

Robustheitsanalyse einer Längsdynamiksimulation auf Basis verschiedener Qualitätskriterien

M. Eng. Sven Cortès ^{1*}, Prof. Dr.-Ing. Christian Dettmann ¹,

B. Eng. Julian Heib ¹, B. Eng. Felix Millberg ¹

¹Technische Hochschule Ulm, Prittwitzstraße 10, 89075 Ulm, Germany; *Sven.Cortes@thu.de

Abstract. Der Einsatz von simulationsbasierten Entwicklungsansätzen hat durch den rasanten Anstieg gesetzlicher Vorgaben und Fahrzeugfunktionen stark zugenommen. Um das Potential der virtuellen Antriebsstrangentwicklung zu demonstrieren, wird eine Längsdynamiksimulation am Beispiel des vollelektrischen BMW i3 modelliert. Zur Validierung der Fahrzeugmodellierung wird ein Manöverkatalog entworfen, der als Grundlage für diverse Referenzfahrten auf einem Rollenprüfstand dient. Die geschwindigkeitsabhängige Nullmomenten-Fahrpedalstellung ist der Kern der Einpedalstrategie („One-Pedal-Driving“) und die zu analysierende Trennlinie zwischen Zug- und Schubbetrieb des Versuchsfahrzeuges. Nach der Validierung wird das bestehende Modell einer numerischen Robustheitsbewertung, in Form von verschiedenen Beladungen, unterzogen. Des Weiteren wird die Genauigkeit auf Grundlage einer statistischen Bewertung, wie auch Grenzen der Simulation, untersucht. Zum Abschluss wird ein Ausblick auf eine mögliche Erweiterung der Modellierung geworfen.

Schlüsselwörter: Längsdynamiksimulation, Manöverkatalog, One-Pedal-Driving, Rollenprüfstand, Robustheitsanalyse

Einleitung

Das vom Europäischen Parlament verabschiedete Emissionsziel sieht vor, bis 2030 eine Absenkung der CO₂-Emissionen für Neufahrzeuge um 37,5 % gegenüber 2021 zu erreichen. [1, S. 22] Diese Situation hat die Entwicklung von alternativen Antrieben und die Elektrifizierung vorangetrieben.

Zugleich steht die elektrische Antriebsstrangentwicklung in der Automobilindustrie vor großen Herausforderungen. Hervorgehoben werden diese durch

zunehmend kürzere Entwicklungszyklen und eine gestiegene Derivateanzahl. Parallel dazu erschweren die, mit der Abgasnorm Euro 6c eingeführten, Real-Driving-Emissions-Tests (RDE) den Entwicklungsprozess zusätzlich. [2, S. 13]

RDE erfordert eine grundlegend neue Form der Entwicklung. Es wird davon ausgegangen, dass es einen Wechsel von einer Kennfeldbereichs- hin zu einer Eventoptimierung gibt. Grund dafür ist nicht allein der erweiterte Kennfeldbereich, sondern besonders auch die transienten Events, wie Lastsprünge, Motorstarts oder aktivierte Nebenverbraucher. Um sich speziell auf solche Events in der Entwicklung vorzubereiten, muss ein Umdenken von einer zyklusbasierten hin zu einer manöverbasierten Vorgehensweise passieren. [2, S. 5] Speziell das manöverbasierte Testen führt zu frühzeitigen und über den Prozess hinweg konsistenten Aussagen über das Verbrauchs- und Reichweitenverhalten eines elektrischen Antriebsstrangs unter Realfahrbedingungen. [2, S. 15]

Um die Validierung und Absicherung von Entwicklungszielen in einem solch komplexen Umfeld zu gewährleisten, erfordert es den Einsatz simulationsgestützter und automatisierbarer Verfahren zur gezielten Variation der Testrandbedingungen. Die Verknüpfung eines virtuellen Fahrzeugmodells mit einer Prüfstandsregelung ist im Bereich der Antriebsstrangentwicklung am Institut für Produktentwicklung (IPEK) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bereits etabliert. Der dort definierte X-in-the-Loop (XiL) Ansatz, der sich auf Antriebssysteme spezialisiert, beschreibt eine durchgängige Vorgehensweise der Entwicklung auf verschiedenen Systemebenen. [3] Dieses Vorgehen erlaubt eine Teilvalidierung des Gesamtsystems zu einem sehr frühen Zeitpunkt im

Produktentstehungsprozess. Es ist hierbei auch vom Pull-Prinzip der Validierung die Rede, bei der eine Parallelisierung der primären und sekundären Validierungsaktivitäten stattfindet. [4, S. 556]

Voraussetzung ist eine genaue Modellbildung der Gesamt- und Teilsystemen. Eine Verknüpfung mit Referenzmanövern und Umweltbedingungen ist durch den XiL-Ansatz gegeben. Mittels eines Validierungsziels, welches mit einem Validierungsbedarf einhergeht, werden entsprechende Kriterien und die dazugehörigen Manöver gebildet. [5] Durch manöverbasiertes Validieren der einzelnen Komponenten bzw. Teilsysteme lässt sich ein Minimum an Ressourcen- und Zeitaufwand erzielen.[6, S. 537-544]

1 Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit am Automotive Center des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (IFS) an der Technischen Hochschule Ulm (THU) wird eine Längsdynamiksimulation eines elektrischen Antriebsstranges aufgebaut. Als Versuchsträger für die spätere Modellierung dient der vollelektrische BMW i3 (2014). Mit Hilfe dieses Fahrzeugs wird das Simulationsmodell validiert, indem Referenzfahrten auf einem Rollenprüfstand durchgeführt werden.

1.1 Modellierung des elektrischen Antriebsstranges

Bei dem im IFS bereitgestellten Versuchsfahrzeug, handelt es sich um ein Vorserienfahrzeug der ersten Modellreihe des BMW i3. In der Abbildung 1 ist der schematische Aufbau des elektrischen Antriebsstranges dargestellt.

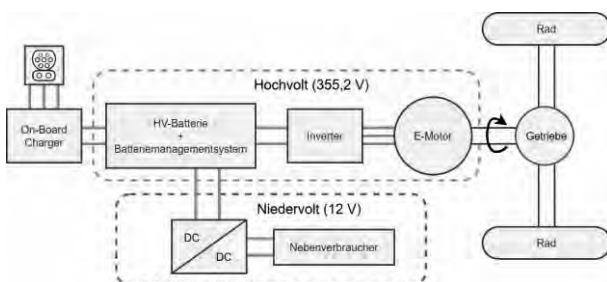


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines elektrischen Antriebsstranges

Das Fahrzeug wird von einem Hybrid-Synchronmotor angetrieben, der über eine lang-

anhaltende Leistungskurve im Feldschwähebereich verfügt. Außerdem kann die elektrische Maschine als Generator fungieren. [7, S. 17] Die Hochvoltbatterie (HV-Batterie) ist aus insgesamt 96 Lithium-Ionen-Basiszellen aufgebaut, welche alle in Reihe geschaltet sind. Das integrierte Batterienanagementsystem (BMS) regelt die Lade- und Entladeprozesse, wie auch die Betriebstemperatur der Zellen. [7, S. 19] Der Inverter, welcher ein Teil der Leistungselektronik darstellt, wandelt die Gleichspannung der HV-Batterie in eine Wechselspannung variabler Frequenz, die für den Elektromotor benötigt wird. Daneben ist das System auch in der Lage, die durch die Rekuperation gewonnene Energie zurück in die HV-Batterie zu speisen. Tabelle 1 fasst die technischen Daten des abzubildenden Fahrzeugs zusammen.

Versuchsfahrzeug BMW i3 (2014)	
Elektromotor	Hybrid-Synchronmotor
Nennleistung	75 kW bei 4800 U/min
Drehmoment	250 Nm bei 0 bis 4475 U/min
Getriebe	1-Gang Getriebe (9,665:1)
Batterietyp	Lithium-Ionen
Aufbau	8 Module mit je 12 Zellen (in Reihe) → 1p96s
Spannung	355,2 V
Kapazität	60 Ah
Reifen	Bridgestone Ecopia 155/70 R19
Fahrzeugmasse	1195 kg (Leergewicht)
Ausrollkoeffizienten	$F_0 = 123,35 \text{ N}; F_1 = 1,56 \frac{\text{N}}{\frac{\text{km}}{\text{h}}}$ $F_2 = 0,015 \frac{\text{N}}{\frac{\text{km}^2}{\text{h}^2}}$

TABELLE 1: TECHNISCHE DATEN VERSUCHSFAHRZEUG [7, S. 43] [8]

1.2 Längsdynamiksimulation (Simulationsumgebung)

In der Simulationssoftware *GT-Suite* von Gamma Technologies wird ein Längsdynamikmodell aufgebaut. Das Modell (zu sehen in Abbildung 2) beinhaltet einen elektrischen Antrieb bestehend aus einer Elektrischen Maschine und der dazugehörigen Leistungselektronik. Zusammen mit der HV-Batterie und dem BMS bilden diese die elektrischen Triebstrangkomponenten. Zu den mechanischen Komponenten des Antriebsstranges zählt

die feste Übersetzung, die in Form eines eingängigen Getriebes ausgeführt ist, sowie das Differential. Abschließend finden sich die Räder mit der mechanischen Bremsanlage.

Es wird außerdem ein virtueller Fahrer in die Modellierung implementiert, dem ein beliebiger Geschwindigkeitsverlauf als Vorgabe hinterlegt wird. Der Baustein liefert ein Gaspedal- und Bremspedalwert als Ausgabe, mit denen das Fahrzeug angesteuert wird.

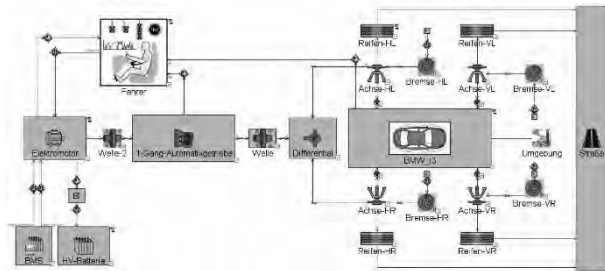


Abbildung 2: Topologie des Längsdynamikmodells in GT-Suite

Grundlage für die Parametrisierung des Längsdynamikmodells ist die Generierung von fahrzeugspezifischen Daten. Dies geschieht über das Programm *CANape*, mit dem die Datenbus-Größen aufgezeichnet werden.

1.3 Validierungsmethode

Zur Prüfung ob das Simulationsmodell auch bei der Entwicklung nicht spezifizierte Anforderungen erfüllt, wird eine manöverbasierte Validierungsmethode genutzt. Die Validierung beginnt aufgrund einer Systemanforderung (hier die Bewertung der Robustheit), wodurch ein Validierungsbedarf entsteht.

Mit der Validierung geht auch eine Validierungsumgebung einher. Diese fasst alle physischen und virtuellen Modelle zusammen, die innerhalb eines Unternehmens oder einer Abteilung zur Verfügung stehen. In Verbindung mit dem Validierungsbedarf werden ein oder mehrere Validierungsziele definiert. Anschließend wird für jedes Validierungsziel ein Test erstellt, der sich aus ein oder mehreren Testfällen, der Testumgebung und der Testinterpretation zusammensetzt. Die Aufgabe des Tests ist es Systemeigenschaften zu ermitteln und Erkenntnisse darüber zu liefern, ob das System die zuvor definierten Validierungsziele und objektiven Bewertungskriterien ganz, teilweise oder nicht erfüllt.

Die für die manöverbasierte Validierung notwendige

Testumgebung (Abbildung 3) fasst alle Mittel der Validierungsumgebung zusammen, die essenziell sind, um die Testfälle (Manöver) durchzuführen und das Systemverhalten zu erfassen. In diesem Fall beinhaltet die Testumgebung neben der virtuellen Längsdynamiksimulation einen zweiachsgetriebenen Rollenprüfstand (RPS). Um die Fahrmanöver möglichst präzise und reproduzierbar umzusetzen, wird ein Fahrerbotersystem verwendet. In dem Simulationsprogramm *Driver's Aid* der Prüfstandsumgebung ist das jeweilige Fahrmanöver hinterlegt. Dieses liefert die Sollvorgabe der Geschwindigkeit an den Fahrerboter und an den *DynoServer*, welcher Signale mit der Rollenprüfstandsteuerung austauscht.

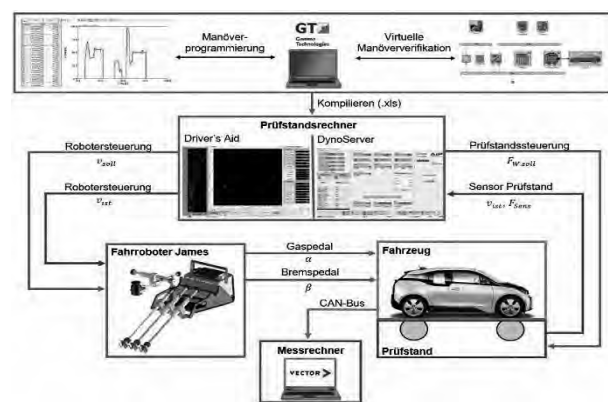


Abbildung 3: Testumgebung

Für die Durchführung der Referenzfahrten auf dem RPS stehen die Regelarten Lastsimulation und $v-\alpha$ zur Verfügung. Basis für die Lastsimulation stellt ein 1D-Punktmassemodell dar, welches innerhalb der Prüfstandsautomatisierung, passend zu jeder Geschwindigkeit, die entsprechenden Fahrwiderstände berechnet.

Diese umfassen Steigung-, Roll-, Luft- und Beschleunigungswiderstand und können approximiert mit einem Polynom 2. Grades beschrieben werden, wie in Gleichung (1) erkennbar. Die Koeffizienten F_0 , F_1 und F_2 beschreiben dabei die statischen, linearen und quadratischen Anteile der einzelnen Fahrwiderstände. Die Größen F_a und F_{St} bezeichnen die Beschleunigungs- und Steigungswiderstände.

$$F_z = F_0 + F_1 \cdot v + F_2 \cdot v^2 + F_a + F_{St} \quad (1)$$

Die $v-\alpha$ -Regelung hingegen zeichnet sich durch zwei aktive Regelungen aus: in der Rolle, welche auf die Geschwindigkeit v regelt sowie die Vorgabe der Fahrpedalstellung α im Fahrzeug mittels Fahrerboter. Es stellt sich die entsprechende Zugkraft F_z am Rad ein.

1.4 Manöverbasierte Validierung des Simulationsmodells

Nach ALBERS wird unter dem Begriff Validierung eine Überprüfung des Systems hinsichtlich dessen Eignung für seinen geplanten Einsatz verstanden. [4, S. 542] Die bei der manöverbasierten Validierung angewendeten Manöver bilden eine Referenzanwendung für die entsprechenden Validierungsziele ab.

Im Laufe einer Produktentwicklung werden neue Modellvarianten entwickelt. Eine neue Modellvariante basiert hierbei immer auf einem Referenzprodukt. In diesem Fall wird auf Basis vorliegender Daten eine Referenzmodellierung erstellt. Diese Referenzmodellierung befindet sich zunächst im Objektsystem. Das Zielsystem beschreibt den angestrebten Zielzustand, in diesem Fall entspricht es der Modellierung des Versuchsfahrzeuges in der Simulationsumgebung unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien. Beim Durchlauf der Validierung wird eine Modellvariante analysiert und auf Abweichungen zum Zielsystem geprüft. Eine Analyse endet in der Erkenntnis über die Eigenschaften der aktuellen Modellvariante. Umgekehrt beschreibt die Synthese die Erstellung einer verbesserten Modellvariante auf Basis der zuvor gewonnenen Erkenntnisse. Im Handlungssystem befinden sich die zur Verfügung stehenden Ressourcen, Aktivitäten und Methoden. Der Zyklus beginnt nun von vorn auf Basis der modifizierten Modellierung.

1.5 Manöverkatalog

Für jedes Validierungsziel wird ein Test erstellt, der sich aus ein oder mehreren Testfällen (Manöver), zusammensetzt. Der Testfall stellt eine Referenzanwendung der zu validierenden Funktion dar. In einem sog. Manöverkatalog werden die Manöver sorgfältig definiert (siehe Tabelle 2). Ein Manöver ist dann vollständig beschrieben, wenn darin die Systemzustände, Systemeingaben und Umweltbedingungen festgelegt sind. [3, S. 69]

Aufgrund der exakten Definition der Manöver hinsichtlich Fahrereingaben und Randbedingungen ist eine Reproduzierbarkeit der Messungen gegeben.

1.6 One-Pedal-Driving

Der Antrieb ist mit dem als One-Pedal-Driving (OPD) bezeichneten Fahrerlebnis ausgestattet. Die Elektrische Maschine wechselt automatisch in den Rekuperationsmodus, wenn der Fahrpedalwinkel unter eine gewisse Schwelle fällt. Dabei generiert die elektrische Maschine ein negatives Bremsmoment, welches Strom zurück in die HV-Batterie speist. Die Fahrpedalprogression des OPD ist in folgende drei Stufen aufgeteilt [9]:

- **Verzögern:** Rekuperation bis zum Stillstand
- **Segeln:** Momentenneutrales Rollen
- **Beschleunigen/Konstantfahrt:** Momentanforderung an den Elektromotor.

Die beschriebene Fahrpedalprogression mit den drei Stufen ist in Abbildung 4 grafisch dargestellt.

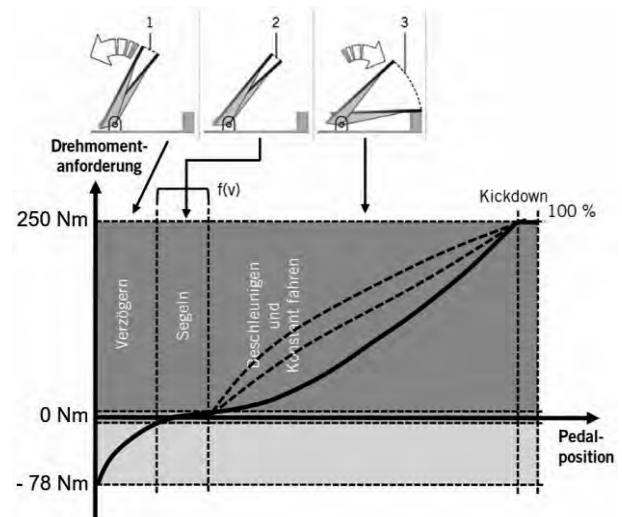


Abbildung 4: Fahrpedalprogression des One-Pedal-Driving mit den drei Stufen [9]

Technische Funktion	Ziel der Validierung	Beschreibung Manöver	Eingabe Fahrer	Bedingungen für Fahrzeug und Umwelt	Analysekriterien	Bewertungskriterien
One-Pedal-Driving	Abbildung geschwindigkeitsabhängige Nullmomentenlage	Konstantfahrt mit verschiedenen Geschwindigkeiten $v = 10:10:100 \text{ km/h}$	Fahrpedalstellungen $\alpha = 20:1:35 \%$	HV-Batterie $\text{SOC} > 80 \%$ und $T_{\text{Umgebung}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	Mittlere Drehmomentenabweichung der elektrischen Maschine $-0,5 \leq \bar{m}_M \leq 0,5 \text{ [Nm]}$	Momentenverlauf um das Nullmoment

TABELLE 2: MANÖVERKATALOG FÜR DAS VALIDIERUNGSZIEL ONE-PEDAL-DRIVING

Der in Abbildung 4 gezeigte Momentenverlauf gilt nur für eine feste Geschwindigkeit. Das Fahrpedal-Drehmoment-Drehzahl Kennfeld berücksichtigt die Abhängigkeit der Geschwindigkeit auf die Kurve. Demnach leitet sich aus der geschwindigkeitsabhängigen Nullmomentenlinie der Validierungsbedarf und eine Hypothese mit der Fragestellung, ob mit einer höheren Fahrgeschwindigkeit ein höherer Nullmomenten-Fahrpedalwert α_{M0} korreliert.

1.7 Validierung am Beispiel One-Pedal-Driving

Bei der nachfolgenden Analyse und Validierung des OPD wird ein besonderer Fokus auf den Segelbereich und die charakteristischen Nullmomentenlinien gesetzt. Das dafür genutzte Manöver ist im Manöverkatalog (Tabelle 2) definiert. Untersucht wird der Geschwindigkeitsbereich von 10 km/h bis 100 km/h mit einer Schrittweite von 10 km/h. Zur Ermittlung des, für die jeweilige konstante Geschwindigkeit passende, Nullmomentenpunktes α_{M0} dient die v - α -Regelart. Eine konstante Geschwindigkeitsvorgabe durch den RPS wird mit einem gerasterten Fahrpedalwerte kombiniert.

Voruntersuchungen grenzen den Bereich für die Nullmomente zwischen Fahrpedalstellungen von 20 % und 35 % ein. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Geschwindigkeits- und Fahrpedalvorgabe für 50 km/h. Alle Geschwindigkeitsplateaus nutzen die gleiche dargestellte Fahrpedalvorgabe.

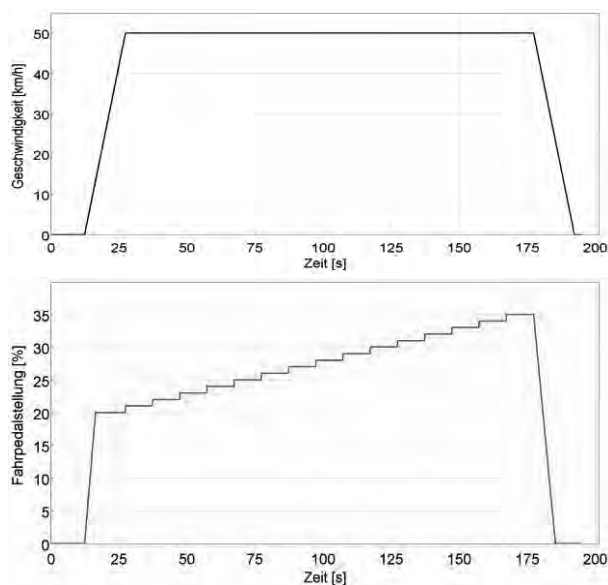


Abbildung 5: Geschwindigkeitsvorgabe für 50 km/h [oben] und Fahrpedalvorgabe [unten]

1.8 Testfälle

Das Versuchsfahrzeug unter Normalbedingungen, also ohne Zuladung und mit geladener HV-Batterie (SOC > 80 %), fungiert als Referenz. Auf dieser Grundlage wird der Segelbereich des OPD für den betrachteten Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 10 km/h validiert. Die Robustheit der Längsdynamiksimulation wird durch eine Zuladung in den Grenzen der Fahrzeugzulassung analysiert. Daraus folgen:

- Testfall 1: Referenz mit Leergewicht
- Testfall 2: Leergewicht plus 300 kg Beladung

Die Testfälle umfassen ein eigenes Manöver, (Regelart RPS: Lastsimulation), mit dem Zweck momentenneutral auszurollen. Es besteht aus einer Beschleunigungsphase auf 100 km/h mit anschließender Segelphase (Nullmoment). Dabei wird der Fahrpedalwert für die Nullmomentenlinie α_{M0} über der Geschwindigkeit nachgeregelt. In Abbildung 6 liegt α_{M0} zwischen den ermittelten 30 % und 25 %. Als Ausgangsgrößen ergibt sich das an der elektrischen Maschine wirkende Motormoment, sowie der Geschwindigkeitsverlauf des Segelvorgangs. Betrachtet wird die sich ergebende geschwindigkeitsabhängige Nullmomentenlinie und dessen Einfluss auf die verschiedenen Testfälle.

Der in Abbildung 6 dargestellte Inputverlauf gilt für beide Testfälle.

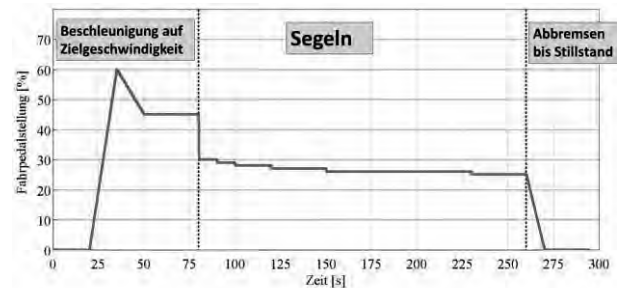


Abbildung 6: Fahrpedalvorgabe für Testfall 1 und 2

Die Daten aus den Manövern füllen das Fahrpedal-Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld der Elektrischen Maschine in der Längsdynamiksimulation. Im Rahmen des Handlungssystems nähert sich das Objektsystem, die Längsdynamiksimulation, dem Zielsystem an. Auf Basis dieses Kennfeldes werden die Manöver, die zuvor auf dem RPS zur Generierung der Messdaten genutzt wurden, in der Simulation nachgefahren. Als Vorgabe dient das in Abbildung 5 dargestellte Manöver.

2 Ergebnisse

Der folgende Abschnitt befasst sich mit den Ergebnissen der manöverbasierten Validierung. Nachfolgend wird sich im Detail dem Validierungsziel des OPD gewidmet. Die Ergebnisse aus der Simulation werden im ersten Schritt qualitativ und danach quantitativ ausgewertet.

Abbildung 7 zeigt für den Geschwindigkeitsbereich von 10 km/h bis 100 km/h die detaillierten Nullmomenten-Fahrpedalwerte α_{M0} . Der Momentenverlauf für unterschiedliche Gaspedalstellungen bei einer Drehzahl von 2000 U/min (gesamter Drehmomentenbereich abgebildet) in Abbildung 7 unten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Nullmomenten-Fahrpedalwerte α_{M0} zum einen mit höheren Geschwindigkeiten ansteigen. Zum anderen ist der Segelbereich bei höheren Geschwindigkeiten ausgeprägter. Damit stützt Abbildung 7 die zuvor aufgestellte Hypothese, dass der Nullmomenten-Fahrpedalwert mit der Geschwindigkeit steigt. Eine neue Erkenntnis ist jedoch, dass sich gleichzeitig auch der Segelbereich kontinuierlich vergrößert, was anhand der kegelartigen Hilfslinien verdeutlicht wird.

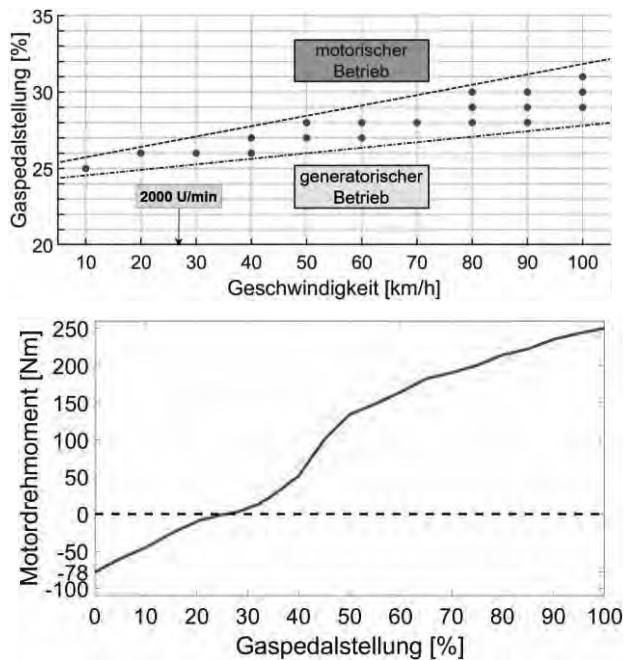


Abbildung 7: Nullmomenten-Fahrpedalkennlinie $\alpha_{M0}(v)$ [oben] und Momentenverlauf für 2000 U/min [unten]

Die beiden Drehmomentenverläufe aus der Simulation und den real gefahrenen Versuchen auf dem

RPS, für das in Abbildung 5 gezeigte Manöver (50 km/h), sind in Abbildung 8 zu sehen.

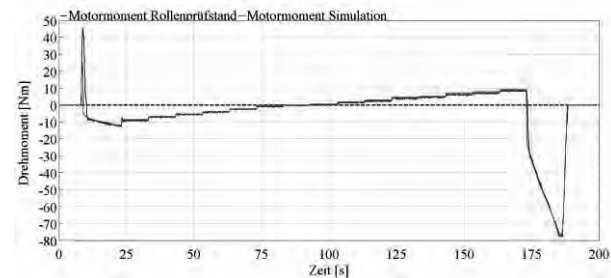


Abbildung 8: Motormoment um die Nullmomenten-Linie [50 km/h, siehe Manöverkatalog]

Der aus den Voruntersuchungen eingegrenzte Fahrpedalbereich bestätigt sich. Nach 83 Sekunden segelt das Referenzfahrzeug 20 Sekunden lang. Dem Fenster in Abbildung 7 sind die beiden zugehörigen α_{M0} -Werte bei 27 % und 28 % entnehmbar. Des Weiteren beweisen die annähernd übereinander liegenden Verläufe vor und nach dem Geschwindigkeitsplateau ($23 \text{ s} < t_{v=\text{konst}} < 173 \text{ s}$) die Genauigkeit des Kennfeldes, welches aus den Voruntersuchungen entstanden ist.

2.1 Statistische Untersuchung der Ergebnisse

Eine höhere Aussagekraft über den Modellierungsstand erzielen verschiedene statistische Methoden. Diese prüfen, ob das Validierungsziel des OPD erreicht ist.

Als Grundlage für die statistischen Methoden dient die Differenzfunktion $d(t)$ zwischen den Rollenprüfstandsverläufen (RPS) und Simulationsverläufen (SIM).

$$d(t) = x_{RPS}(t) - x_{SIM}(t) \quad (2)$$

Mit Gleichung (3) lässt sich der Mittelwert der zuvor bestimmten Differenzfunktion berechnen. Hierbei steht N für die Anzahl der Messdaten.

$$\bar{m} = \frac{1}{N} * \sum_{t=1}^N d(t) \quad (3)$$

Auswerten lässt sich der Bereich mit konstanter Geschwindigkeit aus Abbildung 8. Es wird nur das Geschwindigkeitsplateau betrachtet und statistisch ausgewertet. Abbildung 9 zeigt den zugehörigen Drehmomentenverlauf. Jeder Fahrpedalsprung resultiert in einem Sprung der Drehmomentenanforderung (für eine gleichbleibende Geschwindigkeit).

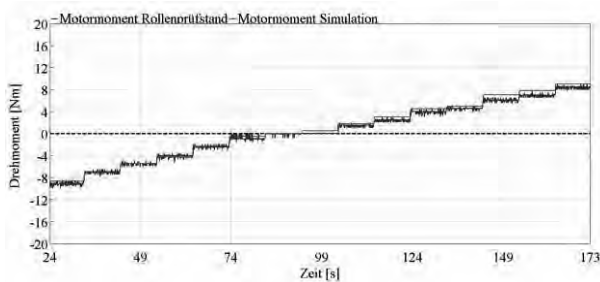


Abbildung 9: Drehmoment für Zeitbereich mit konst. Geschwindigkeit [50 km/h; Ausschnitt]

v [km/h]	\bar{m}_α [%]	\bar{m}_M [Nm]	α_{M0} [%]
10	0,0536	-0,0480	25
20	0,0607	-0,0297	26
30	0,0466	-0,4000	26
40	0,0413	-0,0992	26; 27
50	0,0215	-0,3378	27; 28
60	0,0439	0,1058	27; 28
70	0,0401	-0,0316	28; 29
80	0,0385	0,0618	28; 29; 30
90	0,0155	-0,0760	28; 29; 30
100	0,0329	0,0338	29; 30; 31

TABELLE 3: STATISTISCHE AUSWERTUNG DES VALIDIERUNGSZIELS

Die Tabelle 3 fasst die statistischen Ergebnisse aus den in Abschnitt 1.7 beschriebenen Manöver zusammen, wobei der Fokus der Auswertung auf der Nullmomentenlinie liegt.

Die zweite Spalte der Tabelle 3 zeigt die mittlere Abweichung des Fahrpedals (\bar{m}_α), welches als Inputgröße dient. Der Fahrroboter setzt über den gesamten Manöverzeitraum einen exakten Fahrpedalwert um, was die minimale Abweichung beweist.

Die Spalte \bar{m}_M zeigt ausgehend von der vorgegebenen Geschwindigkeit und dem Fahrpedalwert, die daraus resultierende mittlere Abweichung des Motormoments.

2.2 Testfall 1

Die Ergebnisse der Referenzfahrt, also für einen SOC > 80 % und ohne Zusatzbelastung, sind in Abbildung 10 für den Zeitbereich, in welchem das Fahrzeug segelt, aufgezeigt.

Wie beschrieben, zeichnet sich der Momentenverlauf der Simulation durch eine nachgeregelt Fahrpedalstellung aus, mit dem Ziel über den betrachteten Zeitbereich zu segeln. Der Geschwindigkeitsverlauf zeigt das momentenneutrale Ausrollen von 100 km/h bis 10 km/h. Oben dargestellt sind die zeitabhängigen Fahrpedalstellungen und die 1%-Fahrpedalsprünge.

Der erste und der dritte Fahrpedalsprung äußern sich in einem Abfallen der Drehmomentenanforderung der Elektrischen Maschine. Der Zusammenhang zwischen negativem Fahrpedalsprung und geschwindigkeitsabhängiger negativer Momentenanforderung ist zu beobachten. Die zeit- und wertediskreten Drehmomente belegen die Auflösung des Fahrzeugbuses von 0,5 Nm. Der zweite und vierte Fahrpedalsprung hingegen sind nicht messbar.

Die Abweichungen zwischen RPS und Simulation von -2,0 Nm bis +2,5 Nm unterbrechen das Ausrollen nicht. Es tritt keine Konstantfahrt oder Beschleunigung auf. Erst im letzten Drittel steigt die mittlere Abweichung merklich an. Dieser Abschnitt startet mit einer generatorischen Anforderung, welche ab 171 s in eine steigende motorische Anforderung umschwingt. Bis zum Ende bleibt die Fahrpedalstellung bei einem Winkel von 26 %. Die untere Grenzggeschwindigkeit von 10 km/h wird bei 227,2 s unterschritten. Generell gilt, dass bei niedrigeren Geschwindigkeit kleinere Fahrpedalschwankungen mit höheren Drehmomentsprüngen verbunden sind um bei der Anfahrt dem hohen Trägheitsmoment entgegen zu wirken.

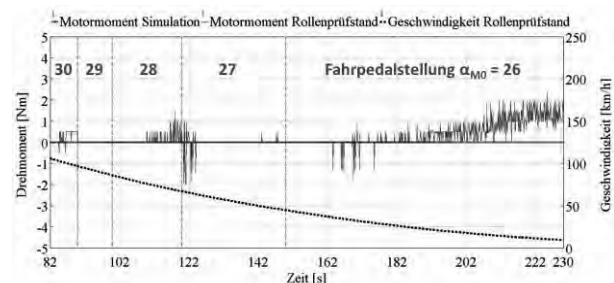


Abbildung 10: Momentenverlauf für Testfall 1 [Ausschnitt]

2.3 Testfall 2

Der zweite betrachtete Testfall dauert länger an, aufgrund der gestiegenen Trägheit des Referenzfahrzeuges. Von über 100 km/h bis unter 10 km/h vergehen 171,8 s. Im Vergleich dazu ist Testfall 1 deutlich kürzer mit 140,3 s. Dies hat zur Folge, dass das Diagramm den Fahrpedalsprung von 26 % auf 25 % bei 230 s beinhaltet.

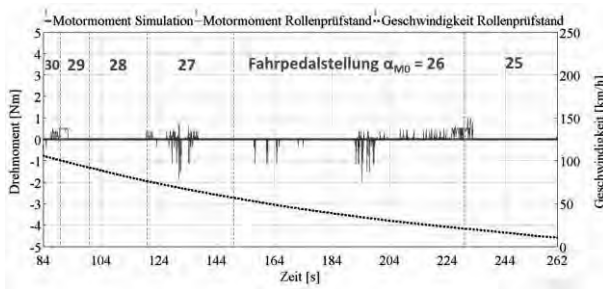


Abbildung 11: Momentenverlauf für Testfall 2
[Ausschnitt]

2.4 Auswertung der Testfälle

Die Ergebnisse der Ausschnitte beider Testfälle sind in Tabelle 4 aufgefasst. Neben der mittleren Abweichung des Motormoments ist auch die Standardabweichung aufgeführt.

Parameter	Testfall 1	Testfall 2
\bar{m}_M [Nm]	0,2544	0,1812
Standardabweichung s	0,4794	0,335

TABELLE 4: STATISTISCHE AUSWERTUNG DER TESTFÄLLE

3 Diskussion und Fazit

Die aufgestellte Hypothese, dass eine höhere Fahrgeschwindigkeit in einen höheren Nullmomenten-Fahrpedalwert α_{M0} resultiert, hat sich bestätigt.

Eine weitere Schlussfolgerung aus Abbildung 7 ist die Scharbildung an α_{M0} mit steigender Geschwindigkeit, welche eine geschwindigkeitsabhängige Hysterese darstellt. Es ist zu erwarten, dass bis zur maximalen Geschwindigkeit von 150 km/h wachsende Bereiche mit Nullmomenten das Segeln erheblich erleichtern. Dies liegt zum einen an dem, für Elektromotoren üblichen, Feldschwächebereich, in welchem das maximale Motordrehmoment bei Höchstdrehzahlen auf ein Drittel des Maximalwertes absinkt. Zum anderen ist das OPD auch eine Komfortfunktion, welche mit anderen

Funktionen, wie dem Fahrbarkeitsfilter, wechselwirkt.

Das Erfüllen des Analyse Kriterium aus dem Manöverkatalog beweist die Validierung des OPD auf Grundlage der statistischen Auswertung der Geschwindigkeiten (Tabelle 3). Nach ALBERS ist damit das Validierungsziel erfüllt. [4, S. 542] Die Längsdynamiksimulation ist damit geeignet, das OPD Verhalten im betrachteten Geschwindigkeitsbereich ausreichend abzubilden.

Die zwei betrachteten Testfälle beweisen die Robustheit der Simulation in Bezug auf Gewichtsvariation. Der Rahmen der zulässigen Beladung des Testfahrzeuges wurde nicht verlassen. Damit zeigt sich, dass das Objektsystem unter Entwicklung von ZHO und manöverbasierter Validierung in den Grenzen der Fahrzeugzulassung robust ist.

Durch die manöverbasierte Validierung der Hypothese haben sich weitere Wissenslücken ergeben. Aus den Voruntersuchungen ist die höchste Steilheit Ausgleichsgerade der Nullmomenten-Punkte bei kleineren Geschwindigkeiten beobachtet worden. Unter Einfluss vom Anfahrregler und dem OPD-Kennfeld bildet sich ein weiterer Validierungsbedarf für das Modell.

Literatur

- [1] H. Zlojo, A. Kuznik, T. Steinhaus und C. Beidl, „Modellbasierte Hybridentwicklung - Verschmelzung von virtuellem und realem Test“, MTZextra, S. 22–25, 2020.
- [2] J. Liebl und G. Rainer, Hg., VPC.plus 2014: Simulation und Test für die Antriebsentwicklung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [3] K. Matros, F. Schille, M. Behrendt und H. Holzer, „Manöverbasierte Validierung von Hybridantrieben“, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Jg. 117, S. 64–71, 2015.
- [4] A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler und K. Matros, „Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess“ in *Handbuch Produktentwicklung*, U. Lindemann, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 541–569.
- [5] M. Geier, C. Stier, T. Düser, M. Behrendt, S. Ott und A. Albers, „Simulationsgestützte Methoden IDE und XiL zur Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten“, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, S. 48–53, 2009.

- [6] M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg.,
21. Internationales Stuttgarter Symposium:
Automobil- und Motorentechnik. Wiesbaden:
Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [7] BMW PressClub, Der BMW i3, 2013. [Online].
Verfügbar unter:
<https://www.press.bmwgroup.com/switzerland/article/detail/T0148286DE/der-bmw-i3?language=de>
- [8] Idaho National Laboratory, „2014 BMW i3:
Advanced Vehicle Testing“, 5. Okt. 2016.
[Online]. Verfügbar unter:
<https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/fact2014bmwi3ev.pdf>. Zugriff am: 8. Juni 2021.
- [9] M. Jung, F. Kessler, P. Müller und S. Wahl,
„Fahrzeugintegration und Fahrverhalten des
BMW Active E“, ATZ - Automobiltechnische
Zeitschrift, S. 808–812, 2012.