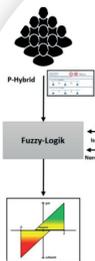
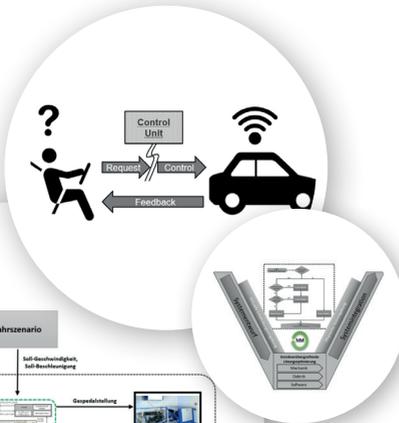


Ganzheitliche nutzerbasierte Entwicklungsmethode zur Entwicklung elektrifizierter und vernetzter Antriebe



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

Ganzheitliche nutzerbasierte Entwicklungsmethode zur Entwicklung elektrifizierter und vernetzter Antriebe

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
M. Sc. Sebastian Barth
aus Gründau

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder
Tag der Einreichung: 23.10.2020
Tag der mündlichen Prüfung: 12.01.2021

Darmstadt 2021

D17



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 20

Sebastian Barth

**Ganzheitliche nutzerbasierte Entwicklungsmethode
zur Entwicklung elektrifizierter und vernetzter Antriebe**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7937-1

ISSN 2365-3795

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

*Probleme kann man niemals mit derselben Denkweise lösen,
durch die sie entstanden sind.*

Albert Einstein



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Projektingenieur bei Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungsmotoren und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe. Zum einen für die Bereitschaft zur Übernahme und Förderung dieser Arbeit, zum anderen für die persönliche Unterstützung. Unsere Gespräche und Diskussionen waren eine große Hilfe zur inhaltlichen Fokussierung und persönlichen Orientierung im Rahmen der Bearbeitung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder, Leiter des Instituts Arbeitswissenschaften der Technischen Universität Darmstadt danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferats.

Ein ebenso großer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Michael Fischer, meinem Betreuer seitens Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH. Ohne Dein entgegengebrachte Vertrauen und die Unterstützung in allen Phasen der Bearbeitung, wäre die Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen der Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH und des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe für Ihren Beitrag zur vorliegenden Arbeit bedanken. Herausheben möchte ich hierbei Herrn Jörg Böttcher, Herrn Florian Rass, Herrn Jonathan Kreusel, Herrn Daniel Komorowski, Herrn Raja Vadamalu und Herrn Harun Zlojo. Ein weiterer Dank gilt meinen ehemaligen Student(innen) Frau Derya Karabulut, Herrn Benjamin Schön, Herrn Pascal Schlatter und Herrn Udaya Kumar Manogarane, welche mich durch ihre wissenschaftlichen Arbeiten unterstützt und somit die vorliegende Arbeit bereichert haben.

Mein ganz besonderer Dank in vielerlei Hinsicht gilt meinen Eltern. Eure fortwährende Unterstützung hat den Grundstein für meinen persönlichen Werdegang gelegt, ohne welchen das Erstellen einer solchen Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Zu guter Letzt möchte ich den wichtigsten Personen in meinem Leben danken, meiner Frau Anika und meinem Sohn Joshua. Euer Verständnis, eure Unterstützung, Liebe und Zuneigung haben das Vollenden dieser Arbeit ermöglicht. Ich danke euch von ganzem Herzen und entschuldige mich für die Entbehrungen, welche Ihr während der Bearbeitungszeit auf euch genommen habt.

Gründau, im Oktober 2020

Sebastian Barth

Abstract

The legal targets to stop global warming and reduce air pollution are one of the biggest challenges which politicians, society and economy face today. To achieve these ambitious targets fundamental reduction in CO₂- and pollutant emissions are required. As one of the main emission sources, the transport sector must contribute significantly to these targets. One important option to achieve these targets is the broad introduction of electrified and connected powertrains within private transport. The degrees of freedom of such systems enable a specific operation of the powertrain to avoid critical emission peaks and to enable high efficiency. Actual research and development results already show the high potential of such system to achieve today's and future regulation targets. However, a broad market introduction of these systems heavily depends on customers' acceptance. Against that context it is a valid question if we can assume that this acceptance is really given.

To answer this question it is necessary to analyze the interaction between driver and vehicle. Due to increasing degrees of freedom by electrified powertrains, it is possible that drivers cannot predict nor understand every powertrain reaction while driving. Confusion about the system status may lead to reduced comfort or reduced trust, which negatively impacts the acceptance against the system. As customers' evaluations are shaped by expectations, it is important to incorporate them into the development process to avoid the rejection of the technology.

Against that context, this thesis tasks the introduction of a user-based development method for electrified and connected powertrains. The basis of the development process is set by an analysis of the interaction between driver and vehicle. The analysis results in the definition of "*consistent powertrain behavior*" as a complementary development target to efficiency and emissions. The development process utilizes customer studies to gain a subjective rating about a certain powertrain behavior. A transformation process terms customers' expectations into scalable development targets and enables an alignment of perceived and measured powertrain behavior. The integration of this data into an evaluation logic offers a frontloading of customer ratings into the virtual development environment, which is of high importance within modern development processes. The combination of the presented tools with existing development principles for electrified and connected powertrains lead to a holistic user-based development process as core result of this thesis.

The applicability of the given measures is finally shown by three applications as part of a validation procedure. The used applications "Simulation", "Engine-in-the-Loop" and "Prototype" represent different phases of the development process for electrified and connected powertrains. The results of the validation finally show the potential of the user-based development process to increase the acceptance of the new technology while keeping the ambitions to achieve the regulation targets.

Kurzfassung

Die gesetzlichen Vorgaben zur Treibhausgasreduktion und zur Luftreinhaltung stellen Gesellschaft, Politik und Wirtschaft vor eine große Herausforderung. Zur Einhaltung der Vorgaben ist eine drastische Reduktion von CO₂- und Schadstoffemissionen notwendig. Dies betrifft insbesondere den Transportsektor, welcher einen der Hauptemittenten der genannten Emissionen darstellt. Eine Möglichkeit zur Erfüllung der Zielsetzungen stellt die breite Einführung elektrifizierter und vernetzter Antriebssysteme im Individualverkehr dar. Die Freiheitsgrade dieser Systeme ermöglichen das gezielte Vermeiden emissionskritischer Events sowie eine Maximierung der Gesamteffizienz. Forschungs- und Entwicklungsergebnisse belegen, dass eine Einhaltung aktueller und zukünftiger Gesetzgebungen zur Emissionsreduktion unter Nutzung dieser Antriebskonzepte möglich ist. Eine breite Marktdurchdringung der neuen Antriebstechnologien setzt jedoch die Akzeptanz seitens der Kunden voraus. Doch kann davon ausgegangen werden, dass diese Akzeptanz gegeben ist?

Eine Antwort auf diese Frage liefert eine Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. Aufgrund der Anzahl an Freiheitsgraden elektrifizierter Antriebe ist es möglich, dass nicht jede Reaktion des Antriebssystems vorhersehbar oder nachvollziehbar ist. Mangelndes Systemverständnis ist jedoch eine Ursache für Diskomfort und Misstrauen, welche zu verminderter Akzeptanz gegenüber der neuen Technologie führen kann. Da Kunden die Reaktion eines Antriebs auf Basis ihrer Erwartung bewerten ist es wichtig, diese im Rahmen des Entwicklungsprozesses zu berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund erstrebt die vorliegende Forschungsarbeit die Entwicklung einer nutzerbasierten Entwicklungsmethode für elektrifizierte und vernetzte Antriebe. Die Basis der Entwicklung bildet eine Analyse der Entstehungsprinzipien technologischer Akzeptanz. Aus dieser leitet sich die Definition von „*Konsistentem Antriebsstrangverhalten*“ ab. Diese umschreibt die kundenseitige Erwartungshaltung und stellt eine zusätzliche Anforderung im Entwicklungsprozess neuer Antriebssysteme dar. Die Basis zur Berücksichtigung dieser Anforderung im Rahmen des Entwicklungsprozesses stellen Probandenstudien dar. Sie ermöglichen eine subjektive Bewertung des Antriebsstrangverhaltens, welche auf der Erwartungshaltung basiert. Ein neuartiger Transformationsprozess korreliert die subjektive Bewertung der Probanden mit relevanten Größen des Antriebssystems. Die Überführung des Korrelationsergebnis in eine softwarebasierte Auswerterroutine ebnet den Weg zu einer nutzerbasierten Bewertung innerhalb der virtuellen Entwicklung neuer Antriebssysteme.

Die Eignung der nutzerbasierten Entwicklungsmethode wird abschließend anhand dreier Anwendungsbeispiele dargestellt. Die Anwendungsbeispiele „Simulation“, „Engine-in-the-Loop“ und „Prototyp“ repräsentieren hierbei unterschiedliche Phasen des Entwicklungsprozesses elektrifizierter und vernetzter Antriebe. Die Ergebnisse der Validierung verdeutlichen das Potenzial der nutzerbasierten Entwicklungsmethode zur Steigerung der Akzeptanz neuer Antriebstechnologien im Spannungsfeld Effizienz, Emissionen und Akzeptanz.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Abstract	6
Kurzfassung	7
Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Formelverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiii
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	2
1.1.1 CO ₂ Gesetzgebung.....	2
1.1.2 Emissionsgesetzgebung.....	4
1.1.3 Gesetzliche Prüfverfahren.....	7
1.2 Technologie Evolution im regulatorischen Kontext.....	10
1.3 Gliederung der Arbeit.....	16
2 Stand der Antriebstechnologie	18
2.1 Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion.....	18
2.1.1 Verbrennungsmotorische Konzepte.....	18
2.1.2 Elektrifizierung.....	25
2.1.3 Betriebsstrategien.....	35
2.2 Vernetzung.....	40
2.2.1 Fahrzeuggebundene Umgebungserfassung.....	41
2.2.2 Hochauflösende digitale Karten und Informationsaustausch.....	44
2.2.3 Relevanz für die Antriebsstrangentwicklung.....	47
2.3 Fahrbarkeit.....	52
2.3.1 Verständnis und Bedeutung von Fahrbarkeit.....	52

2.3.2	Ermittlung und Bewertung von Fahrbarkeit.....	54
2.3.3	Einfluss der Elektrifizierung	57
2.4	Entwicklungsmethoden.....	59
2.4.1	Entwicklungsmethoden für mechatronische Systeme.....	60
2.4.2	Entwicklungsprozesse für EVA	61
2.4.3	Nutzerorientierte Entwicklungsmethoden	65
3	Zielsetzung und Abgrenzung der Forschungsarbeit.....	69
3.1	Benennung der Forschungsziele.....	70
3.2	Abgrenzung der Forschungsarbeit.....	72
4	Akzeptanz elektrifizierter und vernetzter Antriebe	73
4.1	Fahrer-Fahrzeug-Interaktion	73
4.1.1	Beschreibung der Fahraufgabe.....	73
4.1.2	Regelkreis Fahrer-Fahrzeug	75
4.1.3	Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung.....	78
4.2	Einfluss durch Elektrifizierung und Vernetzung.....	81
4.2.1	Anpassung der 3-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe.....	81
4.2.2	Anpassung des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug	82
4.3	Modellbildung subjektiver Bewertung und Akzeptanz.....	83
4.3.1	Bewertungsprinzipien technischen Verhaltens.....	83
4.3.2	Bildung von Akzeptanz	86
4.3.3	Kriterien zur Bildung von Akzeptanz gegenüber EVA	89
4.4	Konsistentes Antriebsstrangverhalten.....	90
4.4.1	Versuchsdesign und Versuchsdurchführung.....	91
4.4.2	Versuchsauswertung und Ergebnisanalyse.....	95
4.4.3	Definition „Konsistentes Antriebsstrangverhalten“	104
5	Ganzheitliche nutzerbasierte Entwicklungsmethode.....	105
5.1	Anforderungsanalyse anhand bestehender Methoden.....	105
5.2	Beschreibung des nutzerbasierten Ansatzes	107
5.3	Beschreibung der Nutzer Module.....	110
5.3.1	NM 1 - Erfassung der subjektiven Bewertung.....	110
5.3.2	NM 2 - Objektivierungsmethode und Fahrzeugcharakteristika	115

5.3.3	Einfluss durch Vorwissen und Vorerfahrung.....	124
5.3.4	NM 3 - Digitalisierung der Charakterisierung.....	131
5.3.5	Integration zu einer ganzheitlichen Entwicklungsmethode	140
6	Anwendung der nutzerbasierten Entwicklungsmethode.....	141
6.1	Anwendungsbeispiel „Simulation“.....	142
6.1.1	Systembeschreibung und Simulationsumgebung.....	142
6.1.2	Systemfunktion und Effizienzanalyse.....	145
6.1.3	Nutzerbasierte Bewertung und Konzeptauswahl.....	148
6.2	Anwendungsbeispiel „Engine-in-the-Loop“	152
6.2.1	Optimierungsstrategie und Prüfstandsumgebung	152
6.2.2	Optimierungsergebnis und Prädiktionshorizontanalyse	155
6.2.3	Nutzerbasierte Bewertung und Parametrierung.....	157
6.3	Anwendungsbeispiel „Prototyp“.....	163
6.3.1	Zielsetzung, Systemauslegung und Effizienzanalyse.....	163
6.3.2	Standardisierte Analyse der Fahrbarkeit	167
6.3.3	Nutzerbasierte Bewertung des Antriebsstrangverhaltens	170
7	Erweiterungspotential und Beschränkungen	175
7.1	Einbindung von alternierendem Motorverhalten.....	175
7.1.1	Beschreibung und Messung der Schaltverzögerung.....	177
7.1.2	Charakterisierung der Schaltverzögerung	178
7.2	Relevanz der akustischen Wahrnehmung des Motors	181
7.2.1	Entkopplung von Lautstärke und Motordrehzahl.....	181
7.2.2	Methodische Beschreibung der Lautstärke als Unsicherheit.....	184
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	186
Anhang.....		190
A	Probandenversuche zu Konsistentem Verhalten	190
A.1	Versuchsfahrzeuge Probandenstudien Konsistenz.....	190
A.2	Fragebögen Probandenstudie	191
A.3	Interferenzstatistische Analyse der Probandenversuche.....	193
A.4	Qualitative Inhaltsanalyse der Kommentare	196
A.5	t-Test für Bewertung und Kaufintention.....	202

A.6	Inhaltsanalyse Lautstärke und Beschleunigung	204
B	Nutzerbasierte Entwicklungsmethodik.....	206
B.1	Regressionsanalyse Referenzfahrzeug.....	206
B.2	Signifikanztest zwischen 1. und 2. Versuch	209
B.3	Vergleich Fahrzeugcharakteristika 1. und 2. Versuch	216
B.4	Einzelergebnisse Probanden für 10 Iterationen	218
B.5	Fuzzy Sets Beschleunigung und Bewertung des P-Hybrids.....	220
B.6	Vergleich der Fahrzeugdaten von P ₂ -Hybrid und P-Hybrid.....	223
C	Anwendung der nutzerbasierten Entwicklungsmethode.....	224
C.1	Spezifikationen Basisfahrzeug zur Simulation	224
C.2	Engine-in-the-Loop Prüfstandsumgebung	224
C.3	Partikelentstehung bei Lastsprüngen.....	225
C.4	Einfluss der Prädiktion auf das Betriebsverhalten	226
C.5	Fahrbarkeitsanalyse im Fahrversuch „Volllast“	227
D	Erweiterung und Beschränkungen der Methode	228
D.1	Fragebögen Probandenversuche „Anschaltverzögerung“.....	228
D.2	Darstellungsformen der „Anschaltverzögerung“	229
	Literaturverzeichnis.....	230