

Manöverbasierte Validierung einer Längsdynamiksimulation anhand generisch erzeugter Reallastverläufe

M. Eng. Sven Cortès^{1*}, Prof. Dr.-Ing. Christian Dettmann¹,

B. Eng. Omar Haidar¹, B. Eng. Linus Heinzelmann¹

¹Technische Hochschule Ulm, Prittwitzstraße 10, 89075 Ulm, Germany; *sven.cortes@thu.de

Abstract. Werden reale Lastzustände von Automobilen auf einem Rollenprüfstand simuliert, so stehen neben der klassischen 1D-Lastsimulation weitere Prüfstandsregelarten zur Verfügung. So kann beispielsweise der Betriebszustand des Prüflings durch die Kombination von Fahrzeuggeschwindigkeit und eine den Fahrerwunsch beschreibende Größe ebenfalls eindeutig bestimmt werden.

Dieses Paper zeigt eine Methode auf, die es ermöglicht, ein Längsdynamikmodell eines Fahrzeuges anhand von Prüfstandsmessungen zu parametrisieren und manöverbasiert zu validieren. Die Validierungsumgebung besteht aus einem Rollenprüfstand und einem automatisierten Fahrroboter mit elektronischem Fahrpedal und wird innerhalb des IPEK X-in-the-Loop-Frameworks eingeordnet. Anhand der Längsdynamiksimulation können nun generische Streckenprofile erzeugt werden. Der Übertrag dieser Lastzustände auf die Validierungsumgebung erfolgt über eine definierte Schnittstelle, welche die unterschiedlichen Prüfstandsregelarten berücksichtigt.

Einleitung

Mit der Einführung des Real Driving Emissions (RDE)-Verfahrens im September 2017 fand ein Wandel innerhalb der Fahrzeugentwicklung von der Abgaszertifizierung und emissionsrelevanten Tests unter Laborbedingungen hin zu Fahrten im realen Straßenverkehr statt. Aufgrund der Fülle an emissionsrelevanten Einflussfaktoren bei Realfahrten sind diese nicht vollständig reproduzierbar. Insbesondere die Verkehrssituation und die Witterungsbedingungen sind dabei problematisch. Bei Fragestellungen, wie zum Beispiel der Steuergeräteapplikation, ist je-

doch die Reproduzierbarkeit der Testfälle besonders relevant. Aus diesem Grund stellt die Entwicklung geeigneter Validierungsumgebungen und Testfälle eine Notwendigkeit dar, wobei häufig von einem sogenannten „Road to Rig“ (R2R)-Konzept gesprochen wird. [1,2]

Der IPEK X-in-the-Loop (XiL)-Ansatz, welcher am Institut für Produktentwicklung (IPEK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelte wurde, bietet eine durchgängige Methodik zur Validierung von Systemen auf unterschiedlichen Systemebenen während des gesamten Entwicklungsprozesses. Das betrachtete System selbst und die mit ihm interagierenden Systeme können dabei in virtueller oder physischer Form und mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad vorliegen. [3] Bei der Anwendung der Methodik in der Fahrzeugentwicklung kann durch die Simulation der Umweltbedingungen und Lastzustände des Fahrzeugs der Übergang von Fahrversuchen zur Validierung am Rollenprüfstand erreicht werden. Der Fahrer als drittes relevantes System kann anhand von virtuellen Fahrermodellen, Fahrrobotern oder realen Fahrern umgesetzt werden. [4]

Die Simulation der Lastzustände erfolgt durch die Prüfstandsregelung. Dabei kommt im Rahmen der Straßenlastsimulation häufig ein 1D-Punktmassenmodell mit experimentell bestimmten Fahrwiderstandskoeffizienten zum Einsatz. [5] Alternative Regelarten bieten dagegen die Möglichkeit, die Betriebspunkte anhand der Fahrzeuggeschwindigkeit oder Raddrehzahl und der Fahrpedalstellung durch die Prüfstandsregelung und einen Fahrroboter einzustellen. Die ergebnisgleiche Abbildung der Lastzustände, verglichen mit der Straßenlastsimulation wird durch die Untersuchung von CORTÈS et al. [6] be-

stättigt. Es werden dabei Fahrmanöver aus einer Datenbasis realer RDE-Fahrten anhand gemessener Signale in der Validierungsumgebung reproduziert. Durch die Anwendung der alternativen Regelarten ergibt sich der Vorteil eines geringeren Aufwands zur Durchführung der Manöver, da sowohl die komplexe messtechnische Erfassung des Steigungsprofils als auch die aufwendige Justage der simulierten Fahrwiderstände am Rollenprüfstand bei der Lastanpassung umgangen wird. Bei der vorgestellten Methodik zur Anwendung der Regelarten werden jedoch Messdaten real durchgeführter Fahrten benötigt.[6]

Am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (IFS) der Technischen Hochschule Ulm (THU) wird derzeit der Ansatz verfolgt, eine modellbasierte Fahrzeugsimulation als digitalen Prototyp zur Generierung von Daten zu verwenden, die den Betrieb eines Rollenprüfstands anhand alternativer Regelarten entsprechend [6] ermöglicht. Dadurch sollen Fahrzeugsysteme auf Basis generischer oder gemessener Geschwindigkeitsverläufe validiert werden können.

Der vorliegende Beitrag betrachtet in diesem Zusammenhang die Hypothese, dass bereits ein einfaches Längsdynamikmodell eines Fahrzeugs, welches auf Parametern wie stationären Kennfeldern basiert, Simulationsergebnisse von ausreichender Güte liefern kann, um sowohl einfache Fahrmanöver aus gesetzlichen Prüfzyklen als auch generische Reallastverläufe auf einen Rollenprüfstand übertragen zu können. Zur Überprüfung der Hypothese wird das parametrisierte Modell hinsichtlich der Abbildung des makroskopischen Fahrzeugverhaltens bei den relevanten Fahrmanövern gegenüber Prüfstandsmessungen validiert.

1 Methodik

Die Parametrisierung und Validierung des Längsdynamikmodells erfolgt auf Basis des erweiterten ZHO-Modells nach ALBERS [3]. Dieses beschreibt den Entwicklungsprozess als zyklischen Wechsel zwischen Kreation bzw. Synthese und Validierung, wobei diese sowohl der Überprüfung definierter Anforderungen und deren Umsetzung als auch der reinen Gewinnung von Erkenntnissen über das Systemverhalten dienen kann. [3] Die Vorgänge der Modellierung der Längsdynamik und der Parametrisierung des erzeugten Modells stellen somit separate Syntheseprozesse dar, während die Bestimmung der Parameter ebenso wie die Überprüfung der Anforderun-

gen aus der Forschungshypothese als Validierungsprozess verstanden wird, da sie einen Erkenntnisgewinn über das Fahrzeugverhalten voraussetzt. Beide Validierungsprozesse erfolgen manöverbasiert. Hierzu wird anhand der definierten Validierungsziele ein gemeinsamer Manöverkatalog erstellt, wobei jedes Manöver anhand des initialen Fahrzeugzustands, der Fahrereingaben und Randbedingungen beschrieben wird. Für die einzelnen Manöver oder auch Testfälle wird zudem eine Testumgebung definiert, die eine Konfiguration der Validierungsumgebung zur konkreten Umsetzung des jeweiligen Manövers darstellt. [7] Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt schließlich innerhalb der Testinterpretation. [3]

1.1 Validierungsumgebung

Die verwendete Validierungsumgebung besteht aus einem Maha AIP Abgasrollenprüfstand in Kombination mit einem Fahrroboter des Herstellers AIP Automotive GmbH & Co. KG. Die Infrastruktur der Validierungsumgebung wird in vereinfachter Form in Abbildung 1 dargestellt. Der Fahrroboter erlaubt sowohl den Betrieb in Geschwindigkeitsregelung als auch die direkte Vorgabe von Sollwerten der Fahrpedalstellung α , die anhand eines E-Gas Moduls umgesetzt werden. [8] Da Verzögerungsphasen nicht anhand der Fahrpedalstellung umgesetzt werden können, wechselt der Fahrroboter hierzu in Geschwindigkeitsregelung, sobald α den Wert null annimmt. Die Regelung des Rollenprüfstands ermöglicht sowohl den Betrieb in Straßenlastsimulation als auch in Geschwindigkeitsregelung, wobei zur Umsetzung der alternativen Regelarten v - α und n - α sowohl die Geschwindigkeit v als auch die Raddrehzahl n als Sollwert vorgegeben werden kann. Bei der Lastsimulation erfolgt die Simulation der Last anhand von Gleichung (1). Sie steht im Gleichgewicht mit der Zugkraft F_Z des Fahrzeugs. Der Term F_W steht dabei für den Fahrwiderstand, welcher anhand der Straßenlastkoeffizienten A, B, C berechnet wird. Die Größen F_a und F_{St} bezeichnen die Beschleunigungs- und Steigungswiderstände. [5]

$$\begin{aligned} F_Z &= F_W + F_a + F_{St} \\ &= A + B \cdot v + C \cdot v^2 + F_a + F_{St} \end{aligned} \quad (1)$$

Durch das Einregeln der Sollgeschwindigkeit eines Fahrmanövers durch den Fahrroboter ist der Lastzustand des Fahrzeugs somit jederzeit eindeutig bestimmt. Bei den alternativen Regelarten wird dies durch die Geschwindigkeitsregelung des Prüfstands und das Antriebsmoment des Fahrzeugs entsprechend der vorgegebenen Fahrpedalstellung erreicht. [5]

Die Messung der Zugkraft, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung erfolgt durch die Prüfstandssensorik mit einer Abtastrate von 1 kHz. Zur Messung der Fahrpedalstellung kommt ein AD-Wandler des Herstellers DEDITEC GmbH zum Einsatz. Er wird mit dem Potentiometer des elektronischen Fahrpedals verbunden und misst den zeitlichen Verlauf der Spannung mit einer Abtastrate von 500 Hz. Die Raddrehzahl wird anhand eines Drehgebers des Herstellers Kistler Instrumente AG mit einer Auflösung von 1000 Pulsen pro Umdrehung aufgezeichnet. [12] Informationen über den Betriebszustand des Fahrzeugs liefert die standardisierte OBD 2 Schnittstelle. Zur Aufzeichnung der Messdaten kommt ein autarkes Rechnersystem zum Einsatz.

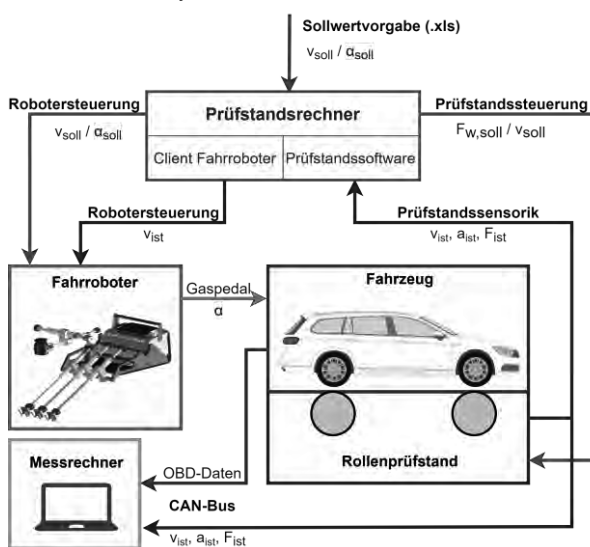


Abbildung 1: Infrastruktur der Validierungsumgebung am IFS der THU

Als Versuchsfahrzeug kommt ein Pkw der Mittelklasse mit einem 2,0 l Dieselmotor und Doppelkupplungsgetriebe zum Einsatz. Die wichtigsten Fahrzeugdaten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Hersteller/Modell	VW Passat B8
Motor	Diesel, 4 Zyl, 1968 cm ³
Leistung	110 kW bei 3500 – 4000 1/min
Drehmoment	340 Nm bei 1750 – 4000 1/min
Antriebskonfiguration	Front-Quer
Getriebe	7-Gang Direktschaltgetriebe (DSG)
Gesamtmasse	1928 kg

Tabelle 1: Technische Daten des Versuchsfahrzeugs

Das Gesamtgewicht des Fahrzeugs setzt sich dabei aus dem Leergewicht sowie dem Gewicht der Messtechnik und zweier Insassen zusammen.

1.2 Modell der Längsdynamik

Zur Modellierung des Versuchsträgers werden zwei Längsdynamikmodelle erstellt. Hierbei wird der gesamte Antriebsstrang vom Verbrennungsmotor bis zum Rad modelliert. Zur Simulation von Prüfzyklen wird die Rückwärtssimulation gewählt. Zur Simulation von Real-lastverläufen bedarf es einer Erweiterung um einen virtuellen Fahrer, welcher die Geschwindigkeitsregelung durch einen Fahrer abbildet. Dadurch ergibt sich eine Vorwärtssimulation. Die Dynamik des Fahrermodells kann anhand spezieller Parameter eingestellt werden.

Grundsätzlich wird der Antriebsstrang bestehend aus Verbrennungsmotor, Getriebe, Differential und Räder für beide Modellvarianten identisch parametrisiert. Im Rahmen der Parameterbestimmung werden die für die Modellierung benötigten Kenngrößen und Kennfelder bestimmt. Für den Verbrennungsmotor wird das Massenträgheitsmoment und das Kennfeld des effektiven Drehmoments bestimmt, während das Getriebe auf Basis von Hoch- und Rückschaltkennlinien, den Übersetzungen der einzelnen Gangstufen und dem Massenträgheitsmoment modelliert wird. Für die Parametrisierung der Komponenten zwischen dem Getriebeausgang und der Räder wird ein Massenträgheitsmoment bestimmt und die geometrischen Daten des Fahrzeugs, wie Fahrwiderstandskoeffizienten und Fahrzeugmasse in die Modellierung eingesetzt. Für die Modellierungen werden unter Berücksichtigung des Verwendungszweckes verschiedene Vereinfachungen unternommen. Die Stabilität der Modellierung muss dabei stets berücksichtigt werden. Als Beispiel einer Vereinfachung kann die Modellierung des Doppelkupplungsgetriebes betrachtet werden. Das Doppelkupplungsgetriebe wird auf Basis eines Schaltgetriebes mit Kupplung modelliert. Der Anfahrregler wird dabei nicht vollständig abgebildet, wodurch der Modellierungsaufwand reduziert wird, jedoch Abweichungen bei Anfahrvorgängen entstehen.

1.3 Generische Reallastverläufe

Die um einen virtuellen Fahrer erweiterte Modellierung ermöglicht die Simulation generischer Reallastverläufe. Die Erzeugung der Verläufe basiert auf einem Algorithmus der Simulationssoftware, welcher einzelne Streckensegmente aus einer umfangreichen Datenbasis des

Softwareherstellers Gamma Technologies zu einer Gesamtstrecke mit zuvor festgelegten Eigenschaften anordnet. Die Eigenschaften können dabei unter Berücksichtigung der RDE-Konformität gewählt werden. So lassen sich u.a. die einzelnen Streckenanteile (Stadt, Überland, Autobahn), die Haltedauer bei Ampelphasen, sowie die Gesamtstrecke festlegen.

1.4 Parameterbestimmung

Zur Bestimmung der Modellparameter werden unter Berücksichtigung der messbaren Größen und der Parameter der Validierungsumgebung charakteristische Manöver definiert. Das Vorgehen wird im Folgenden anhand des Fahrmanövers 1 exemplarisch vorgestellt. Es bildet die wesentlichen Betriebszustände ab, die dem Motorkennfeld zugeordnet werden. Dieses stellt den Parameter mit dem höchsten Einfluss auf die Simulationsergebnisse dar.

Manöver 1. Das erste Fahrmanöver setzt sich aus Abschnitten konstanter Geschwindigkeit und variablen Motorlasten zur Durchführung einer stationären Vermessung des Verbrennungsmotors zusammen. Zur Definition der Lastpunkte werden etablierte Methoden der Rastervermessung angewendet, die anhand von Abbildung 2 verdeutlicht werden können. Es wird dabei zunächst der Variationsraum der fahrbaren Drehzahlen und Lasten mit Blick auf die thermische Belastung des Motors vermessen. Anschließend erfolgt eine Unterteilung des Variationsraums anhand eines äquidistanten Rasters, dessen Eckpunkte das Kandidatenset bilden. Die tatsächlichen Messpunkte setzen sich aus den Messpunktkandidaten zusammen, die sich innerhalb der Grenzen des Variationsraums befinden. [11] Die dadurch definierten 28 Lastpunkte werden durch aneinandergereihte Abschnitte konstanter Geschwindigkeiten, bei denen sich in der vierten Gangstufe Motordrehzahlen von 1200 1/min bis 3600 1/min in Abständen von 600 1/min einstellen, angefahren. Die Geschwindigkeitsregelung erfolgt dabei durch den Fahrroboter. Während der konstanten Abschnitte wird die Motorlast ausgehend von null schrittweise erhöht und jeweils für 180 s gehalten, um eine Stabilisierung zu gewährleisten. Die Einstellung der Last erfolgt anhand des simulierten Steigungswiderstands des Rollenprüfstands in Lastsimulation durch Variation der Steigung. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, wird von einem betriebswarmen Motor als Randbedingung ausgegangen. Die Analyse Kriterien des Manövers

stellen die gemessene Zugkraft des Fahrzeugs F_Z und die Fahrpedalstellung α dar.

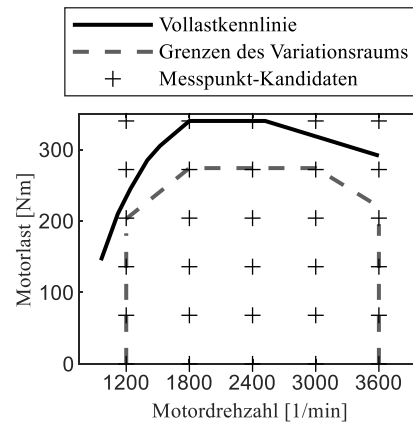


Abbildung 2: Kandidatenset und Versuchsraum der Rastervermessung

Berechnung der Modellparameter. Anhand der gewonnenen Messdaten und Erkenntnisse über das Fahrzeugverhalten erfolgt dessen Abbildung in Modellparametern. Im Falle des vorgestellten Fahrmanövers wird für jeden Lastpunkt, definiert durch die gemessenen Werte der Motordrehzahl n_M und der Fahrpedalstellung α die mittlere Zugkraft $\overline{F_Z}$ berechnet und mit Gleichung (2) anhand des dynamischen Radhalbmessers r_{Dyn} , der Gesamtübersetzung in der vierten Gangstufe $i_{ges,4}$ und der im Vorfeld vermessenen Kraft durch die Reibung des Antriebsstrangs $F_{R,A}$ die Drehmomentwerte des Motors $M_M(n_M, \alpha)$ bzw. $M_M(n_M, 0) = M_{Schlepp,M}$ berechnet.

$$M_M = \frac{(\overline{F_Z} - F_{R,A}) \cdot r_{Dyn}}{i_{ges,4}} \quad (2)$$

Zur Erzeugung des Rasterkennfelds werden die Drehmomentwerte anhand eines äquidistanten Gitters mit Netzweiten von $\Delta n_M = 100 \text{ 1/min}$ und $\Delta \alpha = 2 \%$ linear interpoliert.

1.5 Validierung des Simulationsmodells

Innerhalb der Modellvalidierung werden zunächst schrittweise die Größen Zugkraft, Fahrpedalstellung und Geschwindigkeit betrachtet, von denen jeweils zwei zur eindeutigen Beschreibung der Lastzustände des Fahrzeugs herangezogen werden können. Zur Generierung von Referenzdaten erfolgt der Betrieb des Rollenprüfstands in Lastsimulation, sodass die Zugkraft des Fahrzeugs sowohl für das Längsdynamikmodell als auch für

das Simulationsmodell die erste Größe zur Definition der Lastzustände darstellt. Durch Variation der zweiten Größe erfolgt dann die Validierung mit der sich aus dem Lastzustand ergebenden dritten Größe als Analyse Kriterium. Um anhand der so gewonnenen Validierungsergebnisse Aussagen über die Übertragbarkeit der Fahrmanöver unter Verwendung alternativer Regelarten tätigen zu können erfolgt zuletzt der Vergleich der Ergebnisse bei der Durchführung mit unterschiedlichen Regelarten.

Für den Validierungsprozess werden einerseits Fahrmanöver der Parameterbestimmung zur direkten Validierung der gewonnenen Modellparametrierung verwendet. Andererseits werden Manöver aus gesetzlichen Prüfzyklen und generischen Streckenverläufen herangezogen, um die Abbildung des Fahrzeugverhaltens in einem breiten Umfang von Last- und Fahrzuständen zu validieren. Zur Reduzierung potenzieller Fehlerquellen, müssen dabei bestimmte Randbedingungen, wie die Umgebungs- und Kühlmitteltemperatur übereinstimmen. Im Folgenden werden beispielhaft drei Manöver des erstellten Manöverkatalogs vorgestellt.

Manöver 2. Das Fahrmanöver 2 beschreibt einen außerstädtischen Abschnitt des NEFZ-Zyklus. Der Fokus liegt hierbei auf der geringen Dynamik und der ausgeprägten Konstantfahrphasen, was die Untersuchung der Zugkraft als Basis der weiteren Validierungsschritte ermöglicht. Als Eingangsgröße des Simulationsmodells dient dabei der gemessene Geschwindigkeitsverlauf in Abbildung 3 a). Dieser wird durch eine Prüfstands-fahrt unter Verwendung der Längsdynamikregelung des Fahrroboters erzeugt.

Manöver 3. Dieses Fahrmanöver wird aus jenem zur Bestimmung der Hochschaltkennlinien des Getriebes abgeleitet. Es basiert auf vier Beschleunigungsvorgängen, wobei dem Fahrroboter konstante Werte der Fahrpedalstellung von 20 % bis 50 % vorgegeben werden. Der Rollenprüfstand wird dabei in Lastsimulation betrieben. Die gemessene Geschwindigkeit, entsprechend Abbildung 3, wird als Eingangsgröße des parametrisierten Modells verwendet. Das Validierungskriterium des Manövers ist die Abbildung motorischer Betriebspunkte auf Basis einer Geschwindigkeitsvorgabe, die sich anhand der berechneten Fahrpedalstellung analysieren lässt.

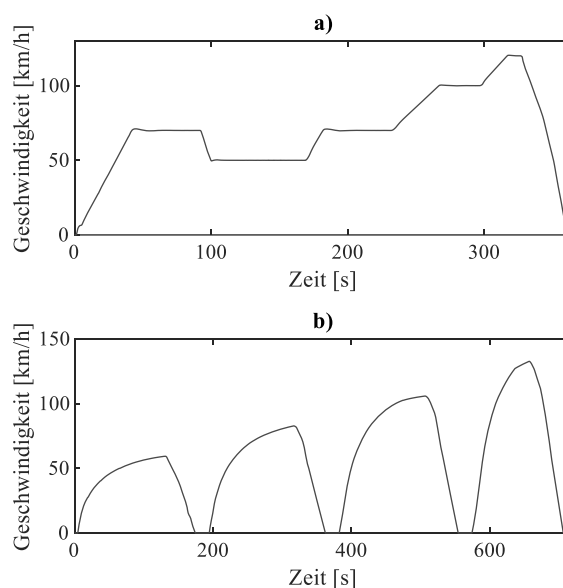


Abbildung 3: Gemessene Geschwindigkeitsverläufe als Eingangsgrößen des Simulationsmodells.
a) Manöver 2, b) Manöver 3

Manöver 4. Das vierte Manöver beschreibt einen Abschnitt eines generischen Geschwindigkeitsverlaufs. Hierzu gehören ein innerstädtischer-, ein außerstädtischer- sowie ein Autobahnabschnitt. Der Verlauf zeichnet sich durch eine erhöhte Dynamik und höhere Spitzengeschwindigkeiten aus. Das Geschwindigkeitsprofil wird innerhalb des erweiterten Simulationsmodells als Eingangsgröße des Fahrermodells verwendet. Der durch die Simulation berechnete Fahrpedalverlauf entsprechend Abbildung 4, dient wiederum als Sollwertverlauf des Fahrroboters. Dabei wird der Rollenprüfstand im ersten Schritt in Lastsimulation betrieben. In einem weiteren Schritt erfolgt dann der Übertrag unter Verwendung der v - α Regelung durch Vorgabe der Geschwindigkeit aus den Simulationsdaten. Das Analyse Kriterium stellt im ersten Schritt die gemessene Fahrzeuggeschwindigkeit hinsichtlich ihrer Abweichungen gegenüber dem durch die Simulation berechneten Verlauf dar. Im zweiten Schritt wird zusätzlich der Verlauf der Antriebsarbeit als resultierende Größe betrachtet.

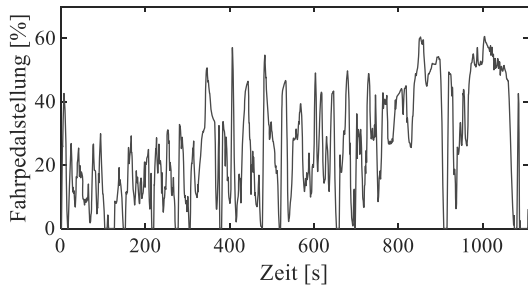


Abbildung 4: Fahrpedalverlauf als Eingangsgröße der Validierungsumgebung, Manöver 4.

2 Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Ergebnisse der Validierungsprozesse zur Parameterbestimmung und Modellvalidierung anhand der vorgestellten Fahrmanöver präsentiert. Es wird dabei zunächst auf das Manöver der Parameterbestimmung und anschließend auf die Validierung des Simulationsmodells eingegangen.

2.1 Modellparameter

Abbildung 5 zeigt das anhand des Fahrmanövers 1 bestimmte Drehmomentkennfeld. Die Drehmomentwerte spiegeln dabei das effektive Drehmoment an der Kurbelwelle des Motors wider. Der Anstieg des Nullniveaus des Motordrehmoments bei höheren Drehzahlen reflektiert einerseits die quadratische Abhängigkeit des Motorschleppmoments von der Drehzahl in Folge von viskoser Reibung. Andererseits wirken sich im Bereich geringer Lasten auch die Charakteristik der Geschwindigkeitsregelung des Fahrroboters und der Kennlinie des Fahrpedals aus.

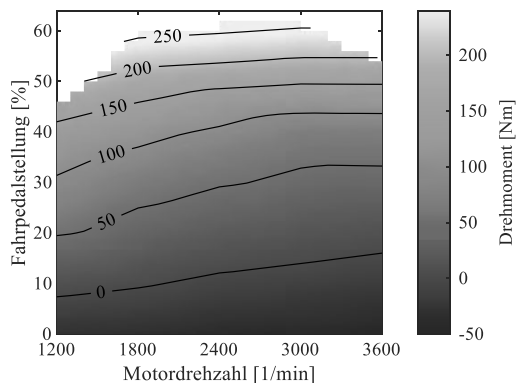


Abbildung 5: Rasterkennfeld des Motordrehmoments in Abhängigkeit der Motodrehzahl und der Fahrpedalstellung

2.2 Ergebnisse der Modellvalidierung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Validierung des Simulationsmodells anhand der Testinterpretation der Fahrmanöver aus Abschnitt 1.5 vorgestellt. Die Charakterisierung von Abweichungen zwischen den Simulations- und Referenzdaten erfolgt anhand einer Regressionsgerade zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Datensätzen. Diesen liegt dabei ein gemeinsamer Zeitvektor als Bezugsgröße zugrunde. Die Bewertung der quantitativen Abweichungen erfolgt anhand von Streudiagrammen.

Die Testinterpretation von Fahrmanöver 2 hinsichtlich der Abbildung der Zugkraft zeigt Abbildung 6. Dabei zeigen sich bereits beim Vergleich der Verläufe große Abweichungen bei negativen Werten der Zugkraft in Folge der stark vereinfachten Modellierung des Bremssystems. Da die Verzögerung des Fahrzeugs bei verbrennungsmotorischen Antrieben jedoch nicht durch das Fahrpedal realisiert wird, sind diese Bereiche für die vorliegende Untersuchung nicht relevant und werden daher nicht berücksichtigt.

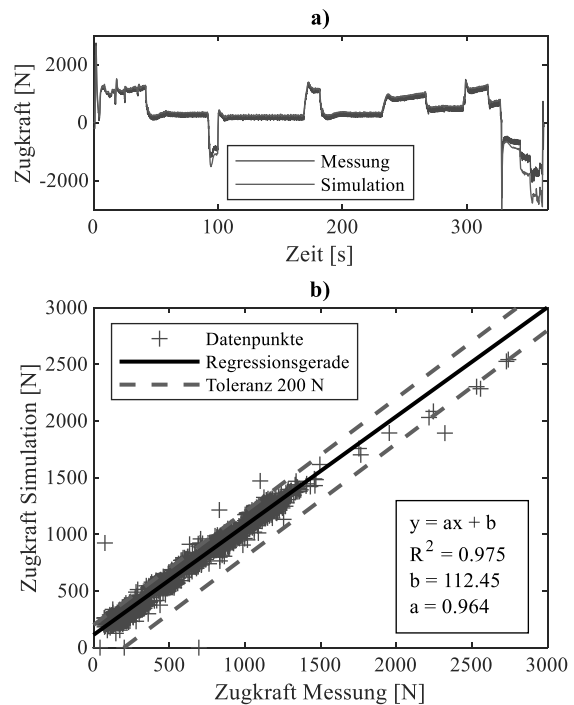


Abbildung 6: Testinterpretation Manöver 2.

- a) Vergleich der Zugkraftverläufe,
- b) Streudiagramm

In den relevanten Bereichen zeigt sich dagegen ein stark linearer Zusammenhang zwischen den Datensätzen. Dies spiegelt sich sowohl in der Verteilung der Datenpunkte

als auch in der Steigung der Regressionsgeraden wider. Es treten jedoch konstante Abweichungen auf, die mit Toleranzen bei der Lastanpassung zur Justage der simulierten Fahrwiderstände am Rollenprüfstand zusammenhängen. Trotz der großen Spannweite der Schwankungen des Messsignals von 100 N, befindet sich nur ein sehr geringer Anteil der Datenpunkte außerhalb einer Toleranz von 200 N. Dies kommt auch durch den hohen Wert des Bestimmtheitsmaß der Regressionsgerade zum Ausdruck.

In Bezug auf die Fahrpedalstellung treten die größten Abweichungen der Simulation gegenüber dem realen Fahrzeugverhalten im Anfahrvorgang auf. Dies zeigt sich innerhalb der Testinterpretation des dritten Fahrmanövers entsprechend Abbildung 7 insbesondere bei der Betrachtung des Streudiagramms im Bereich von $\alpha < 10\%$.

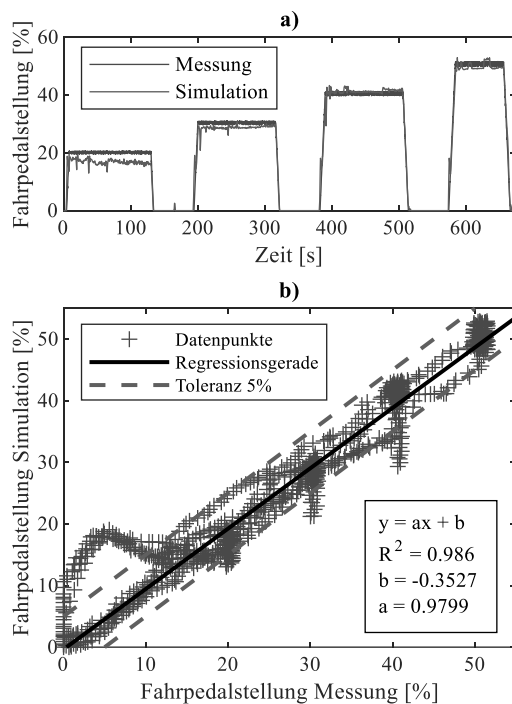


Abbildung 7: Testinterpretation Manöver 3.

- a) Verläufe der Fahrpedalstellung,
- b) Streudiagramm der Fahrpedalstellung

Die Abweichungen in diesem Bereich sind auf den stark vereinfacht modellierten Anfahrvorgang zurückzuführen. Dieser Fahrzustand wird beim realen Fahrzeug durch ein elektronisches System gesteuert, sodass direkt nach dem initialen Lösen der Bremse ein Drehmoment am Rad erzeugt wird. Innerhalb des Simulationsmodells wird der Zustand durch die Fahrpedalstellung eingestellt. In den

Bereichen oberhalb von $\alpha = 10\%$ werden dagegen Toleranzen von 5 % größtenteils eingehalten. Die außerhalb liegenden Datenpunkte bei den definierten Sollwerten des Fahrmanövers sind auf geringe Unterschiede des dynamischen Verhaltens bei der Änderung des Fahrpedals zurückzuführen, die aufgrund der hohen Gesamtdynamik zu großen absoluten Abweichungen führen.

Bei der Durchführung des Fahrmanövers 4 in Lastsimulation wirken sich die zuvor identifizierten Ungenauigkeiten bei der Abbildung des Fahrzeugverhaltens aus, sodass das durch die Simulation berechnete Geschwindigkeitsprofil entsprechend Abbildung 8 nicht exakt reproduziert wird. Trotz der hohen Geschwindigkeiten und der hohen Dynamik, die bei dem Fahrmanöver auftreten, beträgt die maximale Abweichung 6,5 km/h bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h.

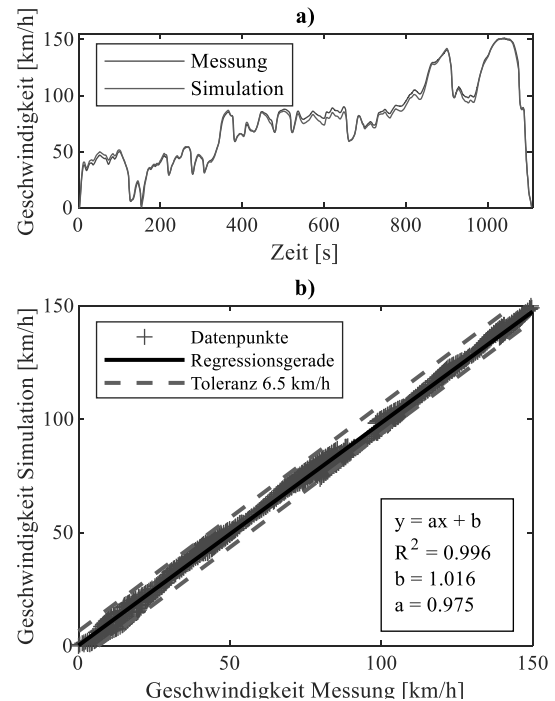


Abbildung 8: Ergebnisse Testinterpretation Manöver 4.

- a) Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe,
- b) Streudiagramm der Geschwindigkeit

Zum Nachweis der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf die Anwendung alternativer Regelarten wird jeweils die verrichtete Antriebsarbeit bei Anwendung der Lastsimulation (LS) und der $v-\alpha$ Regelung zur Durchführung des vierten Fahrmanövers betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Es zeigen sich dabei quantitative Unterschiede in den Verläufen, die auf eine höhere abgegebene Leistung in Lastsimula-

tion hindeuten. Dies ist eine Folge unterschiedlicher Betriebspunkte des Motors in Folge von unterschiedlichen Schaltvorgängen. Insgesamt nimmt jedoch die relative Abweichung der verrichteten Antriebsarbeit mit 0,13 % einen sehr kleinen Wert an.

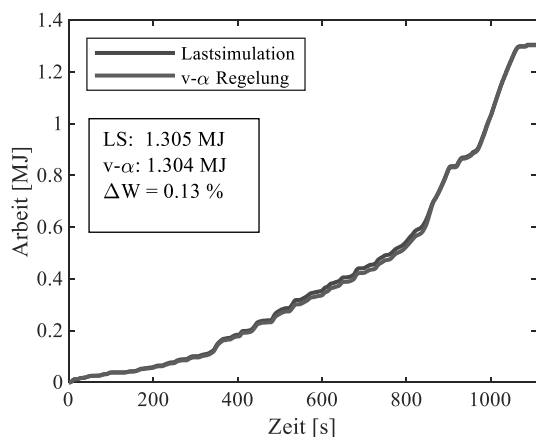


Abbildung 9: Ergebnisse Testinterpretation Manöver 4: Verrichtete Antriebsarbeit in Lastsimulation (LS) und v - α Regelung

3 Fazit und Ausblick

Anhand dieses Beitrags soll die Hypothese überprüft werden, dass bereits Simulationsdaten eines einfachen Längsdynamikmodells ausreichend sind, um einen Rollenprüfstand mit alternativen Regelarten zu betreiben. Das Ziel dabei ist, generische Fahrmanöver auf den Rollenprüfstand übertragen zu können, ohne die Notwendigkeit der Durchführung einer aufwändigen Justage der durch den Rollenprüfstand simulierten Fahrwiderstände.

Das verwendete Fahrzeugmodell in Kombination mit den ermittelten Parametern kann prinzipiell zur Abbildung des makroskopischen Fahrzeugverhaltens bei umfangreichen Fahrmanövern mit hoher Dynamik eingesetzt werden. Es ist jedoch aufgrund der simplen Struktur und der groben Parametrisierung mit entsprechenden Ungenauigkeiten zu rechnen. Beispielsweise erfordert die exakte Abbildung des Anfahrvorgangs eine höhere Modellierungstiefe bezüglich des betreffenden Regelsystems sowie des Bremssystems. Ähnliches gilt hinsichtlich der Modellierung des Motors und Getriebes zur Gewährleistung einer exakten Abbildung der Antriebskräfte in allen relevanten Geschwindigkeitsbereichen. Wird diese Genauigkeit jedoch nicht explizit gefordert, sind die Simulationsergebnisse durchaus ausreichend zum Übertrag generischer Fahrmanöver in der v - α Regelung. Da dies die einzige untersuchte Regelart darstellt, kann

die Hypothese nur in diesem Zusammenhang bestätigt werden. Für weitere Regelarten wie n - α sind daher separate Untersuchungen notwendig.

Acknowledgement

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und den Ländern im Rahmen des Programms „Innovative Hochschule“ (IHS) unter dem Förderkennzeichen 03IHS024B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. Die Autoren bedanken sich bei dem Team der AIP GmbH & Co. KG für ihren Beitrag zu der im Rahmen dieser Papers veröffentlichten Arbeit.

Literatur

- [1] Tschöke, H. Hintergrund und Motivation In: Tschöke H (Hsg.). *Real Driving Emissions (RDE)*. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2019. S 1-15.
- [2] Roberts P J, Mumby R, Mason A, Redford-Knight L, Kaur P. RDE Plus - The Development of a Road, Rig and Engine-in-the-Loop Test Methodology for Real Driving Emissions Compliance. *SAE Technical Paper*. SAE International; 2019. 12 S. doi: 10.4271/2019-01-0756
- [3] Albers A, Behrendt M, Klingler S, Matros K. Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Lindemann U (Hsg.). *Handbuch Produktentwicklung*. München: Hanser; 2016. S. 541-569
- [4] Düser T. *X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen* [Dissertation]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT); 2010.
- [5] Paulweber M, Lebert K. *Mess- und Prüfstandstechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2014. 430 S.
- [6] Cortès S, Dettmann C, Heubuch A, Schneider N, Boche P. Impact of control types of a chassis dynamometer on the reproduction of real world driving scenarios. *FISITA World 2021 Congress*; 2021 Sept; Prag.
- [7] Matros K, Schille F, Behrendt M, Holzer H. Manöverbasierte Validierung von Hybridantrieben. *ATZ*. 2015; 117: 64-71. doi: 10.1007/s35148-015-0384-z
- [8] Kraft CP, Staffen M. Fahrroboter ohne Anlernphase für den Rollenprüfstand. *ATZ Extra*. 2011; 16: 42-46. doi: 10.1365/s35778-011-0570-x
- [9] Maha-AIP GmbH & Co. KG. *The Road in Your Lab...*

Zukunftsweisende Prüfsysteme für reproduzierbare Straßenfahrt-Simulationen. Haldenwang: 2016. 52 S.

- [10] DEDITEC GmbH. *Datenblatt RO-CAN-Serie.* 2021
- [11] Kötter H, Sequenz H. Stationäre Motorvermessung mit verschiedenen Methoden und Modellen. In: Isermann R (Hsg.). *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe.* 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner; 2010. S. 130 – 162.
- [12] Kistler Group. *WPT Sensoren – Radimpulsgeber.* 2017.