

Methodik und Tools zur Betriebsstrategieentwicklung für Performance-Hybride

Tim Martini¹, Florian Winke², Manuel Arnold³, Jochen Schmitz³,
Michael Auerbach¹, Michael Bargende⁴, André Casal Kulzer⁴
Mail: tim.martini@hs-esslingen.de

¹Labor Fahrzeugantrieb,
Hochschule Esslingen,
Kanalstraße 33, 73728 Esslingen a.N.

³Betriebsstrategieentwicklung,
Mercedes-AMG GmbH,
Daimlerstraße 1, 71563 Affalterbach

²Betriebsstrategieentwicklung,
Mercedes-Benz AG,
Mercedesstraße 120, 70372 Stuttgart

⁴Lehrstuhl Fahrzeugantriebssysteme,
IFS Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 12, 70569 Stuttgart

Abstract: Die im Zuge der Elektrifizierung des Antriebsstrangs entstehenden Freiheitsgrade des Gesamtsystems steigern die Komplexität der Applikation und der Absicherung der Betriebsstrategie von Performance-Hybriden. Im heutigen Produktentwicklungsprozess entsteht hierdurch ein Spannungsfeld in der Phase der Fahrzeugerprobung. Eine hinzukommende Verkürzung der Entwicklungszeiten erhöht die Herausforderung. Es gilt, ein komplexeres Gesamtsystem in kürzerer Zeit zu applizieren und abzusichern. Zur Erhaltung der Softwaregüte wird eine neue Entwicklungsmethodik benötigt. Basierend auf dem heutigen Vorgehen wird eine Methodik zur kontinuierlichen Anpassung der Betriebsstrategie an den Einsatz im Fahrzeug entworfen. Hierzu wird eine SiL-Umgebung als Brückenwerkzeug zwischen der Funktionsdefinition und der Applikation im Fahrzeug implementiert. Werkzeuge zur automatisierten Optimierung und Messdatenauswertung werden durch eine Datenbank und automatisierte Uploadroutinen ergänzt. Die Fahrzeugerprobung im Straßenversuch wird durch ein digitales und prüfstandsbasiertes Robustheitstesten erweitert.

1 Aktueller Entwicklungsprozess Betriebsstrategie

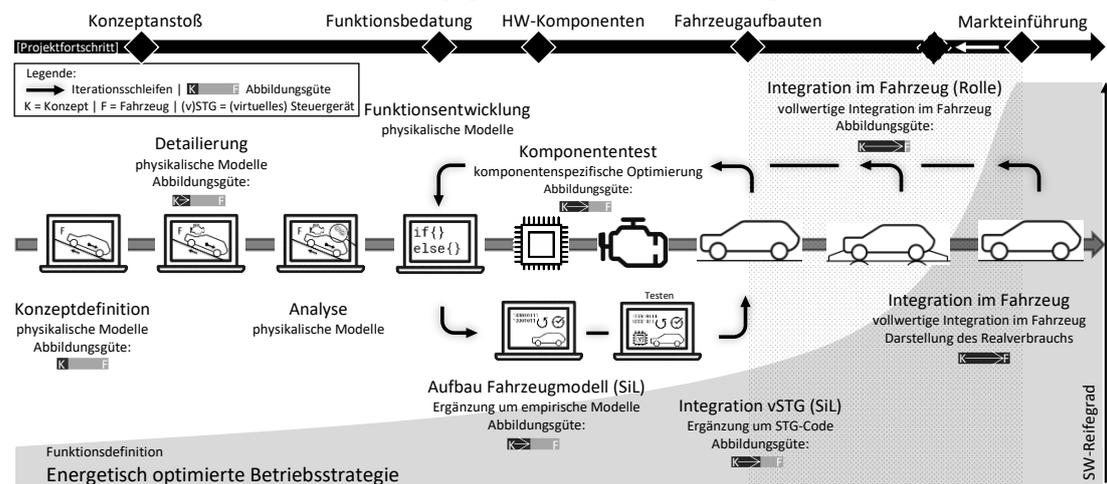
Zur Einordnung der neu entworfenen Methodik in den Produktentwicklungsprozess (PEP) beschreibt dieser Abschnitt das heutige Vorgehen (vgl. Abbildung 1) und visualisiert die Notwendigkeit sowie den Vorteil der neuen Methodik anhand des in den Abbildungen schematisch dargestellten Software (SW) -Reifegrads.

Zur Definition des Konzeptentwurfs mit der Bestimmung der Antriebsstrangkonfiguration und der Dimensionierung der Aggregate werden verschiedene Methoden eingesetzt [Ba15, Ha17]. Im weiteren Verlauf des PEP erfolgen eine Analyse des Systems, der Entwurf der Betriebsstrategie-Funktionen und die Ermittlung des energetisch optimalen Betriebs unter der Verwendung von Optimierungsrechnungen [Gö15, BF17]. Die erzeugten Initialbedatungen entsprechen einem energetisch idealisierten Betrieb des Systems, wodurch Wechselwirkungen verschiedener Gewerke und Fahrbarkeitseinflüsse lediglich in geringem Maße berücksichtigt sind. Um den bekannten Fahrkomfort moderner Fahrzeuge zu erfüllen, bedarf die energetisch optimierte Betriebsstrategie weiterer Anpassungen. Zur

Bestimmung der Anpassungen und zur Überprüfung der Funktionalität der Betriebsstrategie werden weitere Komponenten im Fahrzeug, wie die Steuerung des Verbrennungsmotors, die Steuerung der elektrischen Maschine(n), das Batteriemanagementsystem und auch die Fahrdynamikregelung, benötigt [ADO08].

Sind im Verlauf des Projekts erste Hardware (HW) -Aufbauten einzelner Aggregate verfügbar, erfolgen bevorzugt komponentenspezifische Optimierungen auf dem Prüfstand [Du18, MIP19]. Anhand empirisch ermittelter Streckenmodelle werden parallel zu den Komponententests Software-in-the-Loop (SiL) -Modelle aufgebaut, um mittels virtuellen Steuergeräten die Betriebsstrategie vor dem Einsatz im Fahrzeug zu testen.

Da die Abbildungsgüte und Verfügbarkeit sämtlicher Steuerungen und auch die Abbildung der Aggregate im Fahrzeug selbst am besten gewährleistet werden, beginnt mit dem Meilenstein der Fahrzeugaufbauten der Applikations- und Absicherungsprozess für das Gesamtsystem [Du18]. Dieser beinhaltet, nach bestandener Testdurchführung in der SiL-Umgebung, eine Inbetriebnahme im Fahrzeug, die Emissionierung auf Rollenprüfständen und die Fahrbarkeitsapplikation im Straßenversuch [Du18, MIP19]. Der aktuelle Entwicklungsprozess ist in Abbildung 1 visualisiert.



Abbildung¹: Schematische Visualisierung der heutigen Methodik zur Betriebsstrategieentwicklung über den Produktentwicklungsprozess

Der schraffierte Bereich der Fahrzeugprüfung visualisiert das durch die Hybridisierung und durch die Verkürzung der Entwicklungszeiten entstehende Spannungsfeld. Um den Software-Reifegrad in dieser Phase des Projekts im dargestellten Umfang zu steigern, bedarf es einer ressourcenintensiven Entwicklungsarbeit. Zur Reduktion des Ressourceneinsatzes in zukünftigen Projekten wird eine an hybride Antriebsstränge angepasste Entwicklung benötigt [MIP19, Vo22, Va21].

Die Funktionen und Bedatungen der energetisch optimierten Betriebsstrategie definieren die Basis des Software-Reifegrads und dienen der im Folgenden vorgestellten neuen Methodik als Aufsatzpunkt. Der Schwerpunkt der neuen Methodik liegt auf der Anpassung der Initialbedatung der energetisch optimierten Betriebsstrategie hin zur Verwendung im Fahrzeug und auf einer Absicherung der

¹ Die in den Abbildungen enthaltenen Piktogramme wurden teilweise mit Bildzeichen von [ic22] entworfen.

Funktionen und Bedatungen. Es soll eine Brücke zwischen der Funktionsentwicklung und dem Einsatz im Fahrzeug gebildet werden, um die Betriebsstrategie kontinuierlich an den Einsatz im Fahrzeug anzupassen und zu optimieren.

2 Methodik zur kontinuierlichen Optimierung der Betriebsstrategie

Aus verschiedenen Veröffentlichungen sind Entwicklungsmethoden basierend auf X-in-the-Loop (XiL) -Setups bekannt. Die Anwendungsmöglichkeiten der Veröffentlichungen variieren dabei von komponentenspezifischen Optimierungen bis hin zu ganzheitlichen Entwicklungsansätzen. Während die Veröffentlichungen [ADO08, Du10] die Verlagerung von Entwicklungstätigkeiten vom Straßenversuch hin zu Prüfständen beschreiben, wird die Methodik in [Sc13] um die Möglichkeit der Optimierungsrechnung erweitert und in [Ma16] eine durchgängige Validierung anhand von konsistenten Modellen und Optimierern integriert. Weitere Veröffentlichungen [KMB14, MKB15, MMG19, MIP19] nutzen ebenfalls XiL-Setups zur Applikation und Optimierung verschiedener Fahrzeugfunktionen sowie durchgängige digitale Applikationsumgebungen. In [Va21, Ki20, Jo18] wird die Nutzung einer SiL-Umgebung zur digitalen Applikation erläutert.

In [He20] werden Anpassungen der bekannten DevOps [HPJ20] -Prozesse im Sinne der kontinuierlichen Integration im Bereich der Antriebssoftwareentwicklung vorgestellt. Ein weiterer Ansatz nutzt zur Abstimmung der Soft- und Hardware eine kombinierte Methodik aus XiL-Setups und dem Prozess der kontinuierlichen Integration [Vo22].

2.1 Einordnung in den Produktentwicklungsprozess

Basierend auf dem in Abbildung 1 dargestellten Prozess rückt die SiL-Umgebung in den Mittelpunkt der Entwicklungsaktivitäten. Die SiL-Implementierung als Brückenwerkzeug ermöglicht es, die Betriebsstrategie virtuell zu testen, auf Querwirkungen zwischen Gewerken zu untersuchen und Optimierungen am Zielsystem selbst durchzuführen [Va21, Jo18]. Somit besteht die Möglichkeit Parameter und Funktionen frühzeitig in der SiL-Umgebung zu kalibrieren und zu optimieren.

Die physikalische Modellbildung wird weiterhin zur Funktionsentwicklung und zusätzlich in frühen Phasen des Projekts zur Bedatung der generischen Streckenmodelle der SiL-Umgebung genutzt. Die vorhandenen Modelle und virtuellen Steuergeräte können über die SiL-Nutzung hinaus auf XiL-Umgebungen an Prüfständen zur Restbussimulation verwendet werden [Ma16, Du18]. Außerdem werden die Komponentenprüfstände verstärkt durch Antriebsstrangprüfstände ergänzt, um möglichst frühzeitig die Interaktion der Gewerke in Hardware abzubilden.

Zusätzlich werden zur Systematisierung der Inbetriebnahme neuer Funktions- und Datenstände Fahrzeugantriebsstrangprüfstände in die Methodik implementiert. Die Emissionierung und finale Fahrbarkeitsapplikation wird weiterhin auf dem

Rollenprüfstand und im Straßenversuch durchgeführt. Insgesamt wird über den gesamten PEP eine hohe SiL-Nutzung zur digitalen Reifegradsteigerung angestrebt. Abbildung 2 visualisiert die neu entworfene Methodik zur Betriebsstrategieentwicklung.

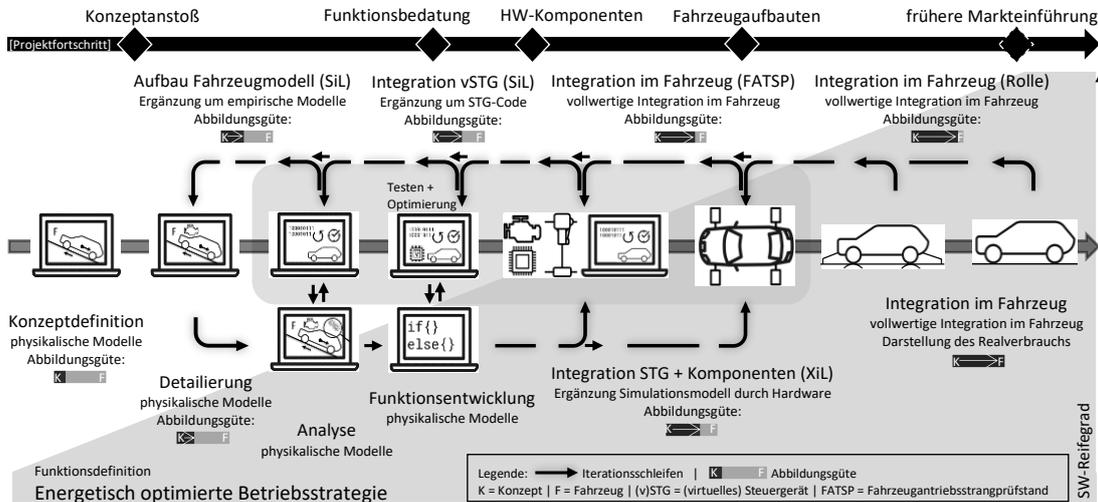


Abbildung 2: Schematische Visualisierung der neu entwickelten Methodik zur Betriebsstrategieentwicklung über den Produktentwicklungsprozess

Durch das frühzeitige sowie kontinuierliche Testen und Optimieren wird ein möglichst konstanter Reifegradanstieg über dem PEP ermöglicht. Hierdurch können das heutige Spannungsfeld in der Phase der Fahrzeugerprobung gelöst, Fehler in der Software möglichst früh und effizient erkannt und der Straßenversuch ausschließlich zur Feinapplikation genutzt werden.

Zur Umsetzung der Methodik werden die drei Kategorien Testen, Auswertung und Optimierung betrachtet. Im Folgenden wird auf die Detaillierung dieser eingegangen.

2.2 Testen, Auswertung und Optimierung

Da die Komplexität der Steuerung und Regelung eines Hybridfahrzeugs einen hohen Aufwand beim Testen und Kalibrieren mit sich bringt, ist ein hoher Automatisierungsgrad in der Entwicklung wichtig, um für nicht automatisierbare Prozesse genügend Kapazität vorzuhalten [He20]. In der vorgestellten Entwicklungsmethodik werden durchgehend ein hoher Automatisierungsgrad und eine hohe Anzahl an Iterationen angestrebt (vgl. Abbildung 2).

Testen: Die Entwicklungsmethodik nutzt die kontinuierliche Integration und das damit verbundene kontinuierliche Testen. Bereits heute sind Regressionstests im Entwicklungsprozess implementiert. Eine neu entworfene Funktion wird vor der Integration auf Komponentenebene gegenüber den definierten Anforderungen auf deren Erfüllung getestet. Des Weiteren wird auf Systemebene geprüft, ob die Systemfunktionalität wie gewünscht vorhanden ist. Somit wird ein Testen auf verschiedenen Ebenen gewährleistet [HPJ20, Wi16]. Im Rahmen der neuen Methodik wird die Nutzung der vorhandenen Test-Prozesse ausgebaut und intensiviert.

Erweitert werden die vorhandenen Tests durch eine kontinuierliche, systematische Robustheitserprobung auf Systemebene, die als Fehlerfindungstool dient. Die Basis zur Umsetzung bilden Kundenbelastungskollektive. Die Kollektive werden mittels einer Rasterung in Kategorien eingeteilt. Anhand einer zu definierenden Methode werden Kategorien verschiedener Kollektive kombiniert und mittels eines Zyklengenerators [Li17] Fahrprofile erzeugt. Die Fahrprofile bilden bspw. eine Fahrdynamikkategorie unter variierenden Randbedingungen ab. Durch die systematische Generierung von Fahrprofilen, die auf Anforderungen aus dem Serienbetrieb basieren, wird es ermöglicht, den späteren Betrieb abzubilden und in SiL-Simulationen sowie auf Prüfständen zu erproben. Somit kann potentiell Fehlverhalten des Systems vor dem Einsatz im Fahrzeug detektiert werden. Zusätzlich wird eine umfassendere Erprobungsdurchdringung der Software ermöglicht.

Durch einen hohen Automatisierungsgrad und die Vielzahl der damit möglichen Iterationsschleifen und Tests kann die Handhabbarkeit der erzeugten Datenmenge zu einer Herausforderung werden [Ab16a]. Um dieser Thematik zu begegnen, wird die Methodik um die notwendigen Werkzeuge und Prozesse zur Durchführung standardisierter Auswertungen ergänzt.

Auswertung: Um große Datenmengen, die durch die angestrebte Kontinuität erzeugt werden, automatisiert auszuwerten, wird eine Datenbank als zentrales Werkzeug implementiert. Die notwendige Infrastruktur ist bereits zur Verarbeitung von Messungen aus der Kundennahenfahrerprobung vorhanden.

Im Rahmen der neuen Methodik werden über die heutige Nutzung hinaus Simulationsergebnisse, Prüfstands- und Fahrzeugmessungen archiviert. Die Implementierung einer Datenbank ermöglicht über die Datensicherung hinaus die Nutzung von Big-Data-Tools [Ab16b]. Diese bieten u.a. den Vorteil der automatisierten Berechnung großer Datenmengen in einer dafür ausgelegten Infrastruktur. Es entsteht die Möglichkeit, eine hohe Anzahl an Messungen durchzuführen und durch die Nutzung standardisierter Auswertungen bewerten zu können [Ju19, PFE19].

Zur Zuordnung und Definition von Messungen werden Metadaten, wie bspw. die Fahrzeugidentifikationsnummer und der Softwarestand der Aufzeichnung, mit der zugehörigen Messdatei verknüpft. In der darauffolgenden Werkzeugkette werden die Metadaten sowie die Messungen an Auswerteroutinen übergeben. Diese berechnen definierte Kenngrößen, welche anschließend zusammen mit den Zeitschrieben der Messdateien in einer Datenbank gespeichert werden.

Durch die Speicherung sämtlicher Zeitsignale und berechneter Kenngrößen ergeben sich mehrere Vorteile: Zum einen können Messungen ereignisbasiert ausgewählt werden, zum anderen können standardisierte Auswertungsvisualisierungen ohne erneute Berechnung genutzt werden. Darüber hinaus können Simulationen, Prüfstands- und Fahrzeugmessungen aus einer konsistenten Datenbasis ausgewertet und verglichen werden.

Ergänzend zum automatisierten Testen und Auswerten wird als dritte Kategorie der Methodik die Optimierung von Bedatungen der Betriebsstrategie-Funktionen betrachtet.

Optimierung: Um die notwendigen Anpassungen der Initialbedatungen zu ermöglichen, wird eine Methode zur Optimierungsrechnung unter Verwendung der Fahrzeugsoftware implementiert. Die Infrastruktur der Optimierungswerkzeuge besteht bereits heute und wird im Rahmen der neuen Methodik intensiviert genutzt und angepasst – als Optimierungsalgorithmus dient ein Partikelschwarmoptimierer [Sa10], als Optimierungsumgebung dienen skalierbare SiL-Konfigurationen. Hierbei bietet die SiL-Umgebung folgende Hauptvorteile [Jo18]:

- Abbildung anderer Gewerke
- Abbildung komplexer Fahrzeug-Software

Die Optimierungsrechnungen in der SiL-Umgebung werden als nachgelagerte Anpassungen der energetisch optimierten Betriebsstrategie (Initialbedatung) genutzt. Diese ist hierbei mittels eines ECMS²-Ansatzes bestimmt (vgl. [Gö15]). Ziel ist es, die Bedatung im Rahmen einer automatisierten, digitalen Applikation an die Anwendung im Fahrzeug anzupassen. Zur Veranschaulichung des Potentials für die Betriebsstrategieentwicklung wird im Folgenden das Ergebnis (vgl. Abbildung 3) eines ersten Arbeitsstands der digitalen Applikation der Steuerung der elektrischen Fahrt in Form eines Vergleichs der Initial- und der angepassten Bedatung aufgezeigt.

Diagramm A zeigt den normierten Ladezustand der Traktionsbatterie über den Zyklus sowie das simulierte Geschwindigkeitsprofil. In Diagramm B ist die Anzahl der Zustarts auf der linken und der normierte Kraftstoffverbrauch auf der rechten Ordinate abgetragen. Diagramm C visualisiert die Zustände (an/aus) des Verbrennungsmotors in einem Ausschnitt des WLTC³. Die Initialbedatung resultiert hierbei in einem unerwünscht häufigen Wechseln zwischen der rein elektrischen und der hybriden Fahrt. Zur Anpassung dieses Verhaltens wird in der Optimierungsrechnung eine Reduktion der Zustarts angestrebt. Die Zielfunktion wird dafür aus zwei Kenngrößen gebildet:

- Fahrbarkeit
- Kraftstoffverbrauch

Zur Verrechnung werden die Werte auf eine Referenzmessung normiert. Die Fahrbarkeitskenngröße repräsentiert die Quantität der Zustarts und die Zeit ohne Zustandswechsel. Als Randbedingung wird ein ausgeglichener Ladezustand der Traktionsbatterie vorgegeben.

Die Optimierungsmethode ermöglicht bereits unter Verwendung der anfänglichen Zielfunktion eine Reduktion der Zustarts um ca. 15 %. Für den Kraftstoffverbrauch ergibt sich eine minimale Änderung (< 1 %), ohne dabei eine Abweichung vom End-Ladezustand der Traktionsbatterie (< 5 Wh) zu bewirken. Im aufgezeigten Abschnitt des WLTC werden die Zustarts unter Last reduziert, wodurch längere Phasen rein elektrischer Fahrt erreicht werden. Zur Kompensation der benötigten elektrischen Energie erfolgen zu Beginn des Zyklus zwei zusätzliche Zustarts (vgl. Diagramm B). Durch die Verwendung der Fahrzeugsoftware zur Optimierungsrechnung können die erzeugten Bedatungen direkt im Fahrzeug angewandt werden, ohne dabei Einflüsse

² Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)

³ Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC)

durch vereinfachte Nachbildungen der Steuerungen in der Simulation berücksichtigen zu müssen.

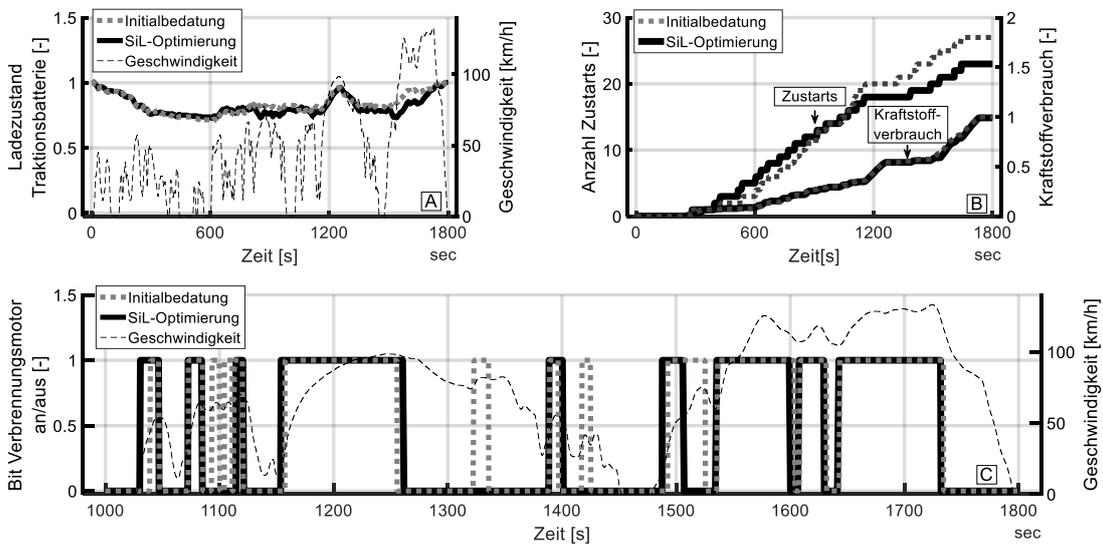


Abbildung 3: Ergebnisse des aktuellen Arbeitsstands der automatisierten, digitalen Applikation der Steuerung der elektrischen Fahrt

Neben dem Potential für die Betriebsstrategieentwicklung ergeben sich bei der SiL-basierten Optimierungsrechnung auch Herausforderungen. Um möglichst robuste Bedatungen zu erzeugen, bedarf es einer breiten Basis an Betriebspunkten, sodass Kennfeldpunkte unter variierenden Randbedingungen berücksichtigt werden. Des Weiteren gilt es, einen methodischen Übertrag der subjektiven Empfindungen der manuellen Applikation in die Zielfunktion zu ermöglichen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Betrachtung des Spannungsfelds in der Phase der Fahrzeugerprobung verdeutlicht die Notwendigkeit einer neuen Methodik zur Betriebsstrategieentwicklung. Basierend auf der heutigen Vorgehensweise wird eine neue Methodik zur kontinuierlichen Anpassung der Betriebsstrategie an den Einsatz im Fahrzeug entworfen. Um sowohl das Testen als auch die Optimierung in einer konsistenten fahrzeugnahen Umgebung zu ermöglichen, wird eine SiL-Umgebung als Brückenwerkzeug gewählt. Der Fokus liegt auf der Umsetzung einer simulativen und prüfstands-basierten Robustheits-erprobung der Software sowie einer automatisierten, digitalen Applikation. Um die Grundsätze der Automatisierung und Kontinuität erfolgreich umsetzen zu können, wird eine Datenbank als Basis für Auswerteroutinen implementiert. Zur Veranschaulichung des Potenzials der automatisierten Applikation ist exemplarisch ein Arbeitsstand der Kalibrierung der elektrischen Fahrt aufgezeigt. Im Rahmen der aktuellen Forschungsarbeit wird die beschriebene Vorgehensweise exemplarisch anhand ausgewählter Betriebsstrategie-Funktionen im PEP angewandt.

Literaturverzeichnis

- [Ab16a] Abthoff, T.: Big-Data-Technologien in der Fahrzeugentwicklung. ATZelektronik 5/11, S. 44–51, 2016.
- [Ab16b] Abthoff, T.: Interaktive Big-Data-Analytik in der Motorenentwicklung. MTZ - Motortechnische Zeitschrift 12/77, S. 62–67, 2016.
- [ADO08] Albers, A.; Dueser, T.; Ott, S.: X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebsystemen. 8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation, 16./17. September 2008, Kassel, Germany, 2008.
- [Ba15] Balazs, A.: Optimierte Auslegung von Hybridantriebsträngen unter realen Fahrbedingungen. Dissertation, Aachen, 2015.
- [BF17] Böhme, T. J.; Frank, B.: Hybrid Systems, Optimal Control and Hybrid Vehicles. Theory, Methods and Applications. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [Du10] Dueser, T.: X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Karlsruhe, 2010.
- [Du18] Dudin, N. et al.: Validierung und Kalibrierung von Fahrzeugbetriebsstrategien auf Basis des IPEK-XiL-Ansatzes. In (Liebl, J.; Beidl, C. Hrsg.): Simulation und Test 2017. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 28–45, 2018.
- [Gö15] Görke, D.: Untersuchungen zur kraftstoffoptimalen Betriebsweise von Parallelhybridfahrzeugen und darauf basierende Auslegung regelbasierter Betriebsstrategien. Dissertation. Springer Fachmedien Wiesbaden, Stuttgart, 2015.
- [Ha17] Haag, A.: Konzepte für effiziente hybride Triebstränge. Dissertation. Springer Fachmedien Wiesbaden, Stuttgart, 2017.
- [He20] Heß, D. et al.: Continuous integration in powertrain software – Today and tomorrow. In (Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wagner, A. Hrsg.): 20. Internationales Stuttgarter Symposium. Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, S. 545–555, 2020.
- [HPJ20] Halstenberg, J.; Pfitzinger, B.; Jestädt, T.: DevOps. Ein Überblick. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.
- [ic22] icons8: icons8. <https://icons8.de/>.
- [Jo18] Jordan, Y. et al.: Virtuelle Motorsteuergeräte im Entwicklungsprozess bei Renault. ATZelektronik 5/13, S. 40–45, 2018.
- [Ju19] Jung, C. G. et al.: Signalverarbeitung - Big Data und Digitale Zwillinge beschleunigen die Erprobungsphase. ATZelektronik 6/14, S. 38–43, 2019.

- [Ki20] Kistner, B. et al.: Die digitale Antriebsentwicklung der Zukunft: ganzheitlich, systematisch und kundenzentriert. In (Liebl, J. Hrsg.): Experten-Forum Powertrain: Simulation und Test 2019. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 1–14, 2020.
- [KMB14] Kluin, M.; Maschmeyer, H.; Beidl, C.: Entwicklungsmethodik für Hybridfahrzeuge mit vernetzter Betriebsstrategie. *ATZextra* 1/19, S. 76–81, 2014.
- [Li17] Liessner, R. et al.: Generation of Replacement Vehicle Speed Cycles Based on Extensive Customer Data by Means of Markov Models and Threshold Accepting. *SAE International Journal of Alternative Powertrains* 1/6, S. 165–173, 2017.
- [Ma16] Matros, K.: Entwicklung von Hybridantriebssystemen auf Basis des Pull-Prinzips der Validierung und des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes. Dissertation, Karlsruhe, 2016.
- [MIP19] Meyer, S.; Isaac, P.; Putzmann, F.: Der virtuelle Applikationsarbeitsplatz als Schlüssel zur modellbasierten Systemintegration für effiziente Serienentwicklung in der Antriebsstrangentwicklung. In (Liebl, J. Hrsg.): *Simulation und Test 2018*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 188–212, 2019.
- [MKB15] Maschmeyer, H.; Kluin, M.; Beidl, C.: Real Driving Emissions — Ein Paradigmenwechsel in der Entwicklung. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 2/76, S. 36–41, 2015.
- [MMG19] Mayra, C. et al.: Test emissionsrelevanter Fahrzyklen auf dem Motorprüfstand. In (Liebl, J. Hrsg.): *Simulation und Test 2018*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 113–131, 2019.
- [PFE19] Pohorec, S.; Frank, P.; El Salloum, C.: Mit Big Data Analytics wertvolle Erkenntnisse gewinnen. *ATZextra* S8/24, S. 32–36, 2019.
- [Sa10] Sauermaun, R. et al.: *Particle Swarm Optimization for Automotive Model-Based Calibration*, 2010.
- [Sc13] Schroeter, J.: Das erweiterte X-in-the-Loop-Framework zur durchgängigen Integration von Optimierungsverfahren in den Produktentwicklungsprozess am Beispiel der Entwicklung energieeffizienter Fahrzeuge. Dissertation, Karlsruhe, 2013.
- [Va21] Vahldiek, M.: Einsatz einer Software-in-the-Loop-Umgebung zur virtuell gestützten Applikation des Motorstarts eines hybriden Ottomotors. In (Liebl, J. Hrsg.): *Experten-Forum Powertrain: Simulation und Test 2020*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2021.
- [Vo22] Vollmer, D. et al.: Transformation des Antriebsstrangs - Kontinuierliche Integration und X-in-the-Loop-Testing für xEVs. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 5/124, S. 16–21, 2022.
- [Wi16] Witte, F.: *Testmanagement und Softwaretest*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016.