



Martin Rosenberger (Autor)
**Regelung radnaher elektrischer Einzelradantriebe
während der ABS-Bremmung**

Herausgeber: Prof. Dr. Kai Peter Birke

ENERGIE & NACHHALTIGKEIT
Elektromobilität & Batterietechnologie

Martin Rosenberger

**Regelung radnaher elektrischer
Einzelradantriebe während der ABS-Bremmung**

Elektrische
Energiespeichersysteme



Nachhaltige
CO₂-Kreisläufe



Elektromobilität &
Batterietechnologie



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8873>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

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 Antriebsstopologie	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	Bremung 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-Bremung ohne Control Allocation.....	101
7.3.1	Vorgehen	101
7.3.2	Stochastische Ausprägung der Antriebsstrangschwingungen	102
7.3.3	Bremung auf trockenem Asphalt.....	103
7.3.4	Bremung 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-Regelsysteme ...	120
8.6.2	Anwendung der Schwingungsdämpfung auf Antriebsruckeln und ASR	121
8.6.3	Seriennahe Vernetzungsarchitektur	121
9	ZUSAMMENFASSUNG	123
	ANHANG	I
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	XIX
	TABELLENVERZEICHNIS	XXI
	LITERATURVERZEICHNIS.....	XXII
	VORVERÖFFENTLICHUNGEN.....	XXVIII