Gang- und Moduswechsel in elektrischen und hybrid-elektrischen Antriebssträngen mit aktiv synchronisierten Klauenkupplungen

Autor: Ruben König
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

iMS

Gang- und Moduswechsel in elektrischen und hybrid-elektrischen Antriebssträngen mit aktiv synchronisierten Klauenkupplungen

Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau
Technische Universität Darmstadt

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Am Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Ruben König, M.Sc.

aus Heidelberg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Tag der Einreichung:	25.07.18
Tag der mündlichen Prüfung:	31.10.18

Darmstadt 2018
D17

Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau

Ruben König

Gang- und Moduswechsel in elektrischen und hybrid-elektrischen Antriebssträngen mit aktiv synchronisierten Klauenkupplungen

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6731-6
ISSN 2198-8536

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

KURZFASSUNG

Die Suche nach dem optimalen Antriebsstrang für Hybrid- und Elektrofahrzeuge führt zu neuartigen Getriebekonzepten, deren mechanische Komplexität im Vergleich zu aktuellen automatischen Getrieben deutlich reduziert ist. Dies wird möglich, indem Funktionen, die bisher vom Getriebe bereitgestellt wurden, durch funktionale Integration von den E-Maschinen übernommen werden. Unter anderem können somit Synchronisierungen durch kleinere, kostengünstigere und effizientere Klauenkupplungen ersetzt werden. Um diese sicher und komfortabel schalten zu können, wird die Differenzdrehzahl an einer Klauenkupplung mithilfe der E-Maschinen aktiv synchronisiert.

In dieser Arbeit werden Gang- und Moduswechsel mit Klauenkupplungen am Beispiel des parallel-seriellen Hybrid-Antriebsstrangs *DE-REX* im Detail untersucht. Schaltvorgänge in Antriebssträngen dieser Art bestehen aus Phasen der Drehmomentkoordination, aktiver Synchronisierung und dem Einrücken von Klauenkupplungen. Für jede dieser Phasen werden Konzepte zum Regler- und Steuerungsentwurf vorgeschlagen und deren Wirksamkeit anhand von Prüfstands- und Fahrzeugmessungen analysiert. Mithilfe des objektiven Komfort-Kriteriums Vibration Dose Value wird der Einfluss der einzelnen Phasen auf die Gesamtbewertung eines Schaltvorgangs eingeordnet.

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen fließen in die Funktionsentwicklung der Antriebsstrangsteuerung für den *DE-REX* Antrieb ein. Am Ende dieser Arbeit werden Messungen von Schaltvorgängen, die mit dem *DE-REX* Versuchsfahrzeug durchgeführt wurden, präsentiert und diskutiert. Bei den elektrischen Gangwechseln wird ein Schwerpunkt auf die Einordnung der Schaltqualität im Vergleich zu konventionellen automatischen Getrieben gelegt. Es wird gezeigt, dass die Schaltqualität der elektrischen Gangwechsel im *DE-REX* Versuchsfahrzeug, von Teillastschaltungen bis hin zu Volllastschaltungen, auf dem Niveau heutiger Automat- und Doppelkupplungsgetriebe liegt. Die Messungen von Gang- und Moduswechseln mit Verbrennungsmotor bestätigen die hohe Schaltqualität auch im hybriden Betrieb.

Zuletzt werden Möglichkeiten zur weiteren Optimierung der Schaltabläufe im *DE-REX* Antriebsstrang vorgeschlagen und teilweise umgesetzt. Diese bewirken eine Verkürzung der Schaltzeiten und eine weitere Erhöhung des Schaltkomforts. Sowohl diese Maßnahmen als auch die Untersuchung der einzelnen Schaltphasen sind nicht auf die Anwendung im *DE-REX* Antriebsstrang beschränkt, sondern lassen sich auf andere, elektrische und hybride Antriebsstränge mit Klauenkupplungen übertragen.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG ..... **III**

INHALTSVERZEICHNIS ..... **IV**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... **VIII**

TABELLENVERZEICHNIS ..... **XIV**

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ..... **XV**

SYMBOLVERZEICHNIS ..... **XVII**

1 EINFÜHRUNG **1**

1.1 EINLEITUNG UND MOTIVATION 1
1.2 STRUKTUR DER ARBEIT 3

2 STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG **5**

2.1 HYBRID-ELEKTRISCHER FAHRZEUGANTRIEBSSTRANG 5
2.1.1 DE-REX 11
2.2 ELEKTRISCHER FAHRZEUGANTRIEBSSTRANG 13
2.2.1 Speed2E 15
2.3 SYNCHRONISIERUNGSEINRICHTUNGEN 16
2.3.1 Reibsynchronisierung 17
2.3.2 Zentralsynchronisierung 18
2.3.3 Aktive Synchronisierung durch Antriebsmaschinen 19
2.4 SCHALTVORGÄNGE 20
2.4.1 Klassifizierung von Schaltvorgängen 20
2.4.2 Antriebsstrangschwingungen bei Schaltvorgängen 22
2.4.3 Bewertung von Schaltvorgängen 24

3 PRÜFSTÄNDE UND VERSUCHSFAHRZEUG **30**

3.1 SCHALTAKTORIKPRÜFSTAND 30
3.2 SPEED2E PRÜFSTAND 33

3.3 DE-REX PRÜFSTAND 35
3.4 DE-REX VERSUCHSFAHRZEUG 37

4 MODELLBILDUNG UND –VALIDIERUNG 39

4.1 ZIELSETZUNG DER MODELLBILDUNG 39
4.2 STRUKTUR VON SIMULATIONSMODELL UND FUNKTIONSSOFTWARE 39
4.3 ANTRIEBSSTRANG 40
4.4 SCHALTAKTORIK UND KLAUENKUPPLUNG 44
4.4.1 Validierung mithilfe des Schaltaktorikprüfstands 47
4.5 FAHRZEUG 51
4.6 VALIDIERUNG DES GESAMTMODELLS 52

5 DE-REX GANG- UND MODUSWECHSEL 55

5.1 ELEKTRISCHE UND HYBRIDE FAHRMODI 55
5.2 ABLÄUFE DER GANG- UND MODUSWECHSEL 56
5.3 VORSTELLUNG AUSGEWÄHLTER GANG- UND MODUSWECHSEL 60
5.4 AUFBAU DER FUNKTIONSSOFTWARE 68

6 DREHMOMENTKOORDINATION 69

6.1 LITERATURÜBERBLICK ZUR DREHMOMENTKOORDINATION 70
6.2 UMSETZUNG DER DREHMOMENTKOORDINATION 74
6.2.1 Rampenförmige Drehmomentsteuerung 74
6.2.2 Drehmomentsteuerung mit PT1-Glied 76
6.3 REIN ELEKTRISCHE DREHMOMENTKOORDINATION 77
6.3.1 Achsmomentneutrale elektrische Drehmomentkoordination 77
6.3.2 Achsmomentveränderliche elektrische Drehmomentkoordination 82
6.4 HYBRIDE DREHMOMENTKOORDINATION 90
6.4.1 Achsmomentneutrale hybride Drehmomentkoordination 91
6.5 DISKUSSION DER TEILERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN 93

7 AKTIVE SYNCHRONISIERUNG 95

7.1 LITERATURÜBERBLICK ZUR AKTIVEN SYNCHRONISIERUNG 97
7.2 REIN ELEKTRISCHE SYNCHRONISIERUNG 99
7.2.1 Reglerentwurf 100
7.2.2 Messergebnisse zur elektrischen Synchronisierung 106
7.3 HYBRIDES SYNCHRONISIEREN 109

7.3.1 Vergleich unterschiedlicher Regelungsstrategien 110
7.3.2 Reglerentwurf 113
7.3.3 Messergebnisse zur hybriden aktiven Synchronisierung 118
7.4 DIFFERENZWINKELREGELUNG 121
7.4.1 Module der Differenzwinkelregelung 121
7.4.2 Regelkreis 128
7.4.3 Messergebnisse zur Differenzwinkelregelung 131
7.5 DISKUSSION DER TEILERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN 133

8 EINRÜCKEN EINER KLAUENKUPPLUNG 134

8.1 VERGLEICH VON FLACHEN UND SPITZEN KLAUENKUPPLUNGEN 134
8.2 LITERATURÜBERBLICK ZU EINRÜCKSTRATEGIEN 137
8.3 REGELUNG DER SCHALTWALZENAKTORIK 140
8.4 EINRÜCKEN MIT FLACHEN DÄCHERN AM BEISPIEL SPEED2E 143
8.4.1 Analytisches Modell der Einrückwahrscheinlichkeit 145
8.4.2 Analyse ausgewählter Einrückversuche 150
8.4.3 Auswertung der Einrückversuche 153
8.4.4 Strategien zum Auflösen von Klaue-auf-Klaue Stellungen 157
8.5 EINRÜCKEN MIT SPITZEN DÄCHERN AM BEISPIEL DE-REX 162
8.5.1 Auswertung der Referenz-Einrückversuche 163
8.5.2 Untersuchung zum Einfluss der Einrückstrategie 167
8.5.3 Untersuchung zum Einfluss der Einrückgeschwindigkeit 168
8.5.4 Untersuchung zum Einfluss der Absolutdrehzahl 169
8.6 DISKUSSION DER TEILERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN 171

9 SCHALTVORGÄNGE IM DE-REX VERSUCHSFAHRZEUG 173

9.1 ELEKTRISCHE MODUSWECHSEL 173
9.1.1 Teillast-Zug-Hochschaltungen (E1C11 → E1C22) 174
9.1.2 Zustart einer EM nach Kick-down (E1C11 → E2C11C21) 176
9.1.3 Volllastschaltungen mit beiden E-Motoren (E2C11C21 → E2C12C21 und E2C12C21 → E2C12C22) 179
9.1.4 Bewertung des Schaltkomforts elektrischer Hochschaltungen 181
9.2 HYBRIDE MODUSWECHSEL 185
9.2.1 Zustart des Verbrennungsmotors in einen parallelen Hybridmodus (E1C11 → P2C11C21) 185
9.2.2 Zug-Hochschaltung im parallelen Hybridmodus (P2C11C21 → P2C11C22) ... 187

9.2.3 Wechsel von seriellem zu parallelem Hybridmodus, ausgelöst durch einen Kick-down (SC11 -> P2C11C21) 188
9.3 OPTIMIERUNG DER SCHALTABLAUFSTEUERUNG 190
9.3.1 Parallelisierung von Phasen 191
9.3.2 Virtuelle Doppelkupplung 192

10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 197

ANHANG A 201

A.1 UMSETZUNG DES SIMULATIONSMODELLS IN *SIMULATIONX* 201
A.2 VOLLSTÄNDIGE LISTE DER ABLÄUFE DER DE-REX SCHALTVORGÄNGE 202
A.3 HERLEITUNG DER FORMEL ZUR BERECHNUNG DER EINRÜCKWAHRSCHEINLICHKEIT 204
A.4 MESSUNG EINER PARALLELISIERTEN ELEKTRISCHEN ZUG-HOCHSCHALTUNG 206

LITERATURVERZEICHNIS 207

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Darstellung der Struktur der Arbeit 4
Abbildung 2: Klassifizierung von Hybridantrieben nach der Antriebsstrangtopologie 6
Abbildung 3: Unterscheidung von Parallel-Hybriden anhand der Position der E-Maschine [4] 7
Abbildung 4: Grundidee und schematische Getriebeskizze des *Two-Drive-Transmissions, nach* [48] 11
Abbildung 5: *DE-REX* Getriebeskizze (links) und CAD-Ansicht des konstruierten Radsatzes (rechts) 12
Abbildung 6: Elektrische Antriebsstrangkonfigurationen inklusive P4-Hybride mit elektrischem Achsantrieb [55] 14
Abbildung 7: Getriebestrichskizze des *Speed2E* Antriebsstrangs (links) und CAD-Darstellung des umgesetzten Radsatzes (rechts). 16
Abbildung 8: Aufbau einer Einkonus-Synchronisierung, nach [22] 18
Abbildung 9: Funktionsweise einer Zentralsynchronisierung [22] 19
Abbildung 10: Aufbau einer Klauenkupplung mit flachen Klauen 20
Abbildung 11: Beschleunigungsverläufe während Schaltvorgängen mit unterschiedlichen Getriebetypen 22
Abbildung 12: Unterteilung von Lastwechsel-Schwingungsphänomenen anhand ihrer Frequenzen sowie die menschliche Empfindlichkeit für spürbare Schwingungen über der Frequenz nach VDI2057. Abbildung aus [86]. 23
Abbildung 13: Ungefesselter Zweimassenschwinger als Modell zur Abbildung von komfortrelevanten Antriebsstrangschwingungen. 24
Abbildung 14: Ausführungsvarianten der ATZ-Notenskala zur subjektiven Bewertung von Schaltvorgängen und anderen komfortrelevanten Fahrmanövern. Oben nach [94], unten nach [22] 25
Abbildung 15: Links: Schematischer Aufbau des Schaltaktorikprüfstands, rechts: CAD-Modell des Prüfstands 32
Abbildung 16: Foto des Schaltaktorikprüfstands im *IMS*-Labor 32
Abbildung 17: Schematischer Aufbau und Vernetzung des Speed2E Prüfstands 34
Abbildung 18: Foto des *Speed2E* Antriebsstrangprüfstands in Garching an der *FZG, TU München* 34
Abbildung 19: Schematischer Aufbau und Vernetzung des *DE-REX* Prüfstands 36
Abbildung 20: Foto des *DE-REX* Antriebsstrangprüfstands in Darmstadt am *VKM*, *TU Darmstadt* 36
Abbildung 21: Schematischer Aufbau und Vernetzungsplan des *DE-REX* Fahrzeugs 38

Abbildung 22: *DE-REX* Versuchsfahrzeug auf dem *August-Euler-Flugplatz* in Griesheim 38
Abbildung 23: Struktur des *DE-REX* Gesamtmodells 40
Abbildung 24: Mechanische Struktur des *DE-REX* Antriebsstrangmodells 43
Abbildung 25: Aufbau der elektromechanischen Schaltaktorik am Beispiel der *DE-REX* Schaltaktorik in TG1. Bis auf die Schaltelemente und geringfügige Unterschiede an Schaltwalze und -gabel ist die Schaltaktorik im *Speed2E* Getriebe identisch. 44
Abbildung 26: Kontaktmodell der Klauendächer, nach [121] 46
Abbildung 27: Unterscheidung von Auftreffsituationen spitzer Klauenkupplungen 48
Abbildung 28: Mess- und Simulationsergebnisse von Einrückversuchen mit spitzen Klauenkupplungen. Auftreffsituation: Klaue-in-Lücke. 49
Abbildung 29: Mess- und Simulationsergebnisse von Einrückversuchen mit spitzen Klauenkupplungen. Auftreffsituation: Dachstoß 50
Abbildung 30: Mess- und Simulationsergebnisse von Einrückversuchen mit spitzen Klauenkupplungen. Auftreffsituation: Dachabgleiten 51
Abbildung 31: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen eines Tip-In- und Back-Out-Manövers. Die Messung wurde im *DE-REX* Versuchsfahrzeug aufgezeichnet. 53
Abbildung 32: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen einer elektrischen Zug-Hochschaltung 90 % Fahrpedalstellung. Die Messung wurde im *DE-REX* Versuchsfahrzeug aufgezeichnet. 54
Abbildung 33: Schematische Darstellung einer Zug-Hochschaltung im elektrischen Modus bei moderater Beschleunigung (E1C11 → E1C22) 61
Abbildung 34: Schematische Darstellung einer Zug-Hochschaltung im elektrischen Modus bei maximaler Beschleunigung (E2C11C21 -> E2C12C21) 62
Abbildung 35: Schematische Darstellung eines Zustarts von EM2 im elektrischen Modus infolge eines Kick-down Manövers(E1C11 -> E2C11C21) 64
Abbildung 36: Schematische Darstellung eines Moduswechsels von rein elektrischem Fahren mit EM1 zu einem parallelen Hybridmodus im zweiten Gang (E1C11 -> P2C11C21) 65
Abbildung 37: Schematische Darstellung eines Wechsels vom seriellen Hybridmodus in einen parallelen Hybridmodus nach einem Kick-down (SC11 -> P2C11C21) 67
Abbildung 38: Schematische Darstellung von Schaltablaufsteuerung und Reglern 68
Abbildung 39: Unterscheidung von achsmomentneutralen und -veränderlichen DK-Phasen am Beispiel von rein elektrischen Drehmomentkoordinationsphasen 69
Abbildung 40: Möglichkeiten zur Beeinflussung des Motormoments zur Reduktion von Fahrzeuglängsschwingungen [128] 71
Abbildung 41: Auswirkung einer fehlerhaft berechneten oder fehlerhaft umgesetzten Rampensteigung auf das Achsmoment. Links: korrekte Rampensteigungen, rechts: fehlerhafte Rampensteigung mEM2*. 75

Abbildung 42: Umsetzung der rampenförmigen Solldrehmomente in der *DE-REX* Antriebsstrangsteuerung. 76
Abbildung 43: Umsetzung der PT1-gefilterten Solldrehmomente in der *DE-REX* Antriebsstrangsteuerung. 76
Abbildung 44: Achsmomentneutrale DK-Phasen mit Rampensteuerung und unterschiedlichen Rampenanstiegszeiten 79
Abbildung 45: Achsmomentneutrale Drehmomentkoordination mit PT1-Übertragungsgliedern und unterschiedlichen Zeitkonstanten 80
Abbildung 46: Achsmomentneutrale Drehmomentkoordination mit PT1-Übertragungsgliedern und unterschiedlichen Zeitkonstanten in unterschiedlichen Gängen 81
Abbildung 47: Experimentelle Ermittlung der ersten Eigenfrequenz des PIL-Prüfstands in verschiedenen Gang-Kombinationen. 83
Abbildung 48: Achsmomentveränderliche Drehmomentkoordination mit rampenförmig gesteuerten Drehmomenten. In beiden Teilgetrieben ist der erste Gang eingelegt (E2C11C21) 85
Abbildung 49: Achsmomentveränderliche Drehmomentkoordination mit rampenförmig gesteuerten Drehmomenten. In beiden Teilgetrieben ist der zweite Gang eingelegt (E2C12C22) 86
Abbildung 50: Achsmomentveränderliche Drehmomentkoordination mit PT1-gefilterten Sollmomenten. In beiden Teilgetrieben ist der erste Gang eingelegt (E2C11C21). 87
Abbildung 51: Vergleich der VDV-Werte einer achsmomentveränderlichen Drehmomentkoordination mit PT1-Filterung und mit Rampensteuerung. Bei den Messungen sind beide TG im ersten Gang, EM1 stellt 30 Nm und EM2 steigt von 0 auf 30 Nm entsprechend den zuvor gezeigten Messungen. 89
Abbildung 52: Amplitudenspektren der Rampenfunktionen und PT1-gefilterten Sollwerte im Vergleich 90
Abbildung 53: Sollwertformung bei hybriden DK mithilfe der identifizierten Übertragungsfunktionen 92
Abbildung 54: Messung einer hybriden Drehmomentkoordination nach VM-Start und Einlegen eines Gangs. Die Abbildung zeigt die letzte Phase eines Moduswechsels von E1C11 nach P2C11C21 (aufgezeichnet im *DE-REX* Versuchsfahrzeug). 93
Abbildung 55: Schematische Darstellung einer aktiven Synchronisierungsphase im Zusammenhang einer Hochschaltung 96
Abbildung 56: Strichskizzen für rein elektrisches Synchronisieren TG1 und TG2 (links) und hybrides Synchronisieren von TG2 (rechts) 97
Abbildung 57: Ersatzmodell für rein elektrisches Synchronisieren 100
Abbildung 58: Regelkreis für rein elektrische Synchronisierung 100

Abbildung 59: Zusammensetzung der auf die Hauptwelle bezogenen reduzierten Trägheitsmomente für die rein elektrische Synchronisierung 102
Abbildung 60: Links: Ausrollkurven von TG1 und TG2 in Neutralstellung, jeweils drei Messungen. Rechts: Aus den Messungen berechnete Reibmomente und die zugehörige lineare Regression 103
Abbildung 61: Umsetzung und Parametrierung des PI-Reglers nach dem symmetrischen Optimum 105
Abbildung 62: Drehzahlregelkreis des rein elektrischen Systems mit Glättung der Führungsgröße und PI-Regler mit Integralabschaltung bei Überschreitung von Grenzen für die Regelabweichung 106
Abbildung 63: Elektrische, aktive Synchronisierung mit einem Sollwertsprung von 0 auf 5.000 1/min. a) Original-Reglerparametrierung nach Optimierungstabelle. b) Manuell angepasste Reglerparametrierung 107
Abbildung 64: Elektrische, aktive Synchronisierung mit einem Sollwertsprung von 8.000 auf 3.000 1/min. 109
Abbildung 65: Ersatzmodell für hybrides, aktives Synchronisieren 114
Abbildung 66: Vereinfachtes Ersatzmodell für hybrides, aktives Synchronisieren 115
Abbildung 67: Massenträgheitsmomente bei der hybriden Synchronisierung und Vergleich mit den reduzierten Massenträgheitsmomenten bei rein elektrischer Synchronisierung . 116
Abbildung 68: Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung im Falle der hybriden Synchronisierung mit aktiver Beteiligung des VM 118
Abbildung 69: Messergebnisse der aktiven, hybriden Synchronisierung im Fall eines VM-Starts. Rechts mit passivem VM, links mit aktiver Beteiligung des VM. 119
Abbildung 70: Messergebnisse der aktiven, hybriden Synchronisierung wie bei einer Rückschaltung. Rechts mit passivem VM, links mit aktiver Beteiligung des VM. 120
Abbildung 71: Messergebnisse der aktiven, hybriden Synchronisierung wie bei einer Hochschaltung. Rechts mit passivem VM, links mit aktiver Beteiligung des VM. 121
Abbildung 72: Schematische Darstellung der Module für eine Differenzwinkelregelung 122
Abbildung 73: Signalverarbeitung des gemessenen Winkelsignals des EM Lagegebers. Links bei einer EM1-Drehzahl von 2.000 min^{-1}, rechts bei 10.000 min^{-1} 124
Abbildung 74: Messung zur Berechnung des Differenzwinkels an einer Kupplung 126
Abbildung 75: Messung des Differenzwinkels an Kupplung C21 beim Einlegen mit Dachkontakt 127
Abbildung 76: Regelkreis für die Differenzwinkelregelung, aufbauend auf dem Drehzahlregelkreis zur aktiven Synchronisierung 130
Abbildung 77: Messung einer manuell aktivierten Differenzwinkelregelung. Die Differenzwinkelregelung wird zum Zeitpunkt t0 mit einem Sollwert von 221° aktiviert. 131

Abbildung 78: Messung einer differenzwinkelgenauen aktiven Synchronisierung mit EM2 132
Abbildung 79: Verkürzung der Baulänge einer Synchronisierung durch flache Dächer der Klauen, nach [157] 136
Abbildung 80: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von flachen und spitzen Klauenkupplungen 136
Abbildung 81: Einrückvorgang der *DE-REX* Schaltaktorik mit P-Regler 142
Abbildung 82: Einrückvorgang der *DE-REX* Schaltaktorik mit Kaskadenregler und reduzierter Drehzahl im Winkelbereich, in dem die Schaltgabel bewegt wird 142
Abbildung 83: Foto der im *Speed2E* Getriebe verbauten Klauenkupplung 143
Abbildung 84: Unterscheidung von Einspurspiel und Umschlagspiel für unterschiedliche Klauengeometrien. a) Rechtwinklige Klauen, b) Flache Klauen mit Fase, c) Spitze Klauen mit Hinterschneidung 144
Abbildung 85: Foto der verwendeten Klauenkupplung zur Darstellung der Fasen an den Klauendächern 145
Abbildung 86: Definition der für die Berechnung der Einrückwahrscheinlichkeit notwendigen Abmessungen 146
Abbildung 87: Erklärung zum analytischen Modell der Einrückwahrscheinlichkeit 148
Abbildung 88: Messungen ausgewählter Schaltversuche mit flachen Klauenkupplungen am *Speed2E* Prüfstand. (a): abgewiesener Einrückversuch bei geringer Drehzahldifferenz. (b): erfolgreicher Einrückversuch ohne Kontakt der Klauendächer bei geringer Drehzahldifferenz. (c): erfolgreicher Einrückversuch durch aneinander abgleitende Klauendächer. (d): erfolgreicher Einrückversuch bei hoher Drehzahldifferenz 152
Abbildung 89: Ergebnis der Einrückversuche bei steigenden Differenzdrehzahlen im ersten Gang. (1148 ausgewertete Schaltungen) 154
Abbildung 90: Ergebnis der Einrückversuche bei steigenden Differenzdrehzahlen im zweiten Gang (1111 ausgewertete Schaltungen) 156
Abbildung 91: Prinzip der gesteuerten Strategie zum Auflösen von Klaue-auf-Klaue Situationen 158
Abbildung 92: Messung von Einrückversuchen mit aktivierter gesteuerter Strategie zum Auflösen von Klaue-auf-Klaue Situationen 159
Abbildung 93: Messung von Einrückversuchen mit aktivierter Drehzahlregel-Strategie zum Auflösen von Klaue-auf-Klaue Situationen 160
Abbildung 94: Ergebnis der Einrückversuche mit aktivierter Drehzahlregel-Strategie zum Auflösen von Klaue-auf-Klaue Situationen im ersten Gang im Vergleich mit den Messergebnissen ohne Auflösestrategie (grau) 161
Abbildung 95: CAD-Ansicht und Hauptabmessungen der *DE-REX* Klauenkupplung mit spitzen Klauen 163

Abbildung 96: Ergebnis der Einrückversuche mit spitzen Klauenkupplungen, gemessen am *DE-REX* Prüfstand (519 ausgewertete Schaltversuche, keine abgewiesenen Schaltungen) 164
Abbildung 97: Zeitverläufe der in Abbildung 96 markierten Einrückversuche mit spitzen Klauenkupplungen. 166
Abbildung 98: Ergebnis der Einrückversuche mit spitzen Klauenkupplungen und aktiviertem Drehzahlregler 168
Abbildung 99: Einrückversuche mit spitzen Klauenkupplungen und verringerter Einrückgeschwindigkeit 169
Abbildung 100: Einrückversuche mit spitzen Klauenkupplungen mit doppelter Absolutdrehzahl nGA = 200 min-1 und bei stehendem Abtrieb nGA = 0 min-1. 170
Abbildung 101: Messung einer elektrischen Zug-Hochschaltung im *DE-REX* Versuchsfahrzeug (E1C11 -> E1C22) 175
Abbildung 102: Zustart von EM2 bei einem Kick-down im rein elektrischen Modus bei langsamer Fahrt. Die Zeitkonstante für die DK beträgt TEM = 0,1 s (E1C11 -> E2C11C21) 176
Abbildung 103: Zustart der zweiten EM bei einem Kick-down aus dem Stand im rein elektrischen Modus (E1C11 → E2C11C21) 178
Abbildung 104: Vergleich des Beschleunigungsprofils bei Volllast-Anfahrt mit anfangs nur einer EM (E1C11 → E2C11C21) und mit beiden EM von Beginn an (E2C11C21) 178
Abbildung 105: Elektrische Vollastbeschleunigung mit Zug-Hochschaltungen in beiden Teilgetrieben. Gemessen im *DE-REX* Versuchsfahrzeug. 179
Abbildung 106: Bewertung der ersten Vollast-Zug-Hochschaltung (Referenz) mit der stützenden EM im ersten Gang anhand des Beschleunigungsverlaufs. 180
Abbildung 107: Bewertung der zweiten Vollast-Zug-Hochschaltung (Referenz) mit der stützenden EM im zweiten Gang anhand des Beschleunigungsverlaufs. 181
Abbildung 108: Einordnung des Schaltkomforts gemessener, elektrischer Zug-Hochschaltungen im *DE-REX* Versuchsfahrzeug und Vergleich mit Simulationsergebnissen. Die Daten der Streubänder stammen aus [113]. 182
Abbildung 109: Offene Zug-Hochschaltung bei 80 % Fahrpedalstellung im Versuchsfahrzeug. Der berechnete VDV beträgt 1,285 m/s1,75. 183
Abbildung 110: Referenz-Messung eines Zustarts des Verbrennungsmotors in einen parallelen Hybridmodus (P2C11C21). 186
Abbildung 111: Einfluss der Drehzahldifferenz bei Einrücken einer Klauenkupplung mit VM. . 187
Abbildung 112: Messung einer Zug-Hochschaltung im parallelen Hybridmodus (P2C11C21 → P2C11C22) bei Konstantfahrt. 188
Abbildung 113: Messung eines Moduswechsels von einem seriellen Modus (SC11) in einen parallelen Hybridmodus (P2C11C21) infolge eines Kick-down. 190

Abbildung 114: Parallelisierung einer E2C11C21 – E2C12C21 Zug-Hochschaltung. Eine Verkürzung um 200 ms auf 650 ms wurde im Versuchsfahrzeug erreicht. Durch weitere Parallelisierung ist eine Gesamtschaltdauer von 550 ms möglich. 191
Abbildung 115: Gemessener P2C11C21 -> P2C11C22 Gangwechsel mit virtueller Doppelkupplung 193
Abbildung 116: Schaltzeitverkürzung durch Anwendung der virtuellen Doppelkupplung auf einen hybriden Gangwechsel.....194
Abbildung 117: Vergleich einer Kick-down Schaltung von seriellem in parallelen Hybridmodus mit und ohne virtuelle Doppelkupplung im *DE-REX* Versuchsfahrzeug.....195
Abbildung 118: Qualitativer Vergleich der *DE-REX* Kick-down Schaltung (rechts) mit einer 7-2 Kick-down Schaltung mit dem *7-DCI 600* (links) [83] 195

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Klassifizierung von Hybridantrieben nach der Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs mit Zuordnung der verfügbaren Hybridfunktionalitäten. Angelehnt an [4], [23]. 5
Tabelle 2: Kenngrößen des *DE-REX* Antriebsstrangs.....13
Tabelle 3: Kenngrößen des *Speed2E* Antriebsstrangs.....16
Tabelle 4: Klassifizierung von Schaltvorgängen nach Schaltrichtung und Richtung des Momentenflusses, angepasst von [42] 21
Tabelle 5: Bewertungskriterien für Schaltvorgänge 27
Tabelle 6: Wissenschaftliche Ziele der verwendeten Prüfstände und des Fahrzeugs 30
Tabelle 7: Modellparameter des Schaltaktorikmodells.....47
Tabelle 8: Modellparameter des *DE-REX* Fahrzeugs 52
Tabelle 9: *DE-REX* Fahrmodi.....55
Tabelle 10: Abkürzung, Farbcode und Beschreibung der Schaltphasen 57
Tabelle 11: Kategorisierte Abläufe der *DE-REX* Gang- und Moduswechsel.....59
Tabelle 12: *DE-REX* Parameter zur Auslegung der Drehzahlregelung 104
Tabelle 13: Manuell optimierte Reglerparameter für die elektrische, aktive Synchronisierung .108
Tabelle 14: Übersicht der verschiedenen Situationen bei der hybriden, aktiven Synchronisierung. Abschätzung der Vor- und Nachteile in Bezug auf Drehungleichförmigkeiten, Dynamik, Emissionen und Akustik 111
Tabelle 15: Parameter für den Reglerentwurf zur aktiven, hybriden Synchronisierung 117
Tabelle 16: Reglerparameter für die hybride, aktive Synchronisierung 117

Tabelle 17: Kupplungsparameter der *Speed2E* Kupplung 146
Tabelle 18: Für das analytische Modell verwendete Gleitreibungskoeffizienten 150
Tabelle 19: Kupplungsparameter der *DE-REX* Kupplungen C21 und C22 163

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AK__	Aktuierung einer Klauenkupplung, nachfolgend das Teilgetriebe
AM	Antriebsmotor
AMA	Abgasmessanlage
AMT	Automated Manual Transmission (Automatisiertes Schaltgetriebe)
AS	Antriebsstrang
AS__	Aktive Synchronisierung, nachfolgend das Teilgetriebe
AT	(Stufen-) Automatgetriebe
ATZ	Automobiltechnische Zeitschrift
BLDC	Bürstenloser Gleichstrommotor (Brushless Direct-Current Motor)
CAD	Computer-Aided Design
CAN	Controller Area Network
DCT	Doppelkupplungsgetriebe (Dual-Clutch Transmission)
DHT	Dedicated Hybrid Transmission
Diff	Differential
DK	Drehmomentkoordination
DMS	Dehnungsmessstreifen
ECU	Motorsteuergerät (Electronic Control Unit)
eCVT	Electronic continously variable transmission
EfB	Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung
EM	Elektromaschine
EMS	Einmassenschwinger

ES	Einrückspiel
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FW	Fahrwiderstand
Fzg	Fahrzeug
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau
GA	Getriebeausgang
IMS	Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau
KD	Klauendach
KK	Klauenkupplung
kont	kontinuierlich
LFP	Low Frequency Percentage
min	minimal
MT	Handschaltgetriebe (Manual Transmission)
NKW	Nutzkraftwagen
NVH	Noise, Vibration, Harshness
P1…4	Parallelhybrid mit Angabe der Position der E-Maschine
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PIL	Powertrain-in-the-Loop
PKW	Personenkraftwagen
prim	Primär
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
RMS	Root Mean Square
sek	Sekundär
SG	Schaltgabel
SM	Schaltmotor
SW	Seitenwellen

TG	Teilgetriebe
TU	Technische Universität
US	Umschlagspiel
uZMS	Ungefesselter Zweimassenschwinger
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vDK	Virtuelle Doppelkupplung
VM	Verbrennungsmotor
ZMS	Zweimassenschwungrad

SYMBOLVERZEICHNIS

Lateinische Symbole

a	Beschleunigung	m/s^2
b	Spiel	m
c	Steifigkeit	N/m oder Nm/rad
d	Dämpfungskonstante	Ns/m
f_0	Eigenfrequenz	Hz
F	Kraft	N
G	Übertragungsfunktion	-
i	Übersetzungsverhältnis	-
I	Strom	A
j	Ruck	m/s^3
k	Steifigkeit	N/m oder Nm/rad
m	Masse / Rampensteigung	kg / Nm/s

n	Drehzahl	min^{-1}
P	Einrückwahrscheinlichkeit	-
P	Leistung / Einrückwahr-scheinlichkeit	kW / -
r	Radius	m
R	Widerstand	Ω
Δt	Zeitdauer	s
T	Zeitkonstante	s
U	Spannung	V
v	Geschwindigkeit	m/s oder km/h
z	Anzahl Klauen / Zähne	-

Griechische Symbole

α	Spitzenwinkel von Klauendächern	°
β	Hinterschnittwinkel	°
Δ	Differenz einer nachfolgenden Größe	-
Θ	Massenträgheitsmoment	kgm^2
μ	Gleitreibungskoeffizient	-
φ	Winkel	rad
$\dot{\varphi}$	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
ω_0	Eigenkreisfrequenz	rad/s