

Echtzeitsimulation hochdynamischer Fahrzeugantriebe

Häckh, Jakob¹, Willmerding, Günter¹

¹Steinbeis Transferzentrum Verkehrstechnik.Simulation.Software

www.stz-verkehr.com

Abstract

Die Anforderungen an Fahrzeugantriebe sind vielfältig und es wird ein sehr großer Aufwand betrieben, um alle Anforderungen hinsichtlich Fahrleistung, Emissionen, Lebensdauer, Kraftstoffverbrauch zu erfüllen. Um eine effiziente Entwicklung in kurzer Zeit zu ermöglichen, werden Computersimulationen, Prüfstandssimulationen und Fahrversuche durchgeführt. Bei den Fahrversuchen werden reale Streckendaten erfasst, die dann Grundlage für die Prüfstands- und Computersimulationen sind.

Das Nachfahren von den, in der Realität gemessenen Fahrzyklen auf einem Antriebsstrang-Prüfstand, ist eine regelungstechnisch sehr anspruchsvolle Aufgabe, da die Elemente des Antriebsstrangs relativ große Totzeiten und Nichtlinearitäten aufweisen. Zur Lösung des Problems wurde eine Kombination von Steuerung und Regelung gewählt. In der Prüfstandssteuerung wird dazu eine Echtzeitsimulation des Antriebsstrangs, unter den Prüfstandsbedingungen durchgeführt und die Stellgrößen (Gaspedalstellung, Bremse, Gang, etc.) werden an den Prüfstand übergeben. Die Reaktionen des Prüfstands werden mit denen des Simulationsmodells verglichen und Abweichungen zwischen Prüfstandsverhalten und Simulationsmodell werden verwendet, das Simulationsmodells anzupassen.

Dieses System wird seit Jahren bei führenden Automobilfirmen zur Antriebsstrang-Simulation und Prüfstands-Steuerung eingesetzt und hat sich sowohl bei Pkw als auch bei Busantrieben bewährt.

1 Einleitung

Prüfstandszyklen für Gesamtantriebsstrangerprobungen werden überwiegend als Blockprogramme oder Konstantfahrzklen (z.B. unter Überlast) durchgeführt. In [6] wurde gezeigt, dass das kritische Bauteilkollektiv für die Auslegung im Hinblick auf Lebensdauer hilfreich ist, wozu jedoch reale Fahrzyklen – im Folgenden als On-Line-Simulation bezeichnet – zu Grunde zu legen sind. Die Möglichkeit reale Fahrzyklen nachzufahren stellt einen Meilenstein für die Antriebsstrangerprobung dar, da praxisnähere Ergebnisse erzielt werden können.

Anfängliche Versuche zur Online-Simulation führten jedoch zu starken Verspannungen im Antriebsstrang und damit zu unbrauchbaren Ergebnissen.

Die Realisierung eines Prüfstands zur Online-Simulation, bei dem die Probleme der Verspannung gelöst wurden, gelang für Bus-Antriebsstränge vor der Jahrtausendwende für einen BBC-Prüfstand, der seitdem erfolgreich bei einem Bus-Getriebehersteller eingesetzt wird.

Auch für hochdynamische Pkw-Fahrzeugantriebe konnte eine Prüfstandssteuerung für die On-Line-Simulation zusammen mit der Daimler AG entwickelt werden [4]. Arbeiten zur Optimierung und robusten Regelung folgten [3] und das System wurde als wichtiger Teil der Entwicklungsmethodik von der Daimler AG bewertet [1].

Auf Grund positiver Ergebnisse für die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Prüfstandssimulationen im Vergleich mit Fahrversuchen [17], wurde die Prüfstandssimulation mit winEVA bei der Daimler AG ausgerollt und seitdem eine große Zahl von Prüfständen so ausgestattet.

Die weitere Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich auf die einfache Datenermittlung für die Parameterierung des Prüfstands, insbesondere der dynamischen Kenngrößen durch Lernzyklen, die robuste Fehlerbehandlung bei dem Betrieb und die Einbeziehung von Hybrid-Topologien [18] in die Simulation.

Folgende wesentlichen Elemente sind für Prüfstandssteuerung mittels Online-Simulation erforderlich:

- ✓ Detailliertes Antriebsstrangmodell mit allen wesentlichen Antriebsstrangkomponenten
- ✓ Wegbasierte Simulation der Wunschgeschwindigkeit (Wunschgeschwindigkeitssimulation unterscheidet sich hierbei durch größere Geschwindigkeitsintervalle vergleichbar mit den Geschwindigkeitsangaben bei einer Fahrzeugfahrt auf öffentlichen Straßen)
- ✓ Das Fahrermodell strebt unter Berücksichtigung von Streckendaten wie Steigung, Krümmung, und Geschwindigkeit, sowie Fahrereingriffen wie Gangbegrenzung oder Wahl geänderter Fahrprogrammen diese Wunschgeschwindigkeit an
- ✓ Rückkopplung von Prüflingsreaktionen in die Online-Simulation
- ✓ Durch Lernzyklen lernt die Online-Simulation automatisiert die Besonderheiten des Prüfaufbaus
- ✓ Übertragbarkeit der Prüfprogramme auf unterschiedliche Prüfstandssteuerungen

Potenziale unter Nutzung des Systembaukastens:

- ✓ Verkehrsflussabhängige Simulationen können einen Beitrag zur Ermittlung der Steuerung der Einsatzbedingungen leisten [9]
- ✓ Systeme zur Erfassung von Streckenvorgaben beschleunigen den Transfer von Straßenerprobungen auf den Prüfstand
- ✓ Schadensakkumulationsanalysen zur Ermittlung ein-satzbezogener Beanspruchungen der Antriebsstrangkomponenten sowie der Fokussierung auf die kritischen Bauteilkollektive [6]
- ✓ Effektive realitätsnahe Lebensdauerabschätzung von Antriebsstrangkomponenten [7]
- ✓ Analyse von hochdynamischen Vorgängen wie Schaltvorgängen in Automatgetrieben erlauben Aussagen über Funktion, Komfort und Lebensdauer [5]
- ✓ Vergleich von neuen Antriebskonzepten unter realitätsnahen Betriebsbedingungen [4]

2 Echtzeitsystem für die Online-Simulation

Die für die Prüfstandssteuerung mittels Online-Simulation verwendete Antriebsstrangsimulation winEVA entspricht aufbauseitig den objektorientierten Simulationssystemen, die im vorliegenden Fall nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip arbeitet. Traditionell sind die Rechenzeiten dieser Systeme nicht echtzeitsynchron, so dass bei der Verwendung von unterschiedlichen Systemen auf Prüfständen die Echtzeitfähigkeit über eine Echtzeitbox hergestellt werden muss, hierfür wird die Rechenzeit der Online-Simulation entsprechend „heruntergebremst“.

2.1 Prüfstandssteuerung

Die Aufgaben der klassischen Prüfstandssteuerungen sind unter anderem die Steuerung, Aktivierung und Überwachung,

- ✓ der Sicherheitssysteme wie Warn- und Abschaltbedingungen oder in kritischen Situationen die Aktivierung der Löschsysteme,
- ✓ der Hilfsbetriebe wie Kraftstoff, Kühlwasser, Luft, el. Versorgung... ,
- ✓ der Kommunikations- und Bussysteme incl. Restbus-simulation, der Messsysteme,
- ✓ die Übertragung und Regelung der Vorgabewerte, usw..

Ein Teil der Prüfstandssteuerung stellen die Vorgabesysteme dar, die den Programmablauf das sog. Prüfprogramm abbilden und auf den Prüfaufbau übertragen.

Im vorliegenden Fall ist unter der Prüfstandssteuerung mittels Online-Simulation der Teil der Prüfstandssteuerung für die Vorgabesysteme zu verstehen. Verglichen mit der Straßenerprobung stellt die Prüfstandssteuerung mittels Onlinesimulation im Wesentlichen die Aufgabe des Fahrers dar. Ziel des Vorgabesystems und somit der Online-Simulation ist, unter Berücksichtigung vieler Parameter, einem vorgegebenem Geschwindigkeitsverlauf zu folgen. Hierfür muss die Simulation ständig ein Kräftegleichgewicht zwischen den Fahrwiderständen, die sich aus den Steigungswiderständen, den Luftwiderständen, den Rollwiderständen und den Beschleunigungswiderständen ergeben und dem Zugkraftangebot aus dem Antriebsstrang über den Pedalwert des Fahrers herstellen. Das Prinzip der Antriebsstrangprüfstandssteuerung ist in Abbildung 1 vereinfacht (Bremsse fehlt) dargestellt.

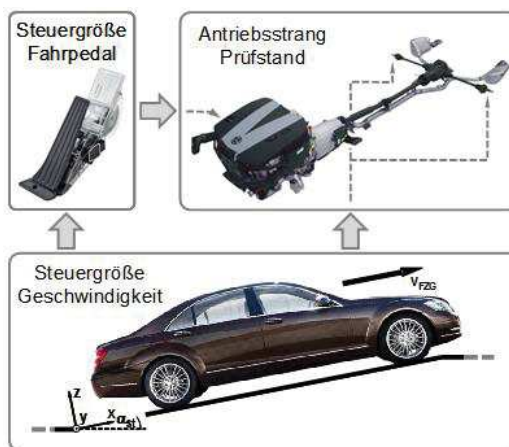


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Aufgabe der Prüfstandssteuerung

2.2 Prüfstandssteuerung als Regler

Der nachfolgende Abschnitt verdeutlicht die Begrifflichkeit der Prüfstandssteuerung mittels Online-Simulation im Gegensatz zur Prüfstandsregelung und zeigt die möglichen Ausführungen von Reglern und deren Auswahl.

Klassifizierung des Reglers

Die Eigenschaften eines Reglers, der für die vorliegende Aufgabe geeignet ist, muss folgende Funktionen aufweisen, [3]:

- ✓ **Zeitinvarianz:** Ein System ist zeitinvariant, wenn es auf eine Erregung unabhängig davon reagiert, wann das Ereignis eintritt. Das vorliegende System ist nicht zeitinvariant.
- ✓ **Folgeregelung:** Bei der Prüfstandsregelung handelt es sich um eine Folgeregung. Das geht aus der Forderung hervor, dass ein bestimmter Geschwindigkeitsverlauf nach gefahren werden muss. Bei einer Folgeregung empfiehlt sich eine Vorsteuerung.
- ✓ **Linearität:** Bei dem Prüfstand handelt es sich um ein nicht lineares System, da einzelne Komponenten nicht-linear sind. Das vorliegende System lässt sich aufgrund ständiger Arbeitspunktverschiebungen nicht sinnvoll linearisieren.
- ✓ **Kausalität:** Die Kausalität besagt, dass ein bestimmter Wert einer Eingangsgröße das Verhalten des Systems nur in den folgenden Zeitschritten beeinflusst. Bei diesem System ist die Kausalität gegeben.
- ✓ **Totzeitsystem mit sehr großer Totzeit.** Wichtig bei der Beurteilung der Totzeit ist das Verhältnis zwischen Totzeit und Anstiegszeit der Sprungantwort.
- ✓ $T_{\text{Totzeit}} / T_{\text{Anstiegszeit}} \ll 1$
- ✓ Bei diesem System handelt es sich um ein Totzeitsystem

Einfache Regler

Um die in Kapitel 2.1 genannten Anforderungen gerecht zu werden, könnte die Prüfstandssteuerung als typischer Regler [13], wie in Abbildung 2 dargestellt, ausgeführt werden.

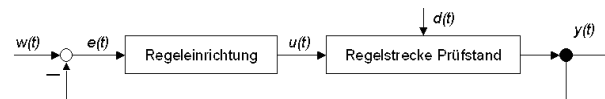


Abbildung 2: Prüfstandssteuerung als Regler

- $w(t)$ Führungsgröße, in diesem Fall der vorgegebene Geschwindigkeitsverlauf.
- $e(t)$ Regelabweichung.
- $u(t)$ Stellgröße, bei der Prüfstandssteuerung die Fahrpedalstellung.
- $d(t)$ Störgröße, bei der Prüfstandssteuerung sind es

die Summe der vorgegebenen Fahrwiderstände und die zu beschleunigende reduzierte Masse. Dies sind keine unbekanntenen Störgrößen im eigentlichen Sinn, sondern sie könnten aus den Fahrzeugdaten, dem Geschwindigkeitsverlauf und den Streckendaten berechnet werden.

- $y(t)$ Regelgröße, in diesem Fall die Fahrgeschwindigkeit.

Regler mit Vorsteuerung

Da es sich bei der Prüfstandsregelung um eine Folgeregung (Geschwindigkeitsverlauf) und nicht um eine Festwertregelung handelt, ist oft ein schnelles Umsteuern des Systems notwendig, was durch eine Vorsteuerung wie in Abbildung 3 dargestellt erreicht werden kann [14].

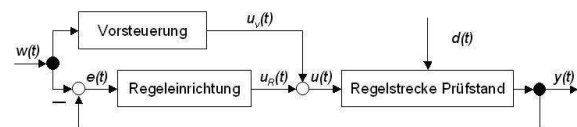


Abbildung 3: Prüfstandssteuerung als Regler mit Vorsteuerung

- $u_V(t)$ Anteil der Stellgröße aus der Vorsteuerung.
- $u_R(t)$ Anteil der Stellgröße aus der Regelung

Damit wären die wünschenswerten Eigenschaften der Robustheit und Störkompensation der Regelung mit der schnellen Umsteuerung kombiniert. Dabei sollte die Vorsteuerung so gewählt werden, dass die Prüfstandstrecke möglichst schnell der Führungsgröße $w(t)$ nachgeführt wird. Die Regelung sorgt dafür, dass die Störung $d(t)$ sowie die Wirkung der Modellunsicherheit ausgeglichen wird.

Regler mit Vorsteuerung und Störgrößenaufschaltung

Als Erweiterung der Prüfstandsregelung bietet sich eine Störgrößenaufschaltung an. Denn bei der Prüfstandsregelung ist die Störgröße bekannt. Die Störgröße besteht aus den berechneten Fahrwiderständen. Diese Information kann also als Stellgröße benutzt werden und fließt nicht erst in die Regelung ein, wenn die Auswirkungen am Ausgang der Regelstrecke messbar sind. Ein Regler mit Störgrößenaufschaltung ist in Abbildung 4 dargestellt.

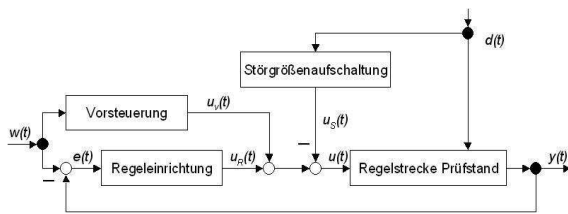


Abbildung 4: Prüfstandsteuerung als Regler mit Vorsteuerung und Störgrößenaufschaltung

$u_s(t)$ Anteil der Stellgröße, welcher über die Störgröße kompensiert wird

Beim Regler mit Störgrößenaufschaltung, muss der Regler nur während des dynamischen Übergangsvorgangs eingreifen, denn die Störgröße wird vollständig über die Störgrößenaufschaltung kompensiert.

IMC-Regler

Als weitere Erweiterung bietet sich an, die Prüfstandsregelung als IMC-Regler (Internal Model Control) [13] auszuführen. Bei den bisher beschriebenen Regelungen würden die im Modell enthaltenen Informationen über das Verhalten der Regelstrecke in die Wahl der Regelparameter nicht eingehen und die Regleinrichtung würde das Modell nicht enthalten.

Es bietet sich jedoch an, das Prüfstandsmodell als Modell im Regelkreis zu verwenden und als Regelparameter die Antriebsstrangparameter zu verwenden. Der innere Regelkreis kann dynamische Eigenschaften haben und die Regelstrecke realistisch als Modell abbilden, so dass eine Vorsteuerung dadurch überflüssig wird. Die Prüfstandsteuerung als IMC-Regler ist in Abbildung 5 dargestellt.

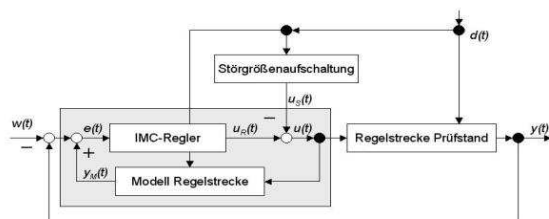


Abbildung 5: Prüfstandsteuerung als IMC-Regler

$y_M(t)$ Regelgröße des Modells der Regelstrecke (Prüfstandsmodell).

Würde nun das Prüfstandsmodell das gleiche Verhalten aufweisen wie der Prüfstand,

ModellRegelstrecke= RegelstreckePruefstand

so würde die äußere Regelabweichung $y(t) - w(t)$ verschwinden, da der innere Regelkreis die Regelabweichung komplett kompensiert. Der innere Regelkreis könnte somit als Vorwärtssteuerung betrachtet werden. Die Störgrößenaufschaltung bleibt natürlich wie beim vorherigen Modell erhalten. Dieser Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.

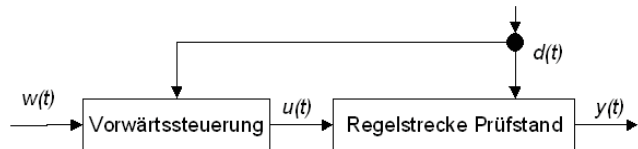


Abbildung 6: Prüfstandsteuerung als Vorwärtssteuerung

2.3 Auswahl des geeigneten Regelverfahrens

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, erfüllt das vorliegende System nicht alle Anforderungen die an eine stabile Regelung gestellt werden. Vor allem die großen Totzeiten des Systems stellen eine besondere Herausforderung dar. Hierbei gelten Systeme bis zu einem Verhältnis von Totzeit zur Anstiegszeit in der Größenordnung von 0,3 noch als regelbar [15]. Das Verhältnis beim vorliegenden System ist teilweise über 1. Das bedeutet, dass dieses System mit herkömmlichen Methoden nicht regelbar ist.

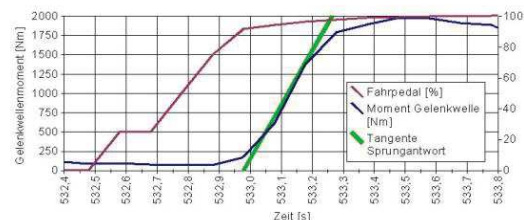


Abbildung 7: Sprungantwort: Gelenkwellenmoment als Reaktion auf einen Fahrpedalsprung

In Abbildung 7 ist die Antwort des Prüfstandes auf eine schnelle Gaspedaländerung von Null auf Vollast dargestellt. Obwohl es sich eigentlich um ein rampenförmiges Signal handelt, wird im Folgenden von Sprungantwort gesprochen, da die Änderungsgeschwindigkeit sehr hoch ist. Zur Beurteilung der Sprungantwort wird nicht die Geschwindigkeit welche die Regelgröße darstellt verwendet, sondern das Gelenkwellenmoment. Die Geschwindigkeit wäre in diesem Falle nicht sehr aussagekräftig, da sie eine integrierte Größe ist.

Bei einer Vollastbeschleunigung ist wichtig, mit welcher Beschleunigung der Antriebsstrang eine bestimmte Zielgeschwindigkeit erreicht. Das Gelenkwellenmoment wird als Regelgröße verwendet, da es im direkten Zusammenhang mit der Beschleunigung steht und später entscheidend in die Lebensdauerberechnung der Bauteile eingeht. Das Verhältnis zwischen Totzeit und Anstiegszeit der Sprungantwort in Abbildung 7 wird folgendermaßen berechnet.

$$\begin{aligned}
 T_{\text{Totzeit}} &= 532,97 \text{ [s]} - 532,65 \text{ [s]} \\
 T_{\text{Anstiegszeit}} &= 533,26 \text{ [s]} - 532,97 \text{ [s]} \\
 T_{\text{Totzeit}}/T_{\text{Anstiegszeit}} &= 1,1
 \end{aligned}$$

Das Verhältnis 1,1 ist viel zu groß und erlaubt keine Prüfstandssteuerung mit einem herkömmlichen Regler.

3 Validierung der Regelungsgüte

Die Regelungsgüte wird anhand statistischer Verfahren und deren Kenngrößen durchgeführt. Hierbei werden die Prüflaufdaten eines kompletten Dauerlaufs ausgewertet. Dieser Dauerlauf besitzt eine Gesamtlänge von mehreren 10.000 km und stellt belastungsseitig einen durchmischten Kundenbetrieb unter verschärften Bedingungen dar.

3.1 Verweildauerkollektive

Grundsätzlich zeigen die Verweildauerkollektive von Motor und der Gelenkwelle sehr gute Übereinstimmung zwischen der Simulationsvorgabe und der Prüfaufbaureaktion. Hierbei ist in Abbildung 8 u. 9 auf der x-Achse die zugehörige Drehzahl und auf der y-Achse das zugehörige Moment aufgetragen, die Farbgebung kennzeichnet die Verweildauer der jeweiligen Lastpunkte in logarithmischer Darstellung. Für die Bewertung ist die Farbgebung entscheidend, aus der die Häufigkeiten der gefahrenen Lastpunkte hervorgeht. Je roter die Farbgebung, desto häufiger werden die Lastpunkte angefahren, je grüner desto seltener, blaue Bereiche liegen außerhalb des Kennfelds und werden somit überhaupt nicht gefahren. Aus dem direkten Vergleich kann beispielsweise festgestellt werden, dass die Modellierung des Schubmomentenbereichs des Motors, vgl. Abbildung 8 der Simulation verbesserungsfähig ist.

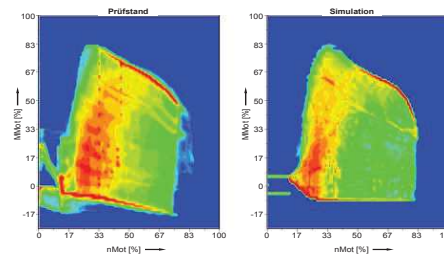


Abbildung 8: Verweildauerzählung der Motordrehzahl (n_{Mot}) und -moment (M_{Mot})

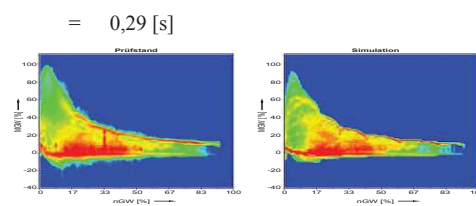


Abbildung 9: Verweildauerzählung der Gelenkwelldrehzahl (n_{GW}) und -moment (M_{GW})

3.2 Gangverteilung

Die Gangverteilung zeigt die Verweildauer im jeweiligen Gang während des Prüflaufs von der Simulationsvorgabe und der Prüfaufbaureaktion. Hierbei werden Abweichungen im Schaltprogramm zwischen der Simulationsvorgabe und der Prüfaufbaureaktion deutlich. Grundsätzlich zeigen die Gangverteilungen brauchbare Übereinstimmung, vor allem unter dem Gesichtspunkt, dass die Anteile der Neutralstellung und des ersten Gangs des Prüfaufbaus addiert werden müssen, um die Verweildauern des ersten Gangs der Simulationsvorgabe zu erhalten. Der Grund hierfür liegt am Stopp/Start-System, bei dessen Implementierung in der Simulation der erste Gang eingelegt bleibt, der reale Aufbau aber auf Neutral schaltet. Ansonsten sind größere Abweichungen im 3. Gang festzustellen, vgl. Abbildung 10. Dies erklärt sich durch geänderte Softwarestände beim Prüfaufbau ohne Anpassung der Parametrierung des Simulationsmodells.

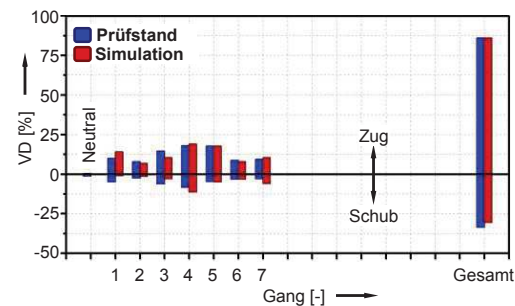


Abbildung 10: Gangverteilung Verweildauer (VD)

3.3 Überrollungsschädigung

Bei der Überrollungsschädigung werden wegen des logarithmischen Zusammenhangs zwischen Lastamplitude und Schädigung Unterschiede der Signalgrößen verstärkt erkennbar. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Darstellungen wird hier eine relative Auswertung verwendet, in der die 100 %-Linie Schädigungsgleichheit zwischen der Simulationvorgabe und der Prüfaufbaureaktion darstellt. Werte größer 100 % bedeuten, dass das Prüfkollektiv schärfer als die Vorgabe ist und umgekehrt. Nennenswerte Unterschiede sind ausschließlich im 7. Gang festzustellen, vgl. Abbildung 11. Gemessen am Gesamtkollektiv werden die Unterschiede als unbedeutend bewertet.

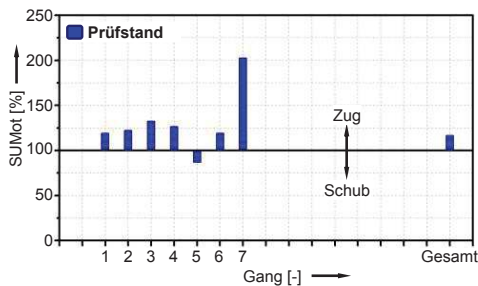


Abbildung 11: Überrollungsschädigung am Motor (SUMot) in relativer Darstellung

4 Weiterentwicklung der Prüfstandsteuerung

Der Vergleich der Modelldaten mit der Regelstrecke zeigt, dass zwar Abweichungen existieren, diese sind jedoch ausreichend klein. Entscheidend für die Güte der Prüfstandssimulation im Alltagsbetrieb ist, dass die Modelldaten einfach und kostengünstig ermittelt werden können.

Im ersten Schritt können die Modelldaten auf Grund der beim Automobilhersteller umfangreich ermittelten Komponentenmessungen angegeben werden. Es gelingt daher, ein brauchbares Startmodell zu erzeugen. Durch standardisierte Lernzyklen, die auf dem Prüfstand gefahren werden, werden die Unterschiede zwischen Modell und Regelstrecke erkannt und die Modelldaten ggf. korrigiert. Insbesondere der für die Simulationsgüte sehr wichtige Zusammenhang zwischen Pedalwert und Drehmoment wird auf diese Weise sehr einfach und realistisch ermittelt.

5 Ausblick und Zusammenfassung

Die hier beschriebene Prüfstandssteuerung mittels Online-Simulation wurde im Jahr 2007 als Prototyp für einen bestimmten Triebstrang eingeführt. In der Zwischenzeit hat sich dieses System bewährt und wird auf verschiedensten Ein- und Mehrmaschinenprüfständen für unterschiedlichste Triebstränge eingesetzt.

Die in Abschnitt 3 und 4 beschriebene Validierung des Vorgabesystems zwischen der Simulationvorgabe und der Prüfaufbaureaktion zeigt das Ergebnis ohne die Verwendung entsprechender Lernzyklen. Die Erweiterung der vergleichsweise einfachen Vorwärtssteuerung, durch die Rückführung von Zustandsgrößen des Prüfaufbaus in den IMC-Regler, reduzieren nochmals deutlich die hier diskutierten Unterschiede. Elementar hierbei ist, dass sich die Simulation dem Verhalten des realen Aufbaus, ohne dessen Betriebsstrategien zu verändern, automatisiert anpasst.

Durch die Entwicklung eines firmeninternen Vorgabesystems für die Antriebsstrangprüfstände unter Berücksichtigung, deren Anforderungen und dessen Integration in den Arbeitsablauf, konnten nicht nur bedeutend bessere Erprobungsergebnisse für die Antriebsstrangkomponenten erzielt werden, sondern auch Effizienzen durch deutlich reduzierte Abschaltungen gehoben werden.

Da in der Zwischenzeit diese Art der Prüfstandssteuerung sehr erfolgreich ist, wurden verschiedenste Schnittstellen zu anderen Prüfstandsdienstleistern aufgebaut.

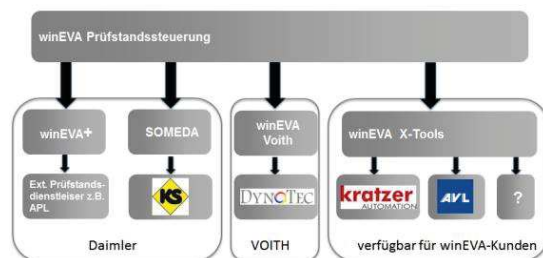


Abbildung 12: Übersicht Prüfstandssteuerung mit winEVA

6 References

- [1] Klos, W.; Schenk, M.; Schwämmle, T.; Müller, M.; Bertsche, B.: Antriebsstrangerprobung bei der Daimler AG, Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik, Stuttgart 29.8.2011
- [2] Willmerding, G.; Häckh, J.: Ein System zur Untersuchung von Fahrzeugantrieben zur Vorhersage von Fahrleistung, Kraftstoffverbrauch und Lebensdauer unter realistischen Einsatzbedingungen, Vortrag auf der VDI-Tagung Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung, 24.6.-25.6.2009, Würzburg
- [3] Häckh, J.: Untersuchung und Optimierung der Steuerung von Prüfständen zur Streckensimulation von Pkw-Antriebssträngen unter realistischen Einsatzbedingungen, Masterarbeit an der Hochschule Ulm, Fakultät Informatik, Nov. 2007.
- [4] Greiner, J., Dörr, C., Klos, W., Schwämmle, T.: Lastkollektive 7-Gang Automatikgetriebe W7A700, durchgängige Bewertung und Betrachtung im Entwicklungsprozess bei Mercedes-Benz, Getriebetagung Friedrichshafen, VDI-Berichte
- [5] Klos, W.: Gruppenschaltungsansteuerung von Nutzfahrzeuggetrieben, Dissertation 2004, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau Bericht Nr. 508, ISBN 3-922 823-60-2
- [6] Körner, T.; Depping, H.; Häckh, J.; Willmerding, G.: Fatigue Life Prognosis for Transmissions based on critical Component Spectrum; World Automotive Congress FISITA 2002, Helsinki, Paper Nr.F02V091
- [7] Körner, T.; Depping, H.; Häckh, J.; Willmerding, G.; Klos, W.: Rechnerische Lebensdauerabschätzung unter Berücksichtigung realer Belastungskollektive für die Hauptwelle eines Nutzfahrzeuggetriebes, DVM-Tagung Fulda vom 5. bis 6.6. 2002, VDI-Berichte N2. 1689, 2002 Seite 275 - 285
- [8] Willmerding, G.: A Simulation System to study the Working Conditions of Vehicles and to develop fuel efficient Drivetrains, Publication on the FISITA-Congress 1992, Institution of Mechanical Engineers, London 1992
- [9] Willmerding, G.: Ein Simulationsmodell für den Autobahnverkehr, Teil 1; Automobiltechnische Zeitschrift Heft 5/1992
- [10] Willmerding, G.: Ein Simulationsmodell für den Antriebsstrang, Teil 2. ATZAutomobiltechnische Zeitschrift, Heft 6, 1992
- [11] Willmerding, G.; Jehlicka, E.: Verbrauchsuntersuchungen an Stadtbussen, Zeitschrift der Nahverkehr 1986, Heft Seite
- [12] Willmerding, G.; Hoffmann, M.; Rasch, W.; Schicker, R.: Ermittlung der Einsatzverhältnisse militärischer Radkraftfahrzeuge durch Auswertung militärischer Übungen; Teil 4: Erfassung der Einsatzverhältnisse hinsichtlich Beanspruchungen bei der Übung "Große Rochade", Battelle-Bericht 1976
- [13] Jan Lunze. Regelungstechnik 1, Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelung. Springer –Verlag Berlin, 6., korrigierte Auflage, 2007.
- [14] G. Schlüter. Regelung technischer Systeme – interaktiv. Carl Hanser Verlag, München 2001.
- [15] ABB Automation Production. Einführung in die Regelungstechnik. Technische Information, 30/60-110 DE, 1(1):3, April 2003
- [16] W. Beitz und K.-H. Küttner. Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer –Verlag Berlin, 17, neu bearbeitete Auflage, 1990.