

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Fahrsimulatoren . . . . .	6
2.1.1 Anwendungsgebiete . . . . .	7
2.1.2 Bestandteile der Simulationsumgebung . . . . .	8
2.1.3 Fahrsimulatoren ohne Bewegungssystem . . . . .	9
2.1.4 Fahrsimulatoren mit Bewegungssystem . . . . .	10
2.1.5 Übersicht über realisierte Fahrsimulatoren mit Bewegungssystem . . . . .	12
2.1.6 Der Stuttgarter Fahrsimulator . . . . .	13
2.2 Antriebsstrangprüfstände . . . . .	15
2.2.1 Allgemeines zu Antriebsstrangprüfständen . . . . .	15
2.2.2 Der Antriebsstrang- und Hybridprüfstand . . . . .	17
2.3 Kopplung von Fahrsimulator und Antriebsstrangprüfstand . . . . .	20
2.4 Messfahrzeuge . . . . .	20
2.4.1 Unterschiede zu Prüfstandsversuchen . . . . .	21
2.4.2 Einteilung . . . . .	22
2.4.3 Einsatzbereiche . . . . .	22
2.4.4 Messtechnik . . . . .	23
<b>3 Kopplung von Fahrsimulator und Antriebsstrangprüfstand</b>	<b>25</b>
3.1 Simulationsebene . . . . .	25
3.1.1 Fahrdynamikmodell . . . . .	25
3.1.2 Reifenmodell . . . . .	29
3.2 Technikebene . . . . .	31

3.2.1	Datenübertragung zwischen Simulator und Prüfstand . . . . .	31
3.2.2	Mechanischer Aufbau am Prüfstand . . . . .	33
3.3	Regelungstechnik . . . . .	34
3.3.1	Übertragungsglieder und Stabilitätskriterien des Regelkreises	34
3.3.2	Drehzahlregelung der angetriebenen Räder . . . . .	38
3.3.3	Regelkreis für die Fahrradpedalposition . . . . .	43
3.3.4	Sonstige regelungstechnische Zusammenhänge . . . . .	45
3.4	Durchführung von Fahrten im Koppelbetrieb . . . . .	45
3.5	Weitere Anwendungsmöglichkeiten der Kopplung . . . . .	48
3.5.1	Untersuchungen zur funktionalen Sicherheit elektrischer Antriebsstränge . . . . .	49
3.5.2	Untersuchungen zum Energieverbrauch im kundenrelevanten Fahrbetrieb . . . . .	49
3.5.3	Untersuchungen zum Schwingungsverhalten des Antriebsstrangs . . . . .	51
3.5.4	Verlagerung der Antriebsapplikation von der Teststrecke in den Fahrsimulator . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Gewinnung von Messdaten zur Modellerstellung</b>	<b>55</b>
4.1	Datenaufzeichnung an Fahrsimulator und Prüfstand . . . . .	55
4.1.1	Messtechnik . . . . .	56
4.1.2	Einsatzprofile . . . . .	56
4.2	Messungen mit Realfahrzeugen . . . . .	57
4.2.1	Messtechnik . . . . .	57
4.2.2	Einsatzprofile . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Verfahren zur Schätzung von Modellparametern</b>	<b>63</b>
5.1	Vergleich zwischen Modell und Prozess . . . . .	63
5.2	Klassifizierung der Verfahren . . . . .	64
5.3	Einige gängige Verfahren im Überblick . . . . .	66
5.4	Methode der kleinsten Fehlerquadrate . . . . .	68
5.5	Künstliche neuronale Netze . . . . .	69
5.5.1	Einführung . . . . .	70
5.5.2	Training künstlicher neuronaler Netze . . . . .	73
5.5.3	Trainingsalgorithmen . . . . .	77
5.5.4	Anwendung bei nicht vollständiger Abdeckung des Zustandsraums durch den Trainingsdatensatz . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Erstellung von Antriebsstrangmodellen aus Messdaten</b>	<b>85</b>

6.1	Erstellung eines Antriebsstrangmodells anhand von Simulatorfahrten mit realem Antriebsstrang . . . . .	86
6.2	Antrieb eines Elektrofahrzeugs mit PMSM . . . . .	98
6.2.1	Modellierung des elektrischen Stroms auf der Gleichstromseite der Leistungselektronik . . . . .	101
6.2.2	Modellierung des Antriebsmomentes an den Radnaben . .	111
6.3	Batteriemodell . . . . .	114
6.4	Exkurs: Ermittlung der Parameter der Fahrdynamikgleichung anhand realer Messfahrten . . . . .	116
6.4.1	Parameterschätzung unter idealen Bedingungen . . . . .	118
6.4.2	Parameterschätzung unter Einschränkungen . . . . .	119
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>123</b>
	<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>125</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>