



INHALTSVERZEICHNIS

NOTATION	VII
Lateinische Symbole	VII
Griechische Symbole	IX
Indizes	X
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	XI
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation	1
1.1.1 Ausgangssituation	1
1.1.2 Wechselwirkungen zwischen ABS und Rekuperation	3
1.1.3 Wechselwirkungen zwischen ABS und Antriebstopologie	5
1.2 Stand der Technik	6
1.2.1 Dynamik des rollenden Rads	6
1.2.2 Grundlagen des ABS	6
1.2.3 Entwicklungsgeschichte des ABS	7
1.2.4 Die ABS-Logik nach Burckhardt	8
1.2.5 Der kontinuierliche ABS-Regler als Bestandteil der Fahrdynamikregelung	8
1.2.6 Weitere ABS-Algorithmen	9
1.2.7 Dynamik hydraulischer Antiblockiersysteme	10
1.2.8 Einbindung elektrischer Antriebe in die ABS-Regelung	11
1.3 Zielsetzung der Arbeit	13
1.3.1 Kombinierte ABS-Regelung mit zwei Aktoren	13
1.3.2 Dämpfung von Antriebsstrangschwingungen während der ABS-Regelung	15
1.3.3 Umfang der Arbeit	16
2 ENTWICKLUNGSUMGEBUNG UND METHODIK	17
2.1 Bestandteile der Entwicklungsumgebung	17
2.1.1 Übersicht	17
2.1.2 SiL-Umgebung	18
2.1.3 Grafische Programmierung	18
2.1.4 Umsetzung im Versuchsfahrzeug	19
2.2 Aufbau der Arbeit	19
2.3 Versuchsfahrzeug	21
2.3.1 Basisfahrzeug und ESP	21
2.3.2 Elektrischer Antrieb an der Hinterachse	22
2.3.3 Sensoren und Messtechnik	24
2.3.4 Vernetzungsarchitektur	26
2.4 Simulationsmodell	28
2.4.1 Grundlagen	28



2.4.2	Fahrwerk.....	29
2.4.3	Reifen und Fahrbahn	31
2.4.4	Verbrennungsmotorischer Antriebsstrang	33
2.4.5	Antriebsstrang an der Hinterachse	34
2.4.6	Karosserie	35
2.4.7	Bremssystem und ESP	36
2.4.8	Simulation einer ABS-Bremung	37
3	MODELLBILDUNG UND LINEARISIERUNG DES ANTRIEBSSTRANGS	40
3.1	Grundlagen	40
3.1.1	Stand der Technik.....	40
3.1.2	Aufbau des Antriebsstrangs	40
3.1.3	Diskrete Beschreibung mechanischer Systeme	41
3.1.4	Vereinfachungen	42
3.2	Übertragungsverhalten der E-Maschine	42
3.3	Planetengetriebe und Lagerung	44
3.3.1	Grundlagen	44
3.3.2	Instationäre Bewegungsgleichungen des Planetengetriebes	45
3.3.3	Modellierung der Statorlagerung.....	46
3.4	Seitenwelle und Trägheitsmomente auf der Radseite.....	47
3.4.1	Steifigkeit und Materialdämpfung der Seitenwelle	47
3.4.2	Trägheitsmomente auf der Radseite.....	47
3.5	Reifen.....	48
3.5.1	Modellierung des rotatorischen Reifengürtelfreiheitsgrads	48
3.5.2	Modellierung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts	48
3.6	Gesamtfahrzeugbewegung	52
3.7	Zustandsraumdarstellung des Antriebsstrangs.....	53
4	ANALYSE DES ANTRIEBSSTRANGS	55
4.1	Vorgehen	55
4.2	Fahrzeugmessungen.....	56
4.2.1	ABS-Bremung.....	56
4.2.2	Sprungantwort	58
4.2.3	Interpretation.....	59
4.3	Simulative Untersuchungen	59
4.3.1	ABS-Bremung.....	59
4.3.2	Sprungantwort	61
4.3.3	Interpretation.....	61
4.3.4	Amplitudenverstärkung bei harmonischer Anregung.....	62
4.3.5	Klassifizierung der Schwingungsphänomene	65
4.4	Analyse des linearisierten Systems	65
4.4.1	Dämpfung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts in den Arbeitspunkten.....	65
4.4.2	Amplitudenverstärkung bei harmonischer Anregung.....	66
4.4.3	Interpretation und Festlegung des ABS-Arbeitspunkts	67



5	REGLERENTWURF	70
5.1	Stand der Technik	70
5.2	Zustandsrückführung zur Schwingungsdämpfung	71
5.2.1	Zielsetzung.....	71
5.2.2	Berücksichtigung der Statorbewegung auf dem Sensorsignal.....	72
5.2.3	Wahl der Rückführparameter	73
5.3	Erweiterung um einen zusätzlichen Stellgrößeneingang	75
5.3.1	Zielsetzung.....	75
5.3.2	Erweitertes Zustandsraummodell und Regelgesetz	76
5.4	Modellgestützte Führungsgrößenaufschaltung	77
5.4.1	Zielsetzung.....	77
5.4.2	Umsetzung.....	78
5.5	Synthese	80
5.5.1	Struktur.....	80
5.5.2	Darstellung als dynamische Zustandsrückführung	81
5.5.3	Zustandsraumdarstellung.....	83
5.5.4	Bodediagramm des geschlossenen Kreises.....	84
5.5.5	Sprungantwort des geschlossenen Kreises	85
5.5.6	Robustheit und Stabilität.....	87
6	CONTROL ALLOCATION	89
6.1	Grundlagen und Stand der Technik.....	89
6.2	Control Allocation und ABS-Regelung	91
6.3	Entwurf eines regelbasierten Control Allocator.....	92
6.4	Funktion zur Anpassung des Rekuperationsniveaus	93
6.5	Bremmung in den Stillstand	95
7	VALIDIERUNG IM FAHRVERSUCH	96
7.1	Implementierung.....	96
7.1.1	Zeitdiskrete Umsetzung des Reglers	96
7.1.2	Interrupt-gesteuerte Ausführung des Reglers	98
7.2	Sprunganregung	99
7.3	ABS-Bremmung ohne Control Allocation.....	101
7.3.1	Vorgehen	101
7.3.2	Stochastische Ausprägung der Antriebsstrangschwingungen	102
7.3.3	Bremmung auf trockenem Asphalt.....	103
7.3.4	Bremmung auf nassem Asphalt	107
7.3.5	Wechselwirkung zwischen ABS-Regelung und Antriebsstrangschwingungen	111
7.4	Schwingungsdämpfung mit Control Allocation	113
7.4.1	Manöverablauf	113
7.4.2	Raddrehzahlverlauf	113
7.4.3	Aufteilung des Bremsmoments durch den Control Allocator	114
7.4.4	Überlagerte Schwingungsdämpfung.....	115



8	DISKUSSION UND AUSBLICK	117
8.1	Bremsweg, Bremsstabilität und Reproduzierbarkeit	117
8.2	Optimierung der ABS-Regelung.....	118
8.3	Energiebilanz der Schwingungsdämpfung	118
8.4	Grenzgeschwindigkeit der Schwingungsdämpfung	119
8.5	Auslegung des Control Allocator bei steifen Antriebssträngen	119
8.6	Ausblick.....	120
8.6.1	Anwendung des Control Allocator auf andere Fahrdynamik-Regelssysteme ...	120
8.6.2	Anwendung der Schwingungsdämpfung auf Antriebsrucken und ASR	121
8.6.3	Seriennahe Vernetzungsarchitektur	121
9	ZUSAMMENFASSUNG	123
	ANHANG	I
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	XIX
	TABELLENVERZEICHNIS	XXI
	LITERATURVERZEICHNIS.....	XXII
	VORVERÖFFENTLICHUNGEN.....	XXVIII