1 - Ermittlung der Feature Importance . . . . .	136
6.5.4.2	Szenario 2 - Klassifikation von Sensorfehlerbildern . . . . .	136
6.6	Simulations- und Klassifikationsergebnisse . . . . .	137
6.6.1	Szenario 1 - Feature Importance . . . . .	137
6.6.2	Szenario 2 - Klassifikation von Sensorfehlerbildern . . . . .	139
<b>7.</b>	<b>Anwendung der Ergebnisse</b>	<b>143</b>
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>145</b>

<b>Anhang</b>	<b>147</b>
A1 Messlenkrad CAETEL . . . . .	147
A2 Fragebogen . . . . .	148