

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 420

Dipl.-Ing. Uli Christian Blessing,
Heilbronn

Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs: Modellierung, Simulation und Bewertung

Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs: Modellierung, Simulation und Bewertung

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Uli Christian Blessing
aus Heilbronn

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht
Tag der mündlichen Prüfung: 26.09.2019

Institut für Leistungselektronik und
Elektrische Antriebe der Universität Stuttgart

2020

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Uli Christian Blessing,
Heilbronn

Nr. 420

Antriebsstrang
eines Hybridfahrzeugs:
Modellierung,
Simulation und
Bewertung

VDI verlag

Blessing, Uli Christian

Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs: Modellierung, Simulation und Bewertung

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 420. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

170 Seiten, 93 Bilder, 5 Tabellen.

ISBN 978-3-18-342021-6, ISSN 0178-9481,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

Für die Dokumentation: Hybrid Antrieb – Simulation – Verbrauchsberechnung – Hybrid Fahrzeug – Doppelkupplungsgetriebe – Betriebsstrategie – elektrischer Antrieb – Fahrzeug Validierung – E-Maschine – Leistungselektronik

In dieser Arbeit wird am Beispiel eines hybridisierten Doppelkupplungsgetriebes und einer elektrisch angetriebenen Hinterachse eine Simulationethodik für die Entwicklung von hybriden Antriebssträngen vorgestellt und deren Tauglichkeit mittels eines Demonstratorfahrzeuges verifiziert. Die Simulationethodik berücksichtigt dabei die unterschiedlichen Entwicklungsphasen von der Systemanforderung zum Systementwurf, über die Integration bis hin zur Validierung. Für die Anforderungsanalyse bzw. den Entwurf wird ein vereinfachtes quasistationäres Verbrauchsberechnungsmodell vorgestellt und unterschiedliche Konfigurationen eines hybriden Antriebsstranges analysiert. Ein detailliertes längsdynamisches Simulationsprogramm wird für die Untersuchung und Validierung von realen Komponenten zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt beschrieben. Um beide Simulationsprogramme realitätsnah betreiben zu können, wird eine allgemeine Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge erläutert. Außerdem werden Getriebefunktionalitäten vorgestellt, welche die Fahrbarkeit verbessern und damit die Kundenakzeptanz erhöhen.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

D 93

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9481

ISBN 978-3-18-342021-6

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Teamleiter in der Entwicklung bei der GETRAG GmbH & Co. KG in Untergruppenbach.

Für die Betreuung der Arbeit und seine vielen wertvollen Anregungen möchte ich zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Jörg Roth-Stielow danken. Ebenso gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht für die Übernahme des Mitberichts.

Ausserdem danke ich der GETRAG für die finanzielle Ausstattung des Projekts und meinem Vorgesetzten Dipl.-Ing. Matthias Beck, ohne die meine Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kollegen für das stets angenehme Arbeitsklima und die vielfältigen fachlichen Anregungen. Dies gilt besonders für Herrn Dipl.-Ing. Alexander Strube und Dr. rer. nat. Bernd Blankenbach, die mit ihren Ratschlägen wesentlich zum Erfolg der Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Kollegen Dipl.-Ing. Ingo Matusche, Dipl.-Ing. Thomas Hoffmeister, Dipl.-Ing. Thorsten Stepper und Dipl.-Ing. Tibor Niedermayer für die Unterstützung während des Aufbaus und der Inbetriebnahme des Hybrid-Demonstratorfahrzeugs.

Einen großen Anteil am Gelingen der Arbeit hatten auch meine Eltern, die mir auf vielerlei Art Unterstützung zuteil werden ließen und mir dadurch das Promotionsvorhaben erleichterten.

Für meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Abkürzungsverzeichnis | IX |
| Symbolverzeichnis | X |
| Kurzfassung | XX |
| Abstract | XXII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Zielsetzung | 2 |
| 1.2 Struktur und Aufbau | 3 |
| 2 Stand der Technik | 5 |
| 2.1 Hybridfahrzeuge | 5 |
| 2.1.1 Komponenten eines Hybridsystems | 5 |
| 2.1.2 Beschreibung der hybriden Betriebsmodi | 7 |
| 2.1.3 Meilensteine der Hybridfahrzeug-Entwicklung | 10 |
| 2.1.4 Kraftstoff-Einsparpotenziale durch die Hybridisierung | 12 |
| 2.1.5 Hybrid-Kategorien | 17 |
| 2.1.6 Ausführungsbeispiele von Hybridantriebssträngen | 19 |
| 2.2 Simulationstools | 23 |
| 2.2.1 Wissenschaftliche Ansätze | 23 |
| 2.2.2 Kommerzielle Simulationstools | 24 |
| 2.3 Betriebsstrategie | 26 |
| 3 Hybrid-Demonstratorfahrzeug | 28 |
| 3.1 Basisfahrzeug | 28 |
| 3.2 Hybrid-DKG | 29 |
| 3.2.1 Funktionen und Eigenschaften | 29 |
| 3.2.2 Elektrische Komponenten | 32 |
| 3.3 Elektrisch angetriebene Hinterachse | 33 |
| 3.4 Antriebsstrang-Konfigurationen des Fahrzeugs | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 4 Betriebsstrategie | 35 |
| 4.1 Fahrprogramme | 36 |
| 4.2 Realisierungsvarianten des Fahrerwunsches | 37 |
| 4.3 Momentenaufteilung und Gangwahlstrategie | 38 |
| 4.3.1 Momentenaufteilung | 39 |
| 4.3.2 Gangwahlstrategie | 43 |
| 4.4 Funktionaler Ablauf der Betriebsstrategie | 45 |
| 4.4.1 Vereinfachter Zustandsautomat | 46 |
| 4.4.2 Einflussgrößen auf die Nutzung der EM | 48 |
| 4.4.3 Leistungsgrenzwerte für den Betrieb der EM | 51 |
| | |
| 5 Methoden zur Simulation | 55 |
| 5.1 Vereinfachte quasistationäre Verbrauchsberechnung | 56 |
| 5.1.1 Beschreibung der Simulationsmodelle | 58 |
| Modul Fahrzeug | 58 |
| Modul Getriebe | 60 |
| Modul VM | 63 |
| Modul EM | 64 |
| Modul Leistungselektronik | 65 |
| Modul Hochvoltbatterie | 66 |
| 5.1.2 Simulationsergebnisse der Verbrauchsberechnung | 69 |
| Konventionelles Handschaltgetriebe (M1) | 69 |
| Handschaltgetriebe mit Stopp/Start-Funktionalität (M2) | 70 |
| Konventionelles DKG (D1) | 71 |
| DKG mit Stopp/Start-Funktionalität (D2) | 72 |
| DKG mit elektrischer Hinterachse (H1) | 73 |
| Hybrid-DKG mit EM an Teilgetriebe 1 (H2) | 74 |
| Hybrid-DKG mit EM an Teilgetriebe 2 (H3) | 76 |
| Hybrid-DKG mit unkoppelbarer EM (H4) | 77 |
| 5.1.3 Simulation der maximalen Längsdynamik | 78 |
| 5.1.4 Bewertung der Ergebnisse der Verbrauchsberechnung und der Längsdynamiksimulation | 79 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2 | Programm für detaillierte Simulation der Längsdynamik | 84 |
| 5.2.1 | Modellierung des elektrischen Systems | 84 |
| | Modellbildung und Regelung der EM | 84 |
| | Modellierung des PWR | 89 |
| | Modellierung der Batterie | 93 |
| | Modellierung der EKK | 95 |
| 5.2.2 | Modellierung des VM | 96 |
| | Modellbildung des Zylinders | 97 |
| | Modellbildung des Kurbeltriebs | 103 |
| 5.2.3 | Modellierung des Antriebsstranges der Vorderachse | 105 |
| | Modellbildung des Zwei-Massen-Schwungrads (ZMS) | 106 |
| | Modellbildung des DKG | 107 |
| | Modellbildung des Differenzials und der Seitenwellen | 114 |
| 5.2.4 | Modellierung des Antriebsstranges der Hinterachse | 115 |
| 5.2.5 | Modellierung des Fahrzeugs | 116 |
| 5.3 | Simulation unterschiedlicher Betriebszustandübergänge | 118 |
| 5.3.1 | Simulation unterschiedlicher Schaltvorgänge | 119 |
| 5.3.2 | Simulation eines hybriden Anfahrvorgangs | 122 |
| 5.3.3 | Abkoppeln der EM | 123 |
| 6 | Verifikation am Fahrzeug | 127 |
| 6.1 | Verbrauchsmessungen | 127 |
| 6.1.1 | Konventionelles DKG | 128 |
| 6.1.2 | DKG mit elektrisch angetriebener Hinterachse | 129 |
| 6.1.3 | Hybrid-DKG | 130 |
| 6.2 | Dynamische Abläufe im Fahrzeug | 131 |
| 6.2.1 | Wiederstart des VM | 131 |
| 6.2.2 | Nachbildung des VM-Schubmoments | 135 |
| 6.2.3 | Schaltungsablauf mit EM | 136 |
| 6.2.4 | Gangwechsel beim Rekuperieren ohne Bremskraftunterbrechung | 138 |
| 7 | Zusammenfassung | 142 |

| | |
|---|------------|
| Anhang | 145 |
| A Weitere Informationen zum Demonstratorfahrzeug | 146 |
| B Begrenzungskennlinien für die Betriebsstrategie | 150 |
| C Bestimmung der Achsaufstandskräfte eines Fahrzeugs | 152 |
| Literaturverzeichnis | 156 |
| Lebenslauf | |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|---|
| ABS | Anti-Blockiersystem |
| CAN | Controller Area Network |
| CARB | California Air Ressource Board |
| DCM | Gleichstrommaschine |
| DKG | Doppelkupplungsgetriebe |
| EKK | Elektromagnetische Klauenkupplung |
| EM | Elektrische Maschine |
| ESP | Elektronisches Fahrstabilitätsprogramm |
| HiL | Hardware-in-the-Loop |
| KSG | Kurbelwellenstartergeneratoranordnung |
| Li-Ion | Lithium-Ionen-Batterie |
| NEFZ | Neue Europäische Fahrzyklus |
| NiMH | Nickel-Metallhydrid-Batterie |
| Pb | Bleisäure-Batterie |
| PSM | Permanenterregte Synchronmaschine |
| PWR | Pulswechselrichter |
| SiL | Software-in-the-Loop |
| SoC | Status of Charge - Ladezustand der Batterie |
| VM | Verbrennungsmotor |
| ZMS | Zwei-Massen-Schwungrad |

Symbolverzeichnis

| | | |
|------------------|---|--------------------|
| α_i | Einflussgröße auf die E-Maschinenleistung | – |
| α_H | Steigungswinkel der Fahrbahn | – |
| α_{Zyl} | Wärmeübergangskoeffizient des Zylinders | W/K·m ² |
| β_i | Begrenzungsfaktor der E-Maschinenleistung | – |
| β_1 | Begrenzungsfaktor für EM-Temperatur | – |
| β_2 | Begrenzungsfaktor für PWR-Temperatur | – |
| β_3 | Begrenzungsfaktor für Temperatur der Hochvoltbatterie | – |
| β_4 | Begrenzungsfaktor für Ladezustand der Hochvoltbatterie (mot. Betrieb) | – |
| β_5 | Begrenzungsfaktor für Ladezustand der Hochvoltbatterie (gen. Betrieb) | – |
| β_6 | Begrenzungsfaktor für Wiederstartzeit des VM | – |
| β_7 | Begrenzungsfaktor für Momentenreserve des VM | – |
| Δn_{EKK} | Differenzdrehzahl der elektromagnetischen Klauenkupplung | min ⁻¹ |
| δ_{OL} | Obere Ladegrenze für das Laden der Hochvoltbatterie | – |
| δ_{UE} | Untere Ladegrenze für das Entladen der Hochvoltbatterie | – |
| $\delta_{UW/OW}$ | Untere/Obere Ladegrenze für den Wunschbereich der Hochvoltbatterie | – |
| ϵ_P | Leistungsgrenzwert für Betriebszustandswechsel ins Bremsen | W |
| $\epsilon_{s,j}$ | Zeitabhängige Schwelle der Schaltvariable s_{Lj} | – |
| ϵ_S | Leistungsgrenzwert für Betriebszustandswechsel in Schubbetrieb | W |
| ϵ_{VM} | Verdichtungsverhältnis des Verbrennungsmotors | – |
| ϵ_v | Geschwindigkeitsgrenzwert für Betriebsstrategie | km/h |
| η_{Bat} | Wirkungsgrad der Hochvoltbatterie | – |
| X | | |

| | | |
|----------------------|---|-------------------|
| η_{Bre} | Wirkungsgrad der Verbrennung | – |
| $\eta_{EM,Opt,G}$ | Optimaler Wirkungsgrad der E-Maschine im generatorischen Betrieb | – |
| $\eta_{EM,Opt,M}$ | Optimaler Wirkungsgrad der E-Maschine im motorischen Betrieb | – |
| $\eta_{G,EM/VM}$ | Wirkungsgrad E-Maschine/Verbrennungsmotor bis Abtriebswelle | – |
| κ | Isentropenkoeffizient | – |
| κ_L | Längsdynamische Gewichtsverlagerung | – |
| λ_{KW} | Pleuelverhältnis | – |
| $\mu_{Aus/Ein}$ | Strömungsbeiwert des ein-/ausströmenden Gases | – |
| $\mu_{K,a}$ | Reibwert der Kupplungsscheiben | – |
| $\omega_{EL/EM}$ | Elektrische/Mechanische Kreisfrequenz der E-Maschine | 1/s |
| $\phi_{EL/KW}$ | Winkellage der E-Maschine/Kurbelwelle | ° |
| ψ_f | Polradfluss der E-Maschine | Vs |
| $\psi_{G,EM/VM}$ | Wirkfaktor der Kette E-Maschine/Verbrennungsmotor bis Abtriebswelle | – |
| ρ_L | Luftdichte | kg/m ³ |
| ρ_{Kra} | Spezifische Dichte des Kraftstoffs | kg/m ³ |
| $\dot{m}_{VM,Opt}$ | Optimaler spezifischer Kraftstoffverbrauch | kg/s |
| $\ddot{u}_{Di f}$ | Übersetzung des Differenzials | |
| \ddot{u}_{eDT} | Gesamtübersetzung der elektrischen Hinterachse | |
| $\ddot{u}_{GEN/GVn}$ | Gangabhängige Übersetzung E-Maschine/Verbrennungsmotor | |
| $\ddot{u}_{TG1/2}$ | Übersetzung des Teilgetriebes 1/2 | |
| A_{Fzg} | Fahrzeugquerschnittsfläche | m ² |
| a_{Fzg} | Längsbeschleunigung des Fahrzeugs | m/s ² |

Symbolverzeichnis

| | | |
|--------------------|--|----------|
| a_{Kol} | Beschleunigung des Kolbens | m/s^2 |
| $A_{V,E/A}$ | Querschnittsfläche des Einlassventils/Auslassventils | m^2 |
| a_V | Vibe-Formfaktor | – |
| a_{Zi} | Inkrementelle Alterung des elektrischen Energiespeichers | – |
| A_{Zyk} | Alterung des Energiespeichers bezogen auf den Fahrzyklus | – |
| A_{Zyl} | Zylinderoberfläche | m^2 |
| b_V | Vibe-Formfaktor | – |
| $C_{Bat,A/B}$ | Lang-/Kurzzeit-Kapazität der Hochvoltbatterie | F |
| $c_{K,a}$ | Federsteifigkeit der Kupplungsscheiben | N/m |
| c_W | Luftwiderstandsbeiwert | – |
| $C_{Zel,a/b}$ | Lang-/Kurzzeit-Kapazität der Batteriezelle | F |
| c_{Zyl} | Spezifische isochore Wärmekapazität | J/kg · K |
| d_{Kol} | Durchmesser des Kolbens | m |
| $E_{Bat,Zyk}$ | Energie der Hochvoltbatterie für den Fahrzyklus | kWh |
| $E_{Dio,On/Off,j}$ | Ein-/Ausschaltenergie der Freilaufdiode | Wh |
| $E_{IGB,On/Off,j}$ | Ein-/Ausschaltenergie des IGBT | Wh |
| F_{EKK} | Schaltkraft der elektromagnetischen Klauenkupplung | N |
| F_{Han} | Hangabtriebskraft | N |
| F_{Luft} | Luftwiderstandskraft | N |
| $F_{Mas,j}$ | Oszillierende Trägheitskraft des Zylinders | N |
| f_{PWM} | PWM-Frequenz des Pulswechselrichters | Hz |
| F_{Rol} | Rollwiderstandskraft | N |
| XII | | |

| | | |
|--------------------|---|-------------------|
| f_{Rol} | Geschwindigkeitsabhängiger Rollwiderstandsbeiwert | – |
| F_{Tra} | Translatorische Beschleunigungskraft | N |
| g_{Erd} | Erdbeschleunigung | m/s ² |
| $H_{Aus/Ein}$ | Enthalpie des aus-/einströmenden Gases | J |
| H_{Blo} | Enthalpie der blow-by-Verluste | J |
| h_{Pj} | Prozentuale Bremshäufigkeit | |
| H_u | Unterer Heizwert des Kraftstoffs | J |
| $i_{\alpha/\beta}$ | Strom α/β der E-Maschine im α/β Koordinatensystem | A |
| i_{Bat} | Strom der Hochvoltbatterie | A |
| i_{EKK} | Strom der elektromagnetischen Klauenkupplung | A |
| $i_{sd/sq}$ | Strom der E-Maschine im d/q Koordinatensystem | A |
| $i_{U/V/W}$ | Strangstrom der Phase U/V/W | A |
| J_{Dif} | Trägheitsmoment des Differenzials | kg·m ² |
| J_{eDT} | Trägheitsmoment des elektrischen Achsantriebs | kg·m ² |
| $J_{EM1/2}$ | Trägheitsmoment der eDCT/eDT E-Maschine | kg·m ² |
| $J_{GEn/GVn}$ | Trägheitsmoment des E-Maschinen-/Verbrennungsmotorganges | kg·m ² |
| $J_{RV/RH}$ | Trägheitsmoment des Vorderrads/Hinterrads | kg·m ² |
| $J_{TG1/2}$ | Trägheitsmoment des Teilgetriebes 1/2 | kg·m ² |
| J_{VM} | Trägheitsmoment des Verbrennungsmotors | kg·m ² |
| $K_{EM,\mu}$ | Geschwindigkeitsproportionaler Reibanteil der E-Maschinenlagerung | – |
| $L_{d/q}$ | Längs-/ Querinduktivität der E-Maschine | H |
| L_{EKK} | Induktivität der elektromagnetischen Klauenkupplung | H |

| | | |
|------------------|---|----|
| l_{Ple} | Länge des Pleuels | m |
| $M_{A,R}$ | Antriebspezifisches Moment auf Radebene | Nm |
| $m_{Aus/Ein}$ | Masse der aus-/einströmenden Gase aus dem Zylinder | kg |
| m_a | Anzahl der Einflussgrößen für den jeweiligen Begrenzungsfaktor | – |
| $M_{B,R}$ | Basismoment bedingt durch Fahrzeug und Fahrzyklus auf Radebene | Nm |
| m_{Blo} | Masse des blow-by-Gemischs | kg |
| M_{BR} | Bremsmoment auf Radbasis | Nm |
| m_b | Anzahl der Bedingungen für die Betriebsstrategie | – |
| $M_{EM,Luf}$ | Elektrisches Moment der E-Maschine im Luftspalt | Nm |
| $M_{EM,max}$ | Maximales Moment der E-Maschine auf E-Maschinenbasis | Nm |
| $M_{EM,opt,LP}$ | Optimales Soll-Moment der E-Maschine bei der Lastpunktanhebung | Nm |
| $M_{EM,R}$ | Moment der E-Maschine auf Radebene | Nm |
| $M_{EM,W}$ | Soll-Moment der E-Maschine auf E-Maschinenbasis | Nm |
| $M_{EMi,E/V}$ | Gangabh. Moment der E-Maschine auf E-Maschinen-/Kurbelwellenbasis | Nm |
| M_{EM} | Moment der E-Maschine auf E-Maschinenbasis | Nm |
| M_{FW} | Soll-Moment Fahrerwunsch auf Kurbelwellenbasis | Nm |
| m_{Fzg} | Fahrzeugmasse | kg |
| $M_{Gas,j}$ | Moment des Zylinders durch den Gasdruck | Nm |
| $M_{HA/V A,max}$ | Maximal übertragbares Moment der Hinter-/Vorderachse | Nm |
| $M_{K1/2}$ | Moment der Kupplung 1/2 auf Kurbelwellenbasis | Nm |
| m_{Kra} | Masse des Kraftstoffs innerhalb des Zylinders | kg |
| $M_{Mas,j}$ | Moment des Zylinders durch die rotierende Masse | Nm |

| | | |
|----------------|--|-------------------|
| M_{MR} | Momentenreserve für Betriebsstrategie | Nm |
| $M_{res,R}$ | Resultierendes Gesamtmoment auf Radebene | Nm |
| $M_{S,Di f}$ | Schleppmoment des Differenzials | Nm |
| $M_{S,eDT}$ | Schleppmoment des elektrischen Achsantriebs | Nm |
| $M_{S, Gn}$ | Gangabhängiges Getriebeschleppmoment | Nm |
| $M_{S,KW/Neb}$ | Schleppmoment der Kurbelwelle/Nebenverbraucher | Nm |
| m_{VA} | Masse der Vorderachse | kg |
| $M_{VM,max}$ | Maximales Moment des Verbrennungsmotors auf Kurbelwellenbasis | Nm |
| $M_{VM,R}$ | Moment des Verbrennungsmotors auf Radebene | Nm |
| $M_{VM,S}$ | Schubmoment des Verbrennungsmotors auf Kurbelwellenbasis | Nm |
| $M_{VM,i}$ | Gangabhängiges Moment des Verbrennungsmotors auf Kurbelwellenbasis | Nm |
| M_{VM} | Moment des Verbrennungsmotors auf Kurbelwellenbasis | Nm |
| m_{Zyl} | Masse innerhalb des Zylinders | kg |
| $n_{EM,max}$ | Maximale Drehzahl der E-Maschine auf E-Maschinenbasis | min ⁻¹ |
| $n_{EM,W}$ | Solldrehzahlvorgabe für E-Maschine auf E-Maschinenbasis | min ⁻¹ |
| $n_{EM,i}$ | Gangabhängige Drehzahl der E-Maschine auf E-Maschinenbasis | min ⁻¹ |
| n_{EM} | Drehzahl der E-Maschine auf E-Maschinenbasis | min ⁻¹ |
| n_{Rad} | Raddrehzahl | min ⁻¹ |
| $n_{VM,max}$ | Maximale Drehzahl des Verbrennungsmotors auf Kurbelwellenbasis | min ⁻¹ |
| n_{VM} | Drehzahl des Verbrennungsmotors auf Kurbelwellenbasis | min ⁻¹ |
| n_{Zyl} | Zylinderanzahl | – |
| P_{Bat} | Leistung der Hochvoltbatterie | kW |
| | | XV |

Symbolverzeichnis

| | | |
|-----------------|---|----------|
| $P_{BK,Bat}$ | Leistungsbedarf der Kühlpumpe der Hochvoltbatterie | W |
| $P_{BN,Fzg}$ | Mittlere Bordnetzleistung des Fahrzeugs | W |
| $P_{Dio,Dj}$ | Durchlassverluste der Diode des Pulswechselrichters | W |
| $P_{Dio,Sj}$ | Schaltverluste der Diode des Pulswechselrichters | W |
| $P_{EM,max}$ | Drehzahlabhängige Maximalleistung der E-Maschine | kW |
| P_{EM} | Leistung der E-Maschine | kW |
| P_{FW} | Fahrerwunsch-Leistung | kW |
| $P_{IGB,Dj}$ | Durchlassverluste des IGBT des Pulswechselrichters | W |
| $P_{IGB,Sj}$ | Schaltverluste des IGBT des Pulswechselrichters | W |
| P_j | Diskrete Bremsleistung | kW |
| P_{Lj} | Leistungslimitierungen der Betriebsstrategie | kW |
| P_{LP} | Soll-Generatorleistung bei der Lastpunktanhebung | kW |
| P_{SB} | Soll-Generatorleistung beim Schubbetrieb mit E-Maschine | kW |
| $P_{SG,Bat}$ | Leistungsbedarf des Batteriesteuergeräts | W |
| $P_{SG,PWR}$ | Leistungsbedarf des Pulswechselrichtersteuergeräts | W |
| P_{SL} | Soll-Ladeleistung beim Standladen | kW |
| P_{VM} | Leistung des Verbrennungsmotors | kW |
| $P_{ZK,PWR}$ | Verlustleistung des Zwischenkreises des Pulswechselrichters | W |
| p_{Zyl} | Druck im Zylinder | Bar |
| Q_{Bre} | Freigesetzte Energie der Kraftstoffverbrennung | Wh |
| Q_{Wan} | Wärmeenergie der Zylinderwände | Wh |
| $R_{Bat,A/B/C}$ | Ohmscher Widerstand der Hochvoltbatterie | Ω |

XVI

| | | |
|-----------------|--|----------|
| R_{Bat} | Ohmscher Widerstand der Hochvoltbatterie | Ω |
| R_{DC} | Ohmscher Widerstand des Zwischenkreises | Ω |
| R_{EKK} | Ohmscher Widerstand der elektromagnetischen Klauenkupplung | Ω |
| R_{Gas} | Spezifische Gaskonstante von Luft | J/mol·K |
| r_{KW} | Radius der Kurbelwelle | m |
| R_P | Ohmscher Widerstand des Leistungshalbleiterzweigs | Ω |
| $r_{R,K,a}$ | Wirksamer Reibradius der Kupplungsscheiben | m |
| r_{Rad} | Geschwindigkeitsabhängiger Radius der Antriebsräder | m |
| R_S | Strangwiderstand der E-Maschine | Ω |
| r_{Ven} | Radius des Nockens | m |
| $R_{Zel,a/b/c}$ | Ohmscher Widerstand der Batteriezelle | Ω |
| R_{ZK} | Ohmscher Widerstand des Zwischenkreiskondensators | Ω |
| R_{Zul} | Ohmscher Widerstand der Zuleitung der Hochvoltbatterie | Ω |
| s_{BP} | Statussignal für Bremspedal betätigt | – |
| s_{IG} | Statussignal für aktuellen Gang | – |
| s_{Lj} | Schaltvariable für Betriebsmodi | – |
| s_{Pj} | Summenhäufigkeit der Bremsung | – |
| s_{SGD} | Statussignal für Durchführung der Gangvorgabe | – |
| s_{SGV} | Statussignal für Sollgangvorgabe | – |
| $s_{TG1/2}$ | Statussignal für aktuellen Gang im Teilgetriebe 1/2 | – |
| s_{VL} | Statussignal für Verbrennungsmotor läuft | – |
| s_{VM} | Statussignal des Verbrennungsmotors | – |

| | | |
|--------------------|--|----|
| s_{WS} | Statussignal für den Torquesplit-Wiederstart | – |
| s_{Zi} | Inkrementeller Ladehub des elektrischen Energiespeichers | – |
| s_{Zyk} | Gesamtstrecke des Fahrzyklus | km |
| S_{OC} | Ladezustand der Hochvoltbatterie | % |
| T_{Bat} | Temperatur der Hochvoltbatterie | °C |
| t_B | Zeitdauer der gesamten Verzögerung | s |
| T_{EM} | Temperatur der E-Maschine | °C |
| T_{Life} | Lebensdauer des Fahrzeugs | h |
| T_L | Zeitdauer im Leerlauf | s |
| t_{Pj} | Anteilige Zeit der Bremsleistung | s |
| T_{PWR} | Temperatur des Pulswechselrichters | °C |
| T_{Wan} | Temperatur der Zylinderwand | °C |
| T_{Zyk} | Zeitdauer des Fahrzyklus | s |
| T_{Zyl} | Temperatur des Gases im Zylinder | °C |
| $u_{\alpha/\beta}$ | Spannung α/β der E-Maschine im α/β Koordinatensystem | V |
| $u_{Bat, Nen}$ | Nennspannung der Hochvoltbatterie | V |
| u_{Bat} | Spannung der Hochvoltbatterie | V |
| $u_{D, Dj}$ | Durchlassspannung der Freilaufdiode | V |
| u_{EKK} | Spannung der elektromagnetischen Klauenkupplung | V |
| $u_{L, Dj}$ | Durchlassspannung des IGBT | V |
| u_{sd} | Spannung der E-Maschine im d/q Koordinatensystem | V |
| u_{sq} | Spannung der E-Maschine im d/q Koordinatensystem | V |

| | | |
|-----------------|---|------------------|
| $u_{U/V/W}$ | Spannung der Phase U/V/W | V |
| $u_{Z,Nenn}$ | Nennspannung der Batteriezelle | V |
| u_{ZK} | Spannung des Zwischenkreises | V |
| U_{Zyl} | Energie im Zylinder | J |
| $v_{avg/max}$ | Mittlere/Maximale Geschwindigkeit des Fahrzyklus | km/h |
| v_{Fzg} | Fahrzeuggeschwindigkeit | m/s |
| V_{Hub} | Hubvolumen des Zylinders | ccm ³ |
| v_{Kol} | Geschwindigkeit des Kolbens | m/s |
| V_K | Kraftstoffmenge | kg |
| V_{VM} | Hubraum des Verbrennungsmotors | ccm ³ |
| $V_{Zyl,UT/OT}$ | Volumen des Zylinders beim unteren/oberen Totpunkt | ccm ³ |
| W_{Zyl} | Arbeit des Zylinders | J |
| y_{EKK} | Position der Schaltmuffe der elektromagnetischen Klauenkupplung | m |
| $y_{K,a}$ | Kupplungsposition der Kupplungsscheiben | m |
| y_{Kol} | Position des Kolbens | m |
| $y_{SW1/2}$ | Inkrement der Schaltwalze des Teilgetriebes 1/2 | – |
| $y_{V,Ein/Aus}$ | Position des Ein-/Auslassventils | m |
| z_{EKK} | Zähnezahl der elektromagnetischen Klauenkupplung | – |
| z_{Pol} | Polpaarzahl der E-Maschine | – |

Kurzfassung

Aufgrund steigender Anforderungen an effiziente Automobil-Antriebsstränge werden vermehrt Hybrid-Antriebe eingesetzt. Speziell die Kombination aus Verbrennungsmotor und elektrischem Antrieb mit einer Batterie als Speichermedium wird sehr häufig angewandt. Um die vielfältigen Möglichkeiten einer Antriebsstrangkonfiguration kostengünstig objektiv zu bewerten, werden unterschiedliche Simulationsmethoden verwendet.

In dieser Arbeit wird am Beispiel eines hybridisierten Doppelkupplungsgetriebes und einer elektrisch angetriebenen Hinterachse eine Simulationsmethodik für die Entwicklung von hybriden Antriebssträngen vorgestellt und mittels eines Demonstratorfahrzeugs mit den beiden Antriebskonzepten verifiziert. Die Simulationsmethodik berücksichtigt dabei die unterschiedlichen Entwicklungsphasen von der Systemanforderung und dem Systementwurf, hin zur Integration und bis zur Validierung. Für die Anforderungsanalyse bzw. den Entwurf wird ein vereinfachtes quasistationäres Verbrauchsberechnungsmodell vorgestellt. Damit werden unterschiedliche Konfigurationen eines hybriden Antriebsstranges analysiert und relativ zu einem konventionellen Referenzfahrzeug hinsichtlich Verbrauch, Beschleunigungsverhalten und weiterer Kriterien diskutiert.

Die Simulationsergebnisse eines quasistationären Verbrauchsberechnungsprogramms werden mit Verbrauchsmessungen am Demonstratorfahrzeug abgeglichen. Der geringe Unterschied zwischen dem simulierten und zugehörigen gemessenen Kraftstoffverbrauch belegt die Güte der Modellierung. Für die Untersuchung und Validierung von realen Komponenten zu einem späteren Entwicklungszeitpunkt wird ein detailliertes längsdynamisches Simulationsprogramm beschrieben. Dieses Modell umfasst das zeitliche Verhalten aller für den Antriebsstrang relevanten Komponenten und beinhaltet deren wesentliche physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Um beide Simulationsprogramme realitätsnah zu betreiben, wird eine allgemeine Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge eingeführt. Diese ermöglicht für unterschiedliche Konfigurationen des Hybridantriebsstrangs eine optimale Momentenaufteilung und Gangwahlstrategie bei vielfältigen Fahrprogrammen.

Das detaillierte längsdynamische Simulationsmodell wird mit unterschiedlichen Versuchsmessungen eines Demonstratorfahrzeugs verifiziert und zeigt dabei eine hohe Abbildungsgenauigkeit. Mittels der Erkenntnisse aus den Simulationsprogrammen können die Fahrbarkeit und auch der Kraftstoffverbrauch optimiert werden.

XX

Neben der reinen simulativen Betrachtung verschiedener Konfigurationen eines Hybridantriebs werden außerdem Getriebefunktionalitäten diskutiert, welche den Fahrkomfort verbessern und damit die Kundenakzeptanz erhöhen. Für den Wiederstart des Verbrennungsmotors nach dem elektrischen Fahren und bei Schaltungen während der Rekuperation werden komfortoptimierte funktionale Abläufe vorgestellt. Die Simulationsmethodik mit der dazugehörigen Betriebsstrategie wurde für zwei stark unterschiedliche Antriebsstrangkonfigurationen entwickelt. Eine Übertragbarkeit auf andere Hybridkonfigurationen ist möglich.

Abstract

Due to increasing fuel-efficiency requirements hybrid powertrains will gain significantly in importance. The combination of an internal combustion engine and an electric powertrain using a battery as energy storage is the first choice. To evaluate various possible powertrain configurations in a fast and cost-efficient manner, several simulation methods are used.

A hybridized dual clutch transmission with an electric rear axle is used in this report to demonstrate the capability of the simulation method for hybrid powertrains. The simulation results are verified in a demonstrator vehicle, that has both powertrains installed. The simulation method takes into account the different development phases starting with the system requirements, the system architecture up to the system validation with hardware tests. A simplified quasi-static fuel efficiency calculation model is used for the system requirements and system design. This simplified simulation method evaluates various hybrid powertrain topologies in regard to fuel efficiency, longitudinal acceleration and further criterias. A conventional non hybrid reference vehicle is used as base for this comparison.

The simulation results of the quasi-static fuel efficiency simulation method are verified against fuel efficiency measurements of the demonstrator vehicle. Simulated fuel efficiency results and real measurement results are matching quite well and demonstrate the quality of the simulation method. To support analysis and validation of real components at a later stage of the development a detailed longitudinal dynamic simulation method is described. This simulation method includes all essential time based dependencies of all relevant components within the powertrain using their physical basics.

A general hybrid control strategy is introduced to operate both simulation methods close to reality. For various powertrain configurations this hybrid control strategy enables a torque distribution and gear selection for different driving modes.

The simulation results of the detailed longitudinal dynamic simulation method are checked against experimental measurements in a demonstrator vehicle and show a good correlation. The results of this simulation method can be used to optimize the driveability and to improve the fuel efficiency of the vehicle.

Besides of different simulation results for various hybrid powertrains some specific transmission functionalities are discussed, which improve the driving comfort and increase the customer acceptance . Comfort optimized functional sequences of the restart of the combustion engine after

pure electric driving and for gear shifting during recuperation are presented. The simulation method with its corresponding hybrid control strategy was established for two different hybrid powertrain configurations. Its portability to other hybrid powertrains is possible.

