Maximilian Bier

Hardware-in-the-Loop-Motorprüfstand zur Entwicklung hybrider Antriebsstränge

Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe
Prof. Dr. techn. Christian Beidl (Hrsg.)

Band 10

SHAKER VERLAG

Hardware-in-the-Loop-Motorprüfstand zur Entwicklung hybrider Antriebsstränge

Vom Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Maximilian Xaver Bier

aus Darmstadt

Berichterstatter:	Prof. Dr. techn. C. Beidl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht
Tag der Einreichung:	27.06.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	08.11.2017

Darmstadt 2018

D17

Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe

Band 10

Maximilian Bier

Hardware-in-the-Loop-Motorprüfstand zur Entwicklung hybrider Antriebsstränge

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6284-7
ISSN 2365-3795

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit basiert auf Untersuchungen, die ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachgebiets für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt habe.

Herrn Prof. Dr. techn. C. Beidl möchte ich ganz herzlich danken, zum einen für das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit, die Fachgebietsinfrastruktur nutzen zu können. Zum anderen haben mir die Gespräche mit ihm geholfen, meine Gedanken zu strukturieren und zu schärfen.

Herrn Prof. Dr.-Ing S. Rinderknecht gilt mein Dank für sein Interesse, seine Ratschläge und seine Bereitschaft, das Koreferat zu übernehmen.

Außerdem möchte ich der Firma AVL danken für die Förderung im Rahmen eines Kooperationsprojekts, die anregenden Diskussionen und die Möglichkeit zum Austausch mit Experten aus Forschung und Industrie. Darüber hinaus gilt mein Dank meinen heutigen Vorgesetzten für den Freiraum zur Fertigstellung der Arbeit.

Besonders wichtig für das Zustandekommen dieser Arbeit war die angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre am Fachgebiet. Besonderer Dank gilt der mechanischen Werkstatt für die tatkräftige Unterstützung beim Aufbau des hybriden Prüflings sowie dem Elektroniklabor, insbesondere Herrn Christoph Halscheidt, für die überaus kompetente Hilfe über die gesamte Entstehungszeit dieser Arbeit. Den Herren Matthias Kluin, David Buch und Raja Vadamalu bin ich sehr für ihre Anregungen dankbar und Herrn Hauke Maschmeyer für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung während der gemeinsamen Prüfstandsnutzung.

Mein Dank gebührt auch all den Hilfswissenschaftlern, die mich beim Aufbau, der Instandhaltung und beim Betrieb des Prüfstands, inklusive Spät- und Wochenendschichten, unterstützt haben. Den zahlreichen Studenten, die mit ihren wissenschaftlichen Arbeiten wesentlich zu dieser Dissertation beigetragen haben, bin ich außerdem zu Dank verpflichtet.

Gewidmet sei diese Arbeit meinen leider viel zu früh verstorbenen Eltern. An deren Stelle unterstützten mich meine Tante Isolde Müller und ihr Mann Helmut auf meinem Bildungsweg. Helmut übernahm außerdem das Korrekturlesen der Arbeit. Herzlichen Dank dafür! Mein herzlichster Dank gilt meiner Frau Regina: Vielen Dank für Dein Verständnis, Deine Motivation bei

Rückschlägen und die intensive Unterstützung durch die letzte, nicht immer einfache Zeit.

Darmstadt im Mai 2017

Kurzfassung

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Hybridfahrzeugen besteht Bedarf an einer angepassten Entwicklungsmethodik, mit welcher der erhöhte Entwicklungsaufwand und die Komplexität der Entwicklungsaufgabe beherrschbar sind. Durch den Einsatz von Simulation am Motorprüfstand lässt sich eine Reduktion von Entwicklungskosten und –zeit sowie eine bessere Antriebsstrangabstimmung gegenüber einer Ergebnisabsicherung im Fahrzeugumfeld erwarten. Allerdings wird diese Methodik bisher nur in geringem Umfang angewendet.

Um die Verbreitung der Methodik zu fördern, wird in dieser Arbeit ein durchgängiges Konzept entwickelt, das den Einsatz von Simulation am Motorprüfstand zur Entwicklung hybrider Antriebsstränge unabhängig vom Prüfstand, dem Simulationssystem und dem betrachteten Antriebsstrang ermöglicht. Es schlägt eine Hardware-in-the-Loop-Simulation vor, die auf einem vom Prüfstand unabhängigen oder dem prüfstandseigenen Echtzeitsystem ausgeführt wird. Für alle Schnittstellen zwischen Simulation und Prüfstand, die Prozessabläufe und die Einbindung von Mess- und Konditioniersystemen liefert das Konzept eine Umsetzungsempfehlung. Für die Schnittstelle zum Austausch mechanischer rotatorischer Leistung wird ein drehzahlgeführter Ansatz mit Rückführung des beobachteten internen Motormoments ausgewählt, der höchste Stabilität und hohe Aussagekraft der Versuchsergebnisse verspricht.

Im Rahmen der Konzeptbewertung wird der Einfluss dieses Ansatzes auf die Aussagekraft an einem Prüfstand durch den Vergleich mit einem Referenzsystem untersucht. Es zeigt sich, dass der Ansatz erweitert werden muss, um auch durch Verbrennungsstöße hervorgerufene Dämpfungsverluste im Antriebsstrang darzustellen. Ansonsten ergeben sich keine Hinweise auf systematische Abweichungen zum Referenzsystem in effizienz- und emissionsbezogenen Messwerten, wodurch das Vertrauen in die Methodik erhöht wird.

Aufbauend auf der Konzeptbewertung werden die Anwendungsmöglichkeiten mit Hilfe am Prüfstand umgesetzter Projekte dargestellt. Die Hardware-in-the-Loop-Simulation mit realem Verbrennungsmotor kann demnach - bei ausreichender Modellqualität und fahrzeugrealistischen thermischen Verhältnissen am Prüfstand – gut eingesetzt werden, um ein Antriebsstrangkonzept zu bewerten, den Motor oder seine Bauteile für die Hybridanwendung anzupassen und eine Hybridbetriebsstrategie zu applizieren. Einschränkungen ergeben sich bei der Bewertung von Fahrbarkeit, Lebensdauer und Zu-

verlässigkeit, vor allem da das Schwingungsverhalten des Motors am Prüfstand unterschiedlich zu dem im Fahrzeug ist. Das Einbinden eines hybriden Prüflings in die Simulation ist ebenfalls möglich und wird mit einem P2-Aggregat am Prüfstand beispielhaft umgesetzt. Aufgrund von Stabilitätsproblemen ist der Aufwand aber höher und der Betrieb des Aggregats eingeschränkt.

Abstract

Because of the growing importance of hybrid vehicles, the methodology for developing the powertrain should be adapted to the higher effort and complexity. By including simulation at engine testbeds, it can be expected that development costs and time can be reduced and the powertrain calibration can be improved compared to performing tests with the complete vehicle. However, this method has only been applied on a limited scale for hybrid powertrain development.

To promote the application of the method, this thesis provides a concept for consistently integrating simulation in engine testbeds for the hybrid powertrain development. The concept can be applied independently of the testbed, the simulation system and the powertrain in development. It proposes to setup a Hardware-in-the-Loop-Simulation which can be executed on an independent real time system or within an existing testbed environment. The concept provides recommendations for the implementation of all interfaces between the simulation and the testbed as well as for the workflow and the integration of measuring and conditioning devices. For the exchange of mechanical rotatory power between the simulation and the physical engine, a speed-based approach with feedback of the observed engine torque is selected. This approach provides utmost stability and high significance of the test results.

In the context of the concept evaluation, the effect of this approach on the test result significance is investigated by comparing testbed results with a reference system. It can be seen that the approach has to be adapted so that the Hardware-in-the-Loop-Simulation can also determine the drivetrain damping losses evoked by the combustion torque oscillations. Apart from this deficit no systematic deviations regarding efficiency and emission measurement quantities could be observed in the comparison. So the experiments may help to increase the trust into the method.

With the insight of the concept evaluation, the application spectrum is evaluated, taking reference to the projects realized at a testbed. It can be shown that the Hardware-in-the-Loop-Simulation with a physical engine can be used to evaluate powertrain concepts, to adapt engines or its components to the hybrid application and to calibrate hybrid control strategies – provided that the simulation model quality is high enough and the thermal conditions for the engine resemble the vehicle set-up. For the assessment of drivability, durability and reliability, there are certain restrictions, mainly depending on

deviations in engine movement and speed oscillations. Operating a hybrid drive unit as part of the simulation is also possible and demonstrated by running a P2 drive unit on a testbed. Due to stability issues, the effort to setup this configuration is higher and the drive unit cannot be operated in its full range.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... **iii**

Kurzfassung ..... **v**

Abstract ..... **vii**

Inhaltsverzeichnis ..... **ix**

1. Einleitung **1**

2. Grundlagen **4**

2.1. Entwicklungsziele für PKW-Antriebsstränge 4

2.2. Hybride Antriebsstränge 10

2.2.1. Begriffsklärung 11

2.2.2. Energiewandler 11

2.2.3. Wirkprinzipien 11

2.2.4. Hybridisierungsgrad 13

2.2.5. Antriebsstrangtopologie 13

2.2.6. Schwingungsmechanik 15

2.2.7. Steuerung 17

2.3. Der Entwicklungsprozess von PKW-Antriebssträngen 18

2.3.1. Antriebsstrangentwicklung als Teil der Fahrzeugentwicklung 19

2.3.2. Prozessbetrachtung im V-Modell 20

2.3.3. Eigenschaftsabsicherung bei PKW-Antriebssträngen 22

2.3.4. Verbesserungspotential für den Entwicklungsablauf 24

2.3.5. Auswahl der Entwicklungsumgebung für die Entwicklungsaufgabe 24

2.3.6. Organisation 28

2.4. Fahrzeug- und Antriebsstrangsimulation 29

2.5. Kombination von Simulation und Test 34

2.6. Motorprüfstände ... 36
2.6.1. Begriffsklärung und Historie ... 36
2.6.2. Komponenten ... 36
2.6.3. Schwingungsmechanik ... 39
2.6.4. Einstellbarer Frequenzbereich ... 41

3. Stand der Forschung und Technik ... 44
3.1. Kombination von Simulation und Test an Leistungsprüfständen ... 44
3.1.1. Offline- und Online-Verfahren ... 44
3.1.2. Simulationsmodelle und Prüfmethodik ... 45
3.1.3. Schnittstellen zwischen Simulation und realem Prüfling ... 46
3.1.4. Austausch von mechanischer Leistung zwischen Prüfling und Simulation ... 47
3.1.5. Austausch mechanischer Leistung am Motorprüfstand ... 51
3.1.6. Simulation von hybriden Antriebssträngen am Motorprüfstand ... 53
3.2. Untersuchung hybrider Antriebsstränge auf Leistungsprüfständen 55
3.3. Vergleich zwischen Prüfstandsuntersuchungen und Realsystemen. 56

4. Ziel und Fokus der Arbeit ... 58
4.1. Potential von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten ... 58
4.2. Ausgangslage ... 60
4.3. Ziel der Arbeit ... 61
4.4. Fokus der Arbeit ... 61

5. Anforderungen für ein Konzept zur Integration der Simulation in den Prüfstand ... 62
5.1. Aus Sicht der Antriebsstrangentwicklung ... 62
5.2. Aus Sicht der Modell- und Simulationsentwicklung ... 65
5.3. Aus Sicht des Prüfstandsbetriebs ... 65
5.4. Aus Sicht der Methodenbetreuung ... 67
5.5. Aus Sicht von Zulieferbetrieben und Forschungseinrichtungen ... 67

5.6. Zusammenfassung 68

6. Konzept zur Integration der Simulation in den Prüfstand 70

6.1. Konzeption 70

6.1.1. Verfahren zur Integration der Simulation 70

6.1.2. Simulationsumgebung 72

6.1.3. Funktionsanalyse 74

6.1.4. Struktur 75

6.1.5. Zuständigkeiten 78

6.2. Signalaustausch und Lastaufprägung 79

6.2.1. Schnittstelle für mechanische Leistung 81

6.2.1.1. Aggregatelagerung 81

6.2.1.2. Varianten für die mechanisch rotatorische Schnittstelle für EiL 82

6.2.1.3. Simulationsumgebung für den Konzeptvergleich 90

6.2.1.4. Vergleich in Bezug auf Stabilität 93

6.2.1.5. Vergleich in Bezug auf die Aussagekraft 102

6.2.1.6. Mechanisch rotatorische Schnittstelle für EiL 109

6.2.1.7. Mechanisch rotatorische Schnittstelle für erweiterte Prüflinge 113

6.2.2. Signalverbindungen zwischen Prüfling und simulierten Komponenten 115

6.2.2.1. Signale vom Prüfling an die simulierten Komponenten ... 115

6.2.2.2. Signale von simulierten Komponenten an den Prüfling ... 116

6.2.3. Schnittstellen für Stoffaustausch und kalorische Leistung 120

6.2.4. Schnittstellen zu alternativen Energiespeichern 121

6.3. Prozessbezogene Funktionen 122

6.4. Variation von Modell- und Simulationsparametern 124

6.5. Einbindung von Mess- und Konditioniersystemen 125

6.5.1. Änderungen aufgrund der Struktur 125

6.5.2. Änderungen aufgrund der Hybridisierung 126

7. Exemplarische Umsetzung 130

7.1. Prüfstandskomponenten 130

7.1.1. Dynamometer 130

7.1.2. Automatisierung, Regelung und Applikation 130

7.1.3. Simulationssystem 131

7.1.4. Prüfling 131

7.1.4.1. Verbrennungsmotor 131

7.1.4.2. Hybrides Aggregat 131

7.1.4.3. Referenzsystem 134

7.1.5. Konditionier- und Versorgungssysteme 134

7.1.6. Messtechnik 135

7.2. Systemeigenschaften 136

7.2.1. Signalübertragung und Stelldynamik 136

7.2.2. Eigenfrequenzen 139

7.3. Konzeptumsetzung 141

7.3.1. Einschränkungen 141

7.3.2. Übersicht 141

7.3.3. Mechanisch rotatorische Schnittstelle für EiL 144

7.3.4. Mechanisch rotatorische Schnittstelle für hybrides P2-Aggregat 145

8. Bewertung des Konzepts 146

8.1. Bewertung anhand der Anforderungen 146

8.1.1. Software-bezogene Anforderungen 146

8.1.2. Prüflingsbezogene Anforderungen 146

8.1.3. Prüfstandsbezogene Anforderungen 150

8.1.4. Prozess- und organisationsbezogene Anforderungen 150

8.1.5. Umsetzungsbezogene Anforderungen 150

8.2. Bewertung der Aussagekraft von mit dem Konzept durchgeführten Prüfstandsversuchen ... 152
8.2.1. Versuchsaufbau ... 154
8.2.1.1. Realsystem ... 155
8.2.1.2. EiL-Modell ... 156
8.2.1.3. Konditionierung der Prüflinge und der Umgebungsbedingungen ... 161
8.2.2. Versuchsbeschreibung ... 162
8.2.3. Ergebnisse ... 165
8.2.3.1. Drehzahl- und Drehmomentverläufe ... 165
8.2.3.2. Effizienz ... 172
8.2.3.3. Emissionen ... 178
8.2.4. Schlussfolgerungen ... 183

9. Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen ... 187
9.1. Bewertung eines Antriebsstrangkonzeptes ... 187
9.2. Komponentenentwicklung ... 188
9.3. Betriebsstrategieapplikation ... 190
9.4. Test und Applikation eines hybriden Aggregats ... 193

10. Zusammenfassung und Ausblick ... 196
10.1. Zusammenfassung ... 196
10.2. Ausblick ... 200

Abkürzungen und Formelzeichen ... 204

Abbildungsverzeichnis ... 208

Tabellenverzeichnis ... 213

Literaturverzeichnis ... 214

Anhang ... 231
A. Prüfstandssimulation für Konzeptvergleich ... 231

B. Versuchsläufe für den Vergleich EiL zu Referenzsystem 234
C. Versuchsergebnisse für den Vergleich EiL zu Referenzsystem 237