



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  
CO<sub>2</sub>-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](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>NOTATION .....</b>	<b>VII</b>
Lateinische Symbole .....	VII
Griechische Symbole .....	IX
Indizes .....	X
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>XI</b>
<b>1    EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
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
<b>2    ENTWICKLUNGSUMGEBUNG UND METHODIK .....</b>	<b>17</b>
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
<b>3</b>	<b>MODELLBILDUNG UND LINEARISIERUNG DES ANTRIEBSSTRANGS.....</b>	<b>40</b>
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
<b>4</b>	<b>ANALYSE DES ANTRIEBSSTRANGS.....</b>	<b>55</b>
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

<b>5</b>	<b>REGLERENTWURF .....</b>	<b>70</b>
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
<b>6</b>	<b>CONTROL ALLOCATION .....</b>	<b>89</b>
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
<b>7</b>	<b>VALIDIERUNG IM FAHRVERSUCH .....</b>	<b>96</b>
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

<b>8</b>	<b>DISKUSSION UND AUSBLICK .....</b>	<b>117</b>
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
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>123</b>
	<b>ANHANG .....</b>	<b>I</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>XIX</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>XXI</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>XXII</b>
	<b>VORVERÖFFENTLICHUNGEN.....</b>	<b>XXVIII</b>