

# Ein System zur Untersuchung von Fahrzeugantrieben zur Vorhersage von Fahrleistung, Kraftstoffverbrauch und Lebensdauer unter realistischen Einsatzbedingungen

Prof. Dr. **Günter Willmerding**, M. Sc. **Jakob Häckh**, Dipl.-Ing.(FH)  
STZ-Neue Technologien in der Verkehrstechnik, Ulm

## Kurzfassung

Zur Vorhersage der Eigenschaften und des Verhaltens von Antrieben unter realistischen Einsatzbedingungen wurde ein Simulationssystem geschaffen und permanent in Zusammenarbeit mit Firmen der Automobilindustrie weiterentwickelt, das aus

einem Mess- und Auswertesystem (winADAM),  
einem Antriebsstrangcomputersimulationssystem (Software winEVA),  
einer Steuerungssoftware für dynamische Prüfstände (Software winEVA),  
und einem System zur Lebensdauervorhersage (Software winLIFE) besteht .

Das System ermöglicht die Prüfstands- und Rechnersimulation von kompletten Antrieben auf der Basis real gemessener Fahrzyklen mit identischen Ausgangsdaten für die Zyklenvorgabe. Es konnte daher ein Vergleich von Realität (Straßenfahrversuch), Prüfstandssimulation und Rechnersimulation vorgenommen werden und die Abweichungen der Simulationsergebnisse den Modellparametern bzw. Streckendaten zugeordnet werden. Die Abweichungen bezüglich der dynamischen Zeitverläufe (Motordrehmoment, Drehzahlen, Gangstufe, etc.), der statistischen Verteilungen (Gang, Gaspedal, Rainflow-Zählung) bis hin zur Auswirkung auf die Lebensdauer wurden untersucht und basierend auf den gewonnen Erkenntnissen das Simulationssystem verbessert. Es gelingt mit dem System neben Fahrdynamik und Kraftstoffverbrauch insbesondere die bezüglich Lebensdauer kritischen Bauteile eines Antriebs zu finden und deren Belastungskollektiv (kritisches Bauteilkollektiv) anzugeben.

## 1. Einleitung

Die Kenntnis über das Verhalten von Antrieben in Kraftfahrzeugen unter realistischen Einsatzbedingungen über größere Fahrstrecken ist bedeutsam für die Beurteilung von Fahrleistung, Wirtschaftlichkeit, Komfort und Lebensdauer. Die zunehmende Komplexität der Antriebe erfordert eine umfangreiche Erprobung, um auch seltene und unwahrscheinliche Ereignisse zu berücksichtigen.

Fahrversuche mit vollständiger Messausrüstung zur Erfassung der Einsatzbedingungen sind in der Konstruktionsphase (Verfügbarkeit) nicht und später wegen des Aufwands nur in begrenztem Umfang möglich. In [14, 15] wurde detailliert beschrieben, wie auf der Basis einer Messung von Kurs, Topografie und Fahrgeschwindigkeit realistische **Computer-**

**Simulationen** durchgeführt werden können und dass auf diese Weise Lastkollektive ausreichend genau vorhergesagt werden können.

Dieses System wurde für die **Prüfstandssimulation** von Pkw- und Bus Antrieben erweitert und mit dynamischen Prüfständen kombiniert, die so angesteuert werden, dass die dort auftretenden Beanspruchungen mit den gemessenen übereinstimmen [16].

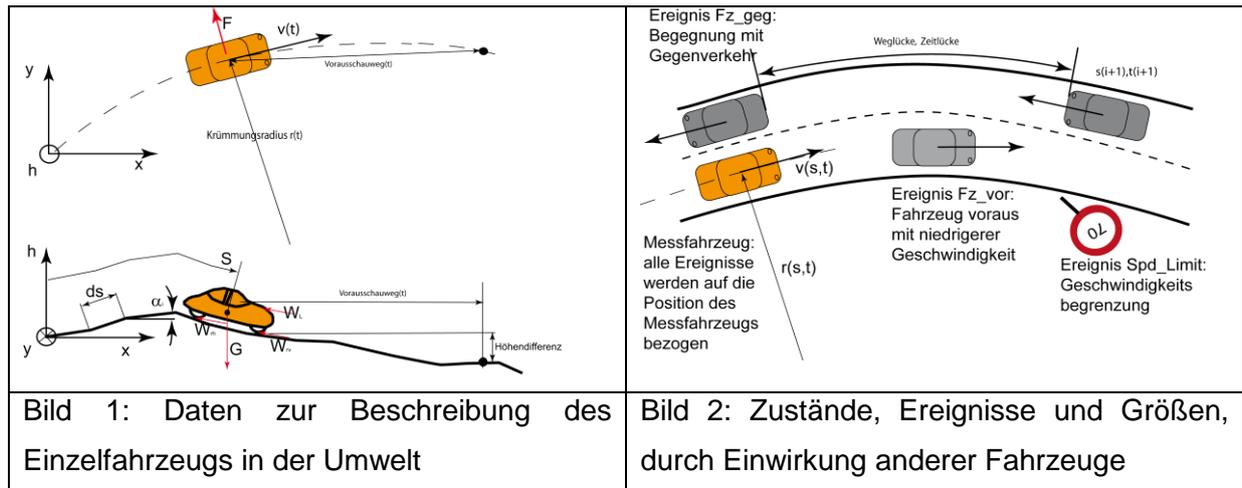
Ein wesentliches Ziel des Systems ist es, eine Versuchszeitverkürzung / Kostenreduktion dadurch zu erreichen, dass zunehmend Fahrversuche durch Prüfstandsversuche und Computersimulationen ersetzt werden. Um dies zu ermöglichen, wurde großer Wert darauf gelegt, dass auf einfache Weise ein Abgleich von Fahrversuch, Prüfstandsversuch und Simulation erfolgen kann. Der Vergleich der auf verschiedenen Wegen erhaltenen Ergebnisse hilft entscheidend bei der Beurteilung der Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung und ermöglicht gezielte Optimierungen.

## **2. Fahrer, Fahrzeug und Umwelt / Elemente des Simulationssystems**

Voraussetzung für eine realistische Simulation ist die ausreichend genaue Erfassung der Einflussparameter des Gesamtsystems bestehend aus dem Fahrzeug, seiner Umwelt einschließlich Verkehr und dem Fahrer. Die Aufgabe besteht nicht nur darin, die einzelnen Elemente sondern insbesondere auch deren Zusammenwirken realistisch zu beschreiben. Das Fahrzeug, das vergleichsweise einfach durch bekannte formelmäßige Zusammenhänge und entsprechende Differentialgleichungen zu beschreiben ist, wird durch einen Fahrer geführt, der Stallelemente (Gaspedal, Bremse, Lenkrad, etc.) bedient.

Die Fahrerreaktionen erfolgen auf Grund von Informationen aus der Umwelt (Krümmung der Bahnkurve, Neigung, Sichtweite, Reibwert der Straße, Eigenschaften des Fahrzeugs, Befindlichkeit des Fahrers, Verkehrsbehinderungen). Zur Erfassung der Daten wird eine Wegdiskretisierung vorgenommen, wobei das Wegintervall ds veränderlich ist und je nach Ereignishäufigkeit zwischen wenigen Zentimetern bis hin zu einigen Metern liegen kann. Aus der Wegkoordinate wird eine Zeitkoordinate berechnet. Es werden folgende Daten (Bild 1 und 2) erfasst:

- Umweltdaten (Steigung, Krümmung, Reibwert, Sichtweite, etc.)
- Verkehr (Dichte, freie Überholstrecke, Behinderung durch Fahrzeug, etc. )
- Fahrzeug (Geschw., Beschleunigungen, Drehraten, Position, Drehzahl, Gang, etc.)



Die existierenden Verkehrsbeschränkungen (Geschwindigkeitslimit) und das Zusammenwirken mit anderen Verkehrsteilnehmern ist ebenfalls bedeutsam für das Fahrerverhalten und die sich ergebenden Fahrzyklen. Um den Verkehrseinfluss und Verkehrsregeln messtechnisch möglichst einfach zu erfassen, wird eine Nachbearbeitung der Videoaufzeichnung durchgeführt. Die Elemente des Systems sind folgende:

- Messdatenerfassungssystem winADAM zur einfachen aber ausreichend genauen Erfassung der Einsatzverhältnisse (Geschwindigkeit, Topografie, Kurs, Krümmung, Videoaufzeichnung) [3,4,8,11,14,15].
- Simulationssystem winEVA für Fahrzeug, Antriebsstrang und Fahrer, das auf der Basis der gemessenen Daten eine Vorhersage der Fahrzeugdynamik, Kraftstoffverbrauch und Lebensdauer [2,5,12,13,14,15] ermöglicht.
- Simulationssystem winEVA in Kombination mit einem Antriebsstrang-Prüfstand [16].
- Lebensdaueranalyse-System winLIFE, das eine Lebensdauerabschätzung auf der Basis der Simulationsergebnisse von winEVA ermöglicht [7-11, 13].
- Ein mikroskopisches Simulationsmodell für den Verkehr auf Autobahnen [1,4].

### 3. Erfassung der Einsatzdaten des Fahrzeugs (Kurs, Topographie, Verkehr)

#### 3.1 Aufbau des Messsystems winADAM

winADAM ist eine kompakte Messbox, die alle zur Messung erforderlichen Sensoren enthält. Es werden Redundanzen genutzt, um die Position  $x,y$ , die gefahrene Wegstrecke  $s$ , Fahrgeschwindigkeit  $v$ , Höhe  $h$ , Längsneigung  $\alpha$  (wegen der Messfehler möglichst nach verschiedenen Methoden) zu erfassen, um daraus ein möglichst genaues Signal zu ermitteln. Eine parallel zur GPS-Messung laufende Koppelnavigation erlaubt auch bei Ausfall

des GPS-Signals die Positionsbestimmung mit ausreichender Genauigkeit. Zur Visualisierung können die Daten in Google-Earth dargestellt werden. Die Messbox enthält alle notwendigen Sensoren und muss lediglich in horizontaler Lage im Fahrzeug fixiert und die GPS-Antenne auf dem Dach positioniert werden. Darüber hinaus besitzt das System einen CAN-Anschluss für bis zu 100 Kanäle und 10 weitere Eingänge für analoge Messgrößen.

Die Messgrößen - außer GPS - werden mit max. 200 Hz Abtastrate gemessen. Das Video-Signal wird mit 10 bis 20 Bildern pro Sekunde erfasst, so dass eine Auswertung der Verkehrssituation und Verkehrsschilder ausreichend genau möglich ist. Bei Messungen über mehrere Tage kann die Bildfrequenz wegen der Datenmenge auf 1 Bild/Sekunde oder weniger reduziert werden. Die Daten werden so aufgezeichnet, dass ohne Datenkonvertierung unmittelbar nach einer Messung im Fahrzeug eine Streckensimulation oder Prüfstandssteuerung erfolgen kann. Die Durchführung von Fahrzeugmessungen ist sehr einfach, da das Gerät nach dem Einschalten automatisch mit der Messung beginnt und die erfolgreiche Datenaquisition permanent akustisch quittiert.

### **3.2 Nachbearbeitung der Messdaten durch Auswertung der Videoinformation**

Fahrzyklen hängen entscheidend vom Fahrerverhalten und vom Verkehrseinfluss ab. Um diese Einflussgrößen zu objektivieren und in die Simulationen mit einzubeziehen, werden die Videoinformationen nach einer Messfahrt ausgewertet (s. Bild 3) und in folgende Zahlenwerte bzw. Zustandsvariablen umgesetzt:

- gesetzlich zulässige Geschwindigkeit
- Behinderung durch andere Verkehrsteilnehmer (Fahrzeug voraus ja/nein)
- Überholpotential (Zeit- und Weglücken des Gegenverkehrs )
- aktive und passive Überholvorgänge
- Fahrbahnzustand (trocken, nass, etc)
- Sichtbedingungen (freie Sicht, Regen, Nebel)
- Klassifizierung der Fahrmanöver
- Verkehrsdichte (Gegenverkehr)
- Zusammensetzung (Relation Lkw/Pkw)

Diese Informationen über den Verkehr helfen, die individuelle Fahrsituation einzuschätzen.

Bei freier Fahrt – kein Fahrzeug fährt voraus – erlaubt die Relation der gefahrenen Ist-Geschwindigkeit zur zulässigen Geschwindigkeit eine Beurteilung der Fahrermotivation.

Die Anzahl der Überholvorgänge (aktiv/passiv) und die zugehörige Zeitlücke im Gegenverkehr ermöglicht ebenfalls Rückschlüsse auf die Fahrermotivation.

Diese nachträgliche Auswertung des Videobildes ist zwar zeitaufwendig, liefert jedoch nützliche zusätzliche Informationen. Das Ergebnis der Datenerfassung und nachträglichen Videoauswertung einer Messfahrt zeigt Bild 3. Dort sind neben dem Kurs, Höhenprofil, Fahrgeschwindigkeit auch die Zusatzinformationen dargestellt. Man kann die Informationen selektieren, ein- und ausblenden und damit die Übersichtlichkeit verbessern.



Bild 3: Fahrzyklus, der mit winADAM erfasst und dessen Ereignisse nachträglich durch Videoauswertung dokumentiert wurden

### 3.3 Szenariengenerator

Damit es möglich wird, ähnliche Fahrsituationen zu finden, zu vergleichen und deren Häufigkeit und Ausprägung zu erfassen, werden alle Fahrmanöver mit Hilfe des Szenariengenerators klassiert. Weiterhin kann man Teilstücke aus Messstrecken ausschneiden, modifizieren und zu einem neuen Zyklus zusammensetzen. Dabei werden insbesondere die meist nicht physikalisch sinnvollen Übergänge zwischen den Teilstücken automatisiert korrigiert.

## 4. Das Simulationssystem für Fahrer, Fahrzeug und Umwelt

### 4.1 Computersimulationsmodell

Der Antriebsstrang des virtuellen Fahrzeugs wird, vergleichbar zum realen Antriebsstrang, komponentenweise abgebildet. Der Antriebsstrang beginnt beim Motor und wird über die Antriebsstrangelemente bis zu den Rädern vervollständigt (Bild 4).

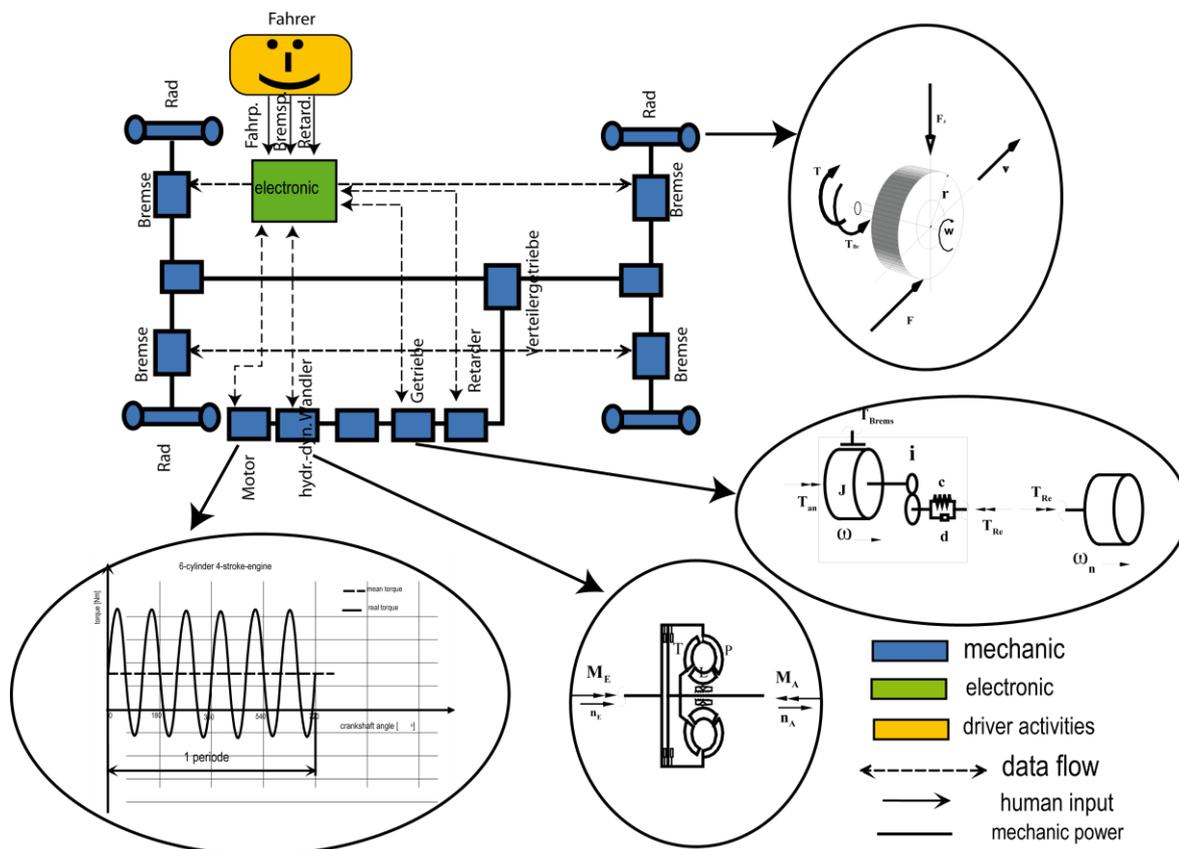


Bild 4: schematische Darstellung des Modells des Antriebsstrangs

Der modulare Aufbau des C++- Programms ermöglicht auch die Vorgabe beliebiger Topologien des Antriebsstrangs und es sind bereits nahezu alle denkbaren Antriebsarten einschließlich der Hybridvarianten mit den verschiedensten Energiespeichersystemen simuliert worden. Das Fahrzeugmodell ist skalierbar, das bedeutet, dass es unterschiedliche Modelltiefen berücksichtigen kann. So ist eine Simulation mit Drehschwingungen unter Einbeziehung der kompletten dynamischen Vorgänge im Getriebe einschließlich der Schaltvorgänge nach Klos [12] integriert. Wenn diese hochdynamischen Vorgänge – z.B. bei Kraftstoffverbrauchsanalysen - nicht interessieren, kann mit vereinfachten Modellen und entsprechend hoher Zeitraffung (Echtzeit / Rechenzeit > 1000 ) gearbeitet werden. Es bleibt dem Anwender überlassen, mit welcher Modellfeinheit er arbeiten möchte.

## 4.2 Prüfstandssimulationen

Bei der Prüfstandssimulation des Antriebsstrangs wird ebenfalls das Simulationssystem winEVA verwendet, allerdings wird in Echtzeit mit fester Zeitschrittweite simuliert. Voraussetzung für eine Prüfstandssimulation ist, dass der am Prüfstand gefahrene Antriebsstrang als winEVA-Simulationsmodell vorliegt. Grundgedanke der Simulationsstrategie für die Prüfstandssteuerung ist, dass durch Computersimulation (winEVA) das Verhalten des Antriebsstrangs auf dem Prüfstand simuliert und der Prüfstand gesteuert wird. Dabei werden zwei Strategien alternativ angewendet:

- Drehzahlvorgabe (DV): die Drehzahl am Rad wird vorgegeben
- Widerstandsvorgabe (WV): Die Umfangskraft am Rad wird vorgegeben

Das Simulationssystem winEVA errechnet aus den vorliegenden Daten der Umwelt (Topografie, Krümmung) und des Fahrzustands (Geschwindigkeit) die Größen zur Steuerung der Elektromotoren des Prüfstands, aus den Daten des Fahrzyklus werden die Vorgaben des Fahrers (Gaspedalstellung, Bremspedal, Retarder (wenn vorhanden)) berechnet und diese werden an den Prüfstand in Echtzeit übergeben [16], der Prüfstand liefert Gang, Fahrgeschwindigkeit, Drehmoment am Getriebeausgang zurück. Aus den vom Prüfstand zurück gelieferten Daten werden die Modelldaten korrigiert und das Modell permanent angepasst (Bild 5). Es gelingt auf diese Weise, auf der Basis von Messungen reale Fahrzyklen auf dem Prüfstand mit guter Genauigkeit zu simulieren, was durch den Vergleich der Zeitreihen von Drehzahlen und Drehmomenten gezeigt wurde [16].

Da die Prüfstandsversuche mit dem Ziel einer Lebensdaueranalyse durchgeführt werden, sind besonders hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Momentenvorgabe zu stellen. Auf Grund der logarithmischen Zusammenhänge von Wöhlerkurven wirken sich bereits kleine Abweichungen der Momente gravierend aus. Um die Qualität der Umsetzung der Momentenvorgabe zu beurteilen wurden Lebensdauerberechnungen auf der Basis der Momentenvorgabe für den Prüfstand und den tatsächlich am Prüfstand realisierten Momentenverläufen gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigt Bild 8. Dort ist das Amplitudenkollektiv für die Momentenvorgabe und für die beiden Arten der Prüfstandssimulation dargestellt. Trotz der Ähnlichkeit der Amplitudenkollektive ergeben sich dennoch Unterschiede der berechneten Schadenssummen  $D$ , was jedoch als akzeptabel angesehen wird [16].

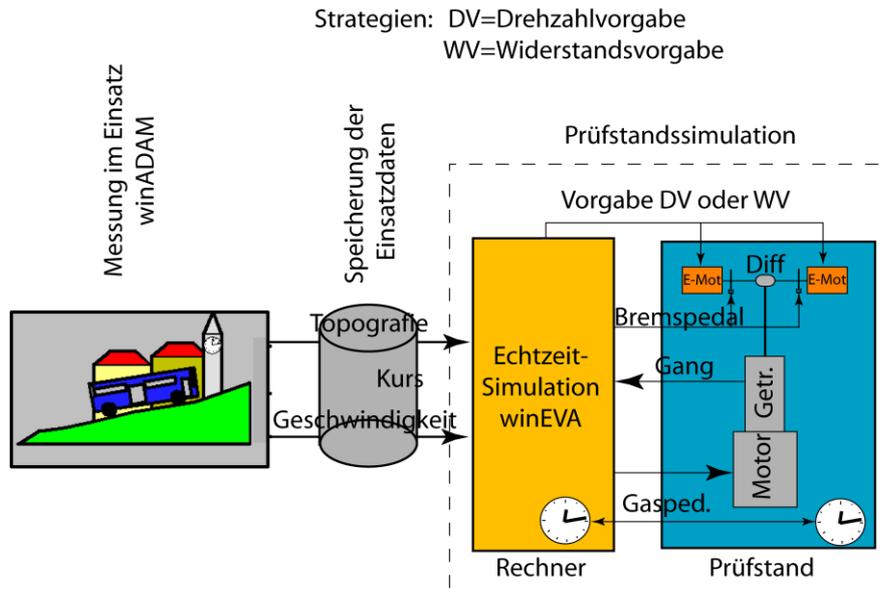


Bild 5 : Prinzip der Prüfstandssteuerung

### 4.3 Simulationsstrategien

Entsprechend der Aufgabenstellung können die in Tabelle 1 dargestellten Strategien der Simulationsarten sinnvoll sein [4]. Als Kriterien für die Eignung wird die Übereinstimmung der Zeitverläufe oder der statistischen Kennwerte der dynamischen Größen des Triebstrangs verwendet, was in Kap. 5 gezeigt wird.

Tabelle 1: Übersicht der in winEVA verfügbaren Simulationsstrategien

Strategie	Einzelheiten zum Ablauf	Anmerkungen zur Simulationsstrategie	Übereinstimmung d. Zeitreihen	Übereinstimmung statistischer Größen	Eignung f. Prüfstands Steuerung
Pilotfahrt (Einzelfahrz.)	Exaktes Nachfahren eines gemessenen Geschwindigkeits-Verlaufs	Nur möglich, wenn simuliertes und gemessenes Fahrzeug übereinstimmen.	Sehr gute Übereinst. möglich	Sehr gute Übereinst. erreichbar	Möglich aber aufwändig
Wunschfahrt (Einzelfahrz.) (In Bild 6 Wunschfahrt 1)	Nachfahren eines Wunschgeschwindigkeits-Verlaufs aus Messungen	Wunschgeschwindigkeitsverläufe innerhalb einer Fahrzeugkategorie einsetzbar. Flexibel zur Generierung von Szenarien nutzbar.	gute Übereinst	Gute Übereinst.	Einfach möglich
Fahrt im Verkehr (Verkehr + Einzelfz) (In Bild 6 Wunschfahrt 2)	interessierendes Fahrzeug ist in ein Verkehrsmodell integriert	Einfach realisierbar für Standardszenarien; Individuell zu erstellende Verkehrsszenarien sind aufwändig	Keine Übereinstimmung möglich	Brauchbare Übereinstimmung erreichbar	möglich

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Auswirkung der Simulationsstrategien auf die Vorhersagequalität

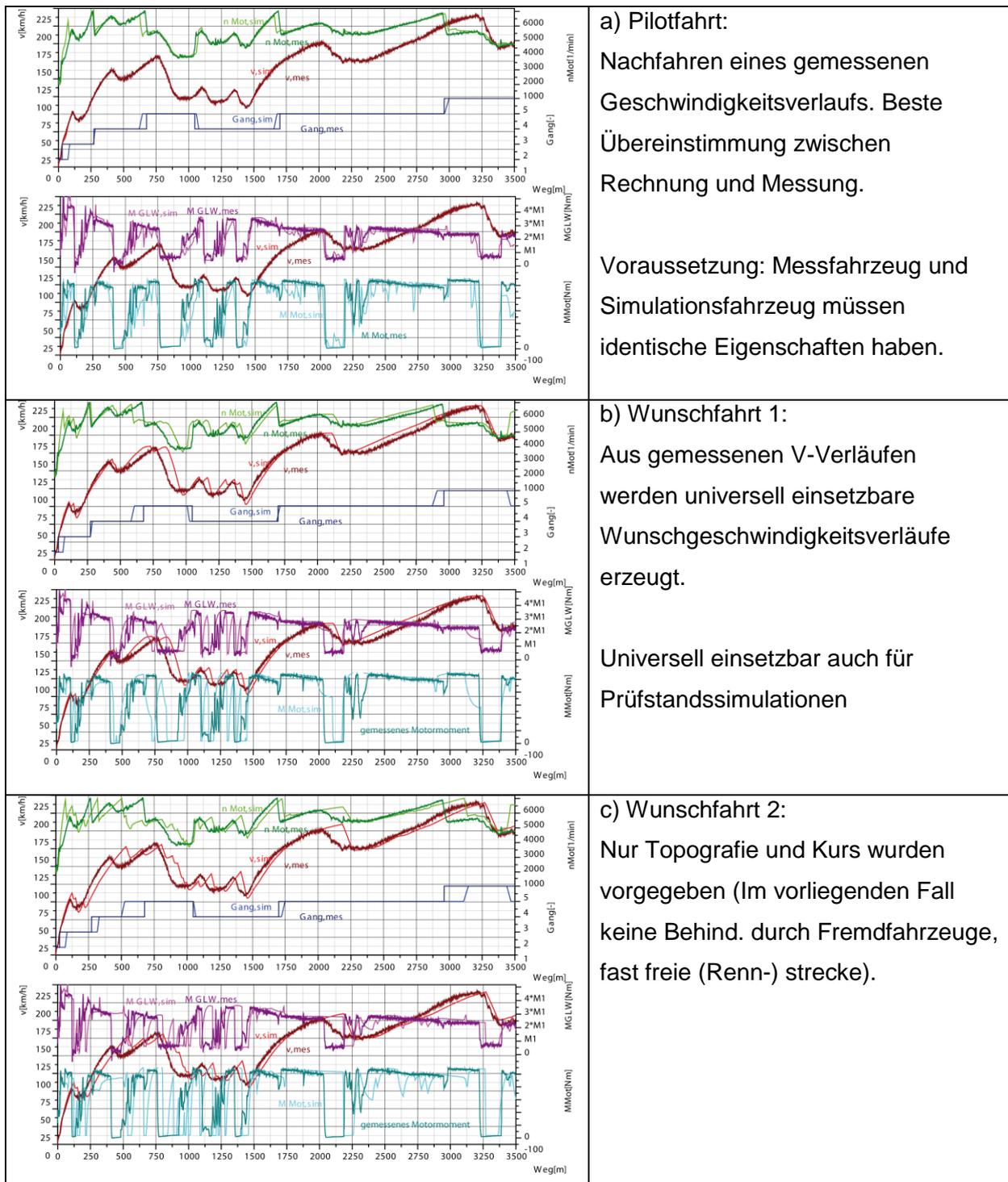


Bild 6: Geschwindig., Motordrehz., Momente v. Motor u. Gelenkwelle u. Gang f. verschied. Simulationsarten jeweils aus Messung und Simulation f. den Nürburgring [14,15].

Am Beispiel von Fahrten auf dem Nürburgring wurden Mess- und Simulationsergebnisse hinsichtlich der Signalverläufe und Kollektive wichtiger Größen des Antriebsstrangs, die maßgeblich für die Lebensdauer sind, verglichen. Das mit einem Automatikgetriebe ausgerüstete Fahrzeug wurde mit der Wahlhebelstellung S am Getriebe gefahren. Die Fahrversuche und die Simulation erfolgten für den Automatikbetrieb, d.h. es wurde nicht manuell der Wahlschalter des Getriebes betätigt.

Mit der Simulationsstrategie „Pilotfahrt“ wurde einerseits der im Fahrversuch gemessene Geschwindigkeitsverlauf als Zielvorgabe genommen und nachsimuliert. Bei dieser Simulationsart werden die besten Übereinstimmungen erreicht [14] (s. Bild 6a). Diese gute Übereinstimmung lässt sich allerdings nur dann erreichen, wenn die Daten des Fahrzeugmodells sehr gut das wirkliche Fahrzeug beschreiben.

Bei der Simulationsart „Wunschfahrt\_1“ wird aus dem gemessenen Geschwindigkeitsverlauf ein Wunschgeschwindigkeitsverlauf generiert und ein Fahrermodell gewählt, das dem realen Fahrerverhalten entsprechen sollte (für ein Rennszenario ist dies einfacher als für Fahrten im realen Verkehr), ergibt sich eine immer noch gute Übereinstimmung der Signalverläufe (Bild 6b). Weiterhin ermöglicht dieses Vorgehen die Verwendung unterschiedlicher Fahrer Motivationen, so dass der wichtige Fahrereinfluss auf sehr einfache Weise durch Variation des Fahrerverhaltens untersucht werden kann. Da auch die Anforderungen an die Modellqualität der Fahrzeugdaten geringer sind als bei der Pilotfahrt, wird diese Simulationsstrategie bevorzugt eingesetzt.

Bei der Simulationsstrategie „Wunschfahrt\_2“ (Bild 6c) wurde lediglich der Kurs aber kein Geschwindigkeitsverlauf zu Grunde gelegt und es wurde bei dem Fahrermodell auch die Querdynamik berücksichtigt. Da keine Verkehrsbehinderungen auf der Rennstrecke existierten, lagen günstigste Voraussetzungen vor, und es ergab sich eine brauchbare Übereinstimmung zwischen den Signalverläufen und den statistischen Kenngrößen. Bei Verkehrseinflüssen ist eine Übereinstimmung der Signalverläufe wegen der Zufälligkeit der Verkehrsbehinderungen nicht mehr möglich, eine Übereinstimmung der statistischen Kenngrößen wird aber erreicht.

Für Fragestellungen im Hinblick auf Kraftstoffverbrauch und Lebensdauer ist weniger die Übereinstimmung der Signalverläufe entscheidend sondern vielmehr die statistische Verteilung und das Lastkollektiv. Beispielhaft sind in Bild 7 die Lastkollektive des Getriebeausgangsmomentes und der Drehzahl dargestellt. Es zeigt sich, dass alle Simulationsstrategien zu brauchbaren Übereinstimmungen mit der Messung führen.

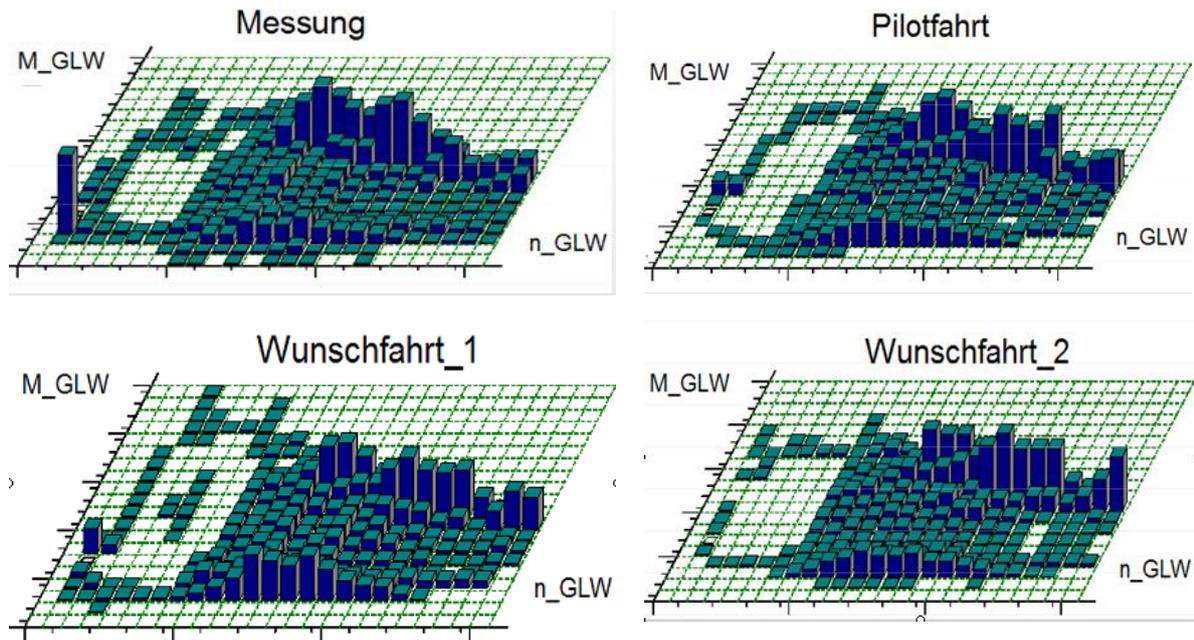


Bild 7: Verweildauer des Gelenkwellenmomentes und der Gelenkwelldrehzahl für verschiedene Simulationsstrategien

## 5.2 Prüfstandssimulation und Lebensdauer

Umfangreiche Versuche auf verschiedenen Prüfstandstypen haben gezeigt, dass gute Übereinstimmungen der Zeitreihen und der statistischen Verteilungen erreicht werden können. Allerdings werden die Prüfstandsversuche häufig zwecks Lebensdauernachweis durchgeführt, wo bereits kleine Abweichungen der Beanspruchungen große Auswirkungen auf die Lebensdauer haben können. Um diese Einflüsse abzuschätzen, wurden Lebensdauerberechnungen mit den Messdaten aus dem Fahrversuch und den am Prüfstand simulierten Daten durchgeführt. Die für die Lebensdauer relevanten Daten – z.B. Drehzahlen und Momente am Zahnrad – wurden dabei durch Prüfstandssimulation und Rechnersimulation parallel ermittelt und für eine Lebensdauerberechnung gegen dieselbe Wöhlerlinie verwendet. Die Ergebnisse in Bild 8 zeigen das Amplitudenkollektiv des Drehmomentes zusammen mit einer fiktiven, vereinfachten Wöhlerlinie der Zahnflanke. Obwohl die Unterschiede des Amplitudenkollektivs gering erscheinen, können sich auf Grund der logarithmischen Zusammenhänge doch deutliche Unterschiede in der berechneten Lebensdauer ergeben. Die Verhältnisse bei Wellen und Zahnfußermüdung liegen in einer ähnlichen Größenordnung.

## 6. Ermittlung des kritischen Bauteilkollektivs

Oft besteht der Wunsch, die kritischen Bauteile zu finden und ihre typische Beanspruchung in einem Antriebsstrang anzugeben [9-11]. Die Vorgehensweise zur Bestimmung des kritischen Bauteilkollektivs [11] wird am Beispiel für die Antriebe von Stadtbussen gezeigt (Bild 9). Es werden zunächst die Ziele des Antriebsstrangs bezüglich Laufzeit und Laufstrecke für die Einsatzorte der Busse festgelegt und die Simulationsszenarien (Strecke, Geschwindigkeitsprofil, Fahrer, Beladung, etc, ) z.B. durch Messung mit winADAM bestimmt.

Dann erfolgt die entsprechende Simulation, die alle lebensdauerrelevanten Einflussgrößen als Funktion der Zeit und des Weges berechnet und speichert. Auf der Basis dieser Zeitreihen erfolgt eine Lebensdauerberechnung aller interessierenden Komponenten und Angabe der Schädigung jedes Bauteils in Prozent der geforderten Lebensdauer. Das Simulationsszenario (=Einsatzort bei Stadtbussen), das zu der größten Schädigung am Bauteil führt, ist relevant für die Dimensionierung dieses Bauteils und wird als kritisches Bauteilkollektiv bezeichnet. Dieses kann dann z.B. bei der laufenden Qualitätsprüfung angewendet bzw. bei der Neuentwicklung zu Grunde gelegt werden. Auch können beabsichtigte Änderungen (Einsatz, Konstruktion, Material) einfach in ihren Auswirkungen auf die Lebensdauer abgeschätzt werden. Der gesamte Berechnungsablauf wird als Batch-Prozedur gespeichert und kann mit wenig Aufwand durchgeführt werden.

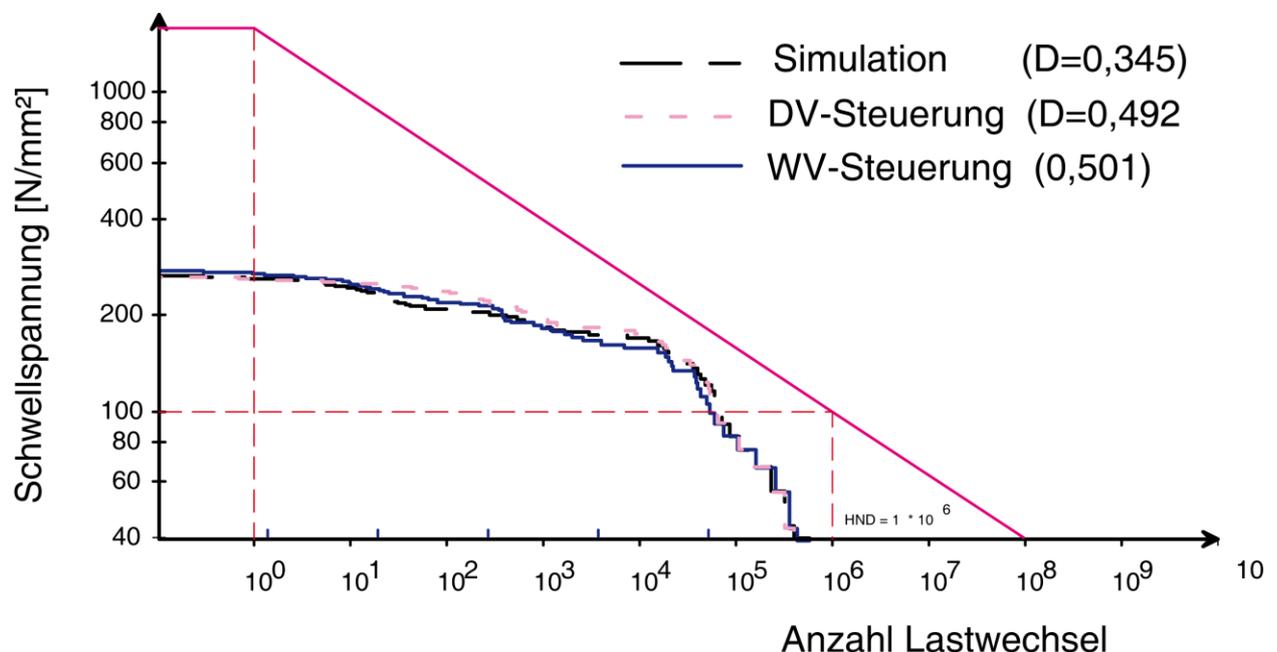
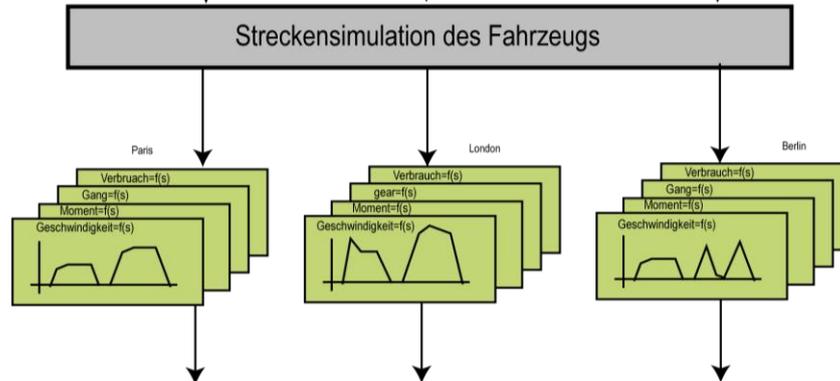


Bild 8: simuliertes und auf dem Prüfstand mit verschied. Regelungen erzeugte Amplitudenkollektive der Zahradspannung und daraus errechnete Schadenssumme D.

Zielvorgabe

Ziel-Lebensdauer des Antriebs				
Strecke	Einsatz	Bus Type	Ziel Lebensdauer	
			10 <sup>3</sup> km	[10 <sup>3</sup> h]
Berlin	City Verkehr	Solo	1000	40
London	BHF-Airport nur Zubringer Verk.	Gelenkbus	1200	50
Paris	Überland	Solo	1000	40

Ergebnisse  
Signalverlauf  
Antrieb



Ergebnis  
Lebensdauer

Ziel-Lebensdauer					Schadenssumme der Bauteile in Prozent bez. auf Ziellebensdauer								
place	Einsatzart	Bus Type	Ziel Lebensdauer		Zahnrad 1				Welle 1			Lager 9	
			l, [10 <sup>3</sup> km]	l, [10 <sup>3</sup> h]	D, [%]	D, [%]	D, [%]	D, [%]	D, [%]	D, [%]	D, [%]	D, [%]	
Berlin	City Verkehr	Solo	1000	40	12	18	23	17	43	41			
London	BHF-Airport Zubringer Verkehr	Gelenkbus	1200	50	34	25	45	35	9	6			
Paris	Überland	Solo	1000	40	115	124	41	44	32	39			

kritisches  
Bauteilkollektiv

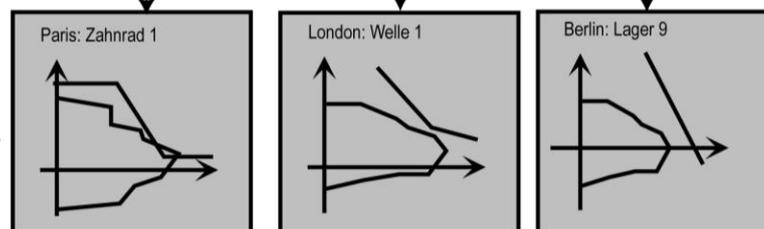


Bild 9: Ablauf zur Ermittlung des kritischen Bauteilkollektivs für Komponenten des Antriebsstrangs

## 7. Zusammenfassung

Das beschriebene Simulationssystem ermöglicht die Erfassung von Daten im Verkehr zur Charakterisierung der Einsatzbedingungen von Antrieben und erlaubt basierend darauf auch Rechner- und Prüfstandssimulationen zur Ermittlung der Antriebsdynamik. Diese Ergebnisse können direkt zur Lebensdauerberechnung weiterverarbeitet werden. Es hat sich gezeigt, dass es gelingt, die realen

Einsatzbedingungen genügend genau zu simulieren, um darauf basierend Vorhersagen bezüglich Kraftstoffverbrauch, Fahrleistung und Lebensdauer zu machen. Insbesondere ist es auch möglich, die kritischen Bauteile und das entsprechende kritische Bauteilkollektiv zu bestimmen und damit Grundlagen für die Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanalyse zu schaffen.

## Literaturhinweise

- [1] Willmerding, G.: Ein Simulationsmodell für den Autobahnverkehr, Teil 1. ATZ Heft 5 1992
- [2] Willmerding, G.: Ein Simulationsmodell für den Antriebsstrang, Teil 2. ATZ Heft 6 1992
- [3] 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
- [4] Willmerding, G.: Ein Simulationsmodell für Kraftfahrzeuge im Verkehrsfluss, publication on ASIM-congress TU-Berlin 1993, Fortschritte in der Simulationstechnik, 8. Symposium 1993, Band 6, ISBN 3-528-06555-9
- [5] Willmerding, G.; Trübwasser, F.; Häckh, J.: A simulation system to predict fuel consumption and emissions considering the traffic flow. 5. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 1995. Tagungsband.
- [6] Lamke, M.: Optimierung eines stufenlosen hydrostatisch-mechanischen Leistungsverzweigungsgetriebes für Stadtbusse, Dissertation Universität Stuttgart. Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau, 1998 Bericht Nr. 442
- [7] Willmerding, G.; Dietzel, B.; Körner, T.: Rechnergestützte Entwicklung von Schaltprogrammen für Automatikgetriebe, 3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren 1999, Universität Stuttgart, Seite 843 - 856, ISBN-Nr. 3-8169-1751-8
- [8] Willmerding, G; Häckh, J; Berthold, A: Driving Cycle, Load and Fatigue Life Predictions based on measured Route Data , Vortrag auf der ATT-Tagung in Barcelona 2001, SAE-Paper 01ATT120, [www.stz-verkehr.de/PDFs/paper\\_att\\_barcelona.pdf](http://www.stz-verkehr.de/PDFs/paper_att_barcelona.pdf)

- [9] Häckh, J.; Willmerding, G.; Kley, M.; Binz, H.; Körner, T.: Rechnerische Lebensdauerabschätzung von Getriebegehäusen unter Einbeziehung realer multiaxialer Belastungen, DVM-Tagung Fulda vom 5. bis 6.6.2002, VDI-Berichte N2. 1689, 2002 Seite 303 – 317, [www.stz-verkehr.de/PDFs/dvm\\_fulda\\_gehaeuse.pdf](http://www.stz-verkehr.de/PDFs/dvm_fulda_gehaeuse.pdf)
- [10] Körner, T.; Depping, H.; Häckh, J.; Willmerding, G.; Klos, W.: Rechnerische Lebensdauerabschätzung unter Berücksichtigung realer Belastungskollektive für die Hauptwelle eines Nutzfahrzeuggetriebes, DVM-Tagung Fulda 2002, VDI-Berichte N2. 1689, 2002 Seite 275 – 285, [www.stz-verkehr.de/PDFs/dvm\\_fulda\\_Keilwelle.pdf](http://www.stz-verkehr.de/PDFs/dvm_fulda_Keilwelle.pdf)
- [11] Körner, T.; Depping, H.; Häckh, J.; Willmerding, G.: Fatigue Life Prognosis for Transmissions based on critical Component Spectrum, World Automotive Congress FISITA 2002, Paper Nr. F02V091, [www.stz-verkehr.de/PDFs/paper\\_fisita\\_helsinki.pdf](http://www.stz-verkehr.de/PDFs/paper_fisita_helsinki.pdf)
- [12] Klos, W.: Gruppenschaltungsansteuerung von Nutzfahrzeuggetrieben, Dissertation 2004, Universität Stuttgart, Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau Bericht Nr. 508, ISBN 3-922 823-60-2
- [13] Kley, M.: Einflüsse auf die Lebensdauer von Bus-Automatikgetriebegehäusen, Dissertation 2004, Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau der Universität Stuttgart, Bericht Nr. 509, ISBN 3-922823-59-9
- [14] J. Greiner, C. Dörr, W. Klos, T. Schwämmle: Lastkollektive 7-Gang Automatikgetriebe W7A700, durchgängige Bewertung und Betrachtung im Entwicklungsprozess bei Mercedes-Benz, GetriebeTagung Friedrichshafen 2004, VDI-Berichte
- [15] Willmerding, G; Häckh, J.: Untersuchung der Einsatzverhältnisse von Getrieben unter realistischen Bedingungen durch Kombination von Messdatenerfassung und Computersimulation, GetriebeTagung Friedrichshafen 2006, VDI-Berichte, [www.stz-verkehr.de/PDFs/steinbeis\\_haeckh\\_willmerding\\_GeriebeTagung\\_Friedrichshafen\\_06\\_04\\_2006.pdf](http://www.stz-verkehr.de/PDFs/steinbeis_haeckh_willmerding_GeriebeTagung_Friedrichshafen_06_04_2006.pdf)
- [16] Häckh, J.: Untersuchung und Optimierung der Steuerung von Prüfständen zur Streckensimulation von Pkw Antriebssträngen unter realistischen Einsatzbedingungen, Masterarbeit an der Hochschule Ulm, Fakultät f. Informatik / Daimler AG, 2007.