



Prof. Dr.-Ing. Günter Willmerding, Ulm
Dipl.-Math. Eva Jehlicka, Ulm

Verbrauchsuntersuchungen an Stadtbussen

Ein Simulationsmodell für reale Einsatzbedingungen

Die Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit von Stadtbussen ist ein wichtiges Entwicklungsziel, wobei die günstige Auslegung des Triebstrangs dazu einen wesentlichen Beitrag leistet. Es ist daher verständlich, daß zur Optimierung des Triebstrangs im Hinblick auf günstigen Kraftstoffverbrauch ein beträchtlicher Aufwand sowohl seitens der Fahrzeug- und Komponentenhersteller als auch seitens der Verkehrsbetriebe geleistet wird.

Die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen mit Schaltgetriebe bei stationärer Fahrt kann mit relativ einfachen Beziehungen angegeben werden [1, 2]. Dabei können die Einflüsse einzelner Fahrzeugparameter bei stationärer Fahrt identifiziert werden [2]. Derartige Berechnungen sind auch ohne Einsatz von EDV-Anlagen möglich. Auch die Behandlung instationärer Vorgänge, wie sie z. B. bei Trapez-Zyklen auftreten, wird durch Auswertung des Kräftegleichgewichts in Fahrtrichtung für Fahrzeuge mit Schaltgetriebe untersucht, wobei die wesentlichen Einflußgrößen auf den Kraftstoffverbrauch auch quantitativ dargestellt werden können [9]. Dabei werden die Fahrzeugkomponenten bereits detailliert beschrieben, indem u. a. das Verbrauchskennfeld und der Getriebewirkungsgrad an Hand stationärer Messungen ermittelt werden.

Eine ebenfalls deterministische Fahrsimulation, bei der in der Realität gemessene Höhenprofile zugrunde gelegt werden, wird in [10] durchgeführt. Dabei gelingt es, verschiedene Antriebsstrang-Konzepte von Lkw mit Schaltgetriebe zu vergleichen und zu beurteilen und damit den erforderlichen Versuchsaufwand für die Entwicklung zu verringern.

Die Berechnung des Verbrauchsverhaltens bei Stadtbussen mit Automatik-Getriebe erfolgt in [7] ebenfalls durch Lösung der Gleichgewichtsbeziehungen, und es gelingt, Trapez-Zyklen zu berechnen. Es kann dadurch der Einfluß wichtiger Parameter des Antriebsstrangs auf den Kraft-

stoffverbrauch untersucht werden. Ein sehr umfassendes, mathematisches Modell für Pkw mit Otto-Motor und Automatik-Getriebe mit Tri-Lok-Wandler wird in [11] beschrieben, das unter Verwendung realer Meßdaten für die Aggregate die Auslegung des Triebstrangs wesentlich erleichtert.

An Hand statistischer Methoden wird in [3] ein Computer-Simulationsmodell für vergleichende Verbrauchsberechnungen für Stadtbusse mit Automatik-Getriebe eingesetzt, und es werden wesentliche Einflußgrößen wie Beladung, Haltestellenabstand, Hinterachsübersetzung etc. untersucht.

Ebenfalls auf statistischer Basis werden in [5, 6] Kenngrößen des Triebstrangs untersucht und damit Erkenntnisse für die Auslegung eines Triebstrangs im Hinblick auf Lebensdauer und Kraftstoffverbrauch abgeleitet.

Die statistische Vorgehensweise bei Lebensdauer- und Verbrauchsuntersuchungen hat sicherlich den Vorzug, daß Zufälligkeiten durch Fahrer und Umwelt bei ausreichend großer Datenmenge ohne Auswirkung sind. Um allerdings allein mit Hilfe statistischer Methoden hilfreiche Aussagen zu ermöglichen, ist eine große Zahl von Meßstellen über eine große Fahrstrecke zu erfassen. Deterministische Modelle, bei denen die Differentialgleichungen des Fahrzeugs im Zeitbereich gelöst werden, erfordern dagegen eine sehr genaue und umfangreiche Beschreibung der Fahrzeugkomponenten.

Das im folgenden verwendete Simulationsmodell für Fahrzeuge mit Automatik-Getriebe verwendet für die Behandlung des Kräfte- und Momentengleichgewichts hinter der Turbine des Wandlers im Prinzip bekannte Lösungswege [1, 9, 10]. Das Momentengleichgewicht des hydrodynamischen Teils erfordert jedoch insbesondere für die instationären Betriebszustände einen erheblichen zusätzlichen Aufwand zur

DIE AUTOREN



Prof. Dr.-Ing. Günter Willmerding (38) ist an der Fachhochschule Ulm im Fachbereich Leichtbau für das Gebiet „Nutzfahrzeuge“ zuständig. Als freier Mitarbeiter der Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung betreibt er ein Ingenieurbüro für Auftragsforschung, das Forschungsvorhaben durchführt.

Der Autor studierte Maschinenbau an der TH Hannover, wo er 1974 auch am Institut für Kraftfahrwesen promovierte. Einer dreijährigen Tätigkeit am Battelle-Institut folgten Aufgaben in der Industrie mit dem Schwerpunkt neue Technologien in der Fahrzeug- und Wehrtechnik. Seit der Berufung an die Fachhochschule Ulm im Jahre 1983 befaßt sich Prof. Willmerding intensiv mit neuen Technologien im Nutzfahrzeugbau. Aus dieser Arbeit gingen zahlreiche Patente hervor.



Dipl. math. Eva Jehlicka (31) ist wissenschaftliche Mitarbeiterin bei Prof. Willmerding und zuständig für Software-Entwicklungen. Sie studierte Mathematik an der Universität Prag mit dem Schwerpunkt Numerische Mathematik. Nach dem Studium war sie mehrere Jahre in der Industrie für Software-Entwicklungen tätig.



Beschreibung. Bedingt durch das Automatik-Getriebe ergibt sich jedoch auch eine Reduktion der für eine realistische Simulation zu erfassenden Meßgrößen, da die Schaltpunkte eindeutig feststehen, wenn der Verlauf der Fahrgeschwindigkeit bekannt ist. Weiterhin ist das Modell so konzipiert, daß beliebige, physikalisch sinnvolle Zyklen gefahren werden können.

Das Programm ähnelt in seinem Aufbau dem in [11] beschriebenen, wobei für den Motor auch das instationäre Verhalten aus den stationären Kennfeldern errechnet wird und neben dem Tri-Lok-Wandler auch andere Konzepte für Automat-Getriebe berücksichtigt werden können. Die Anwendung des hier beschriebenen Modells wurde zunächst auf Stadtbusse beschränkt, da

- Stadtbusse in der Regel mit Automatik-Getriebe ausgerüstet sind,
- die Datenermittlung auf Grund des Interesses der Verkehrsbetriebe an Kraftstoffeinsparungen intensiv unterstützt wurde.

Das Simulationsmodell

Das Simulationsmodell besteht neben einer Vielzahl von Programmen zur Datenerfassung und Datenaufbereitung aus numerischen Lösungsverfahren für Differentialgleichungen, die das Gleichgewicht der Kräfte in Fahrtrichtung beschreiben und daraus die im Triebstrang für die Wirtschaftlichkeit, mechanische Beanspruchung und Fahrleistung maßgeblichen Größen ermitteln.

Ziel war eine auch quantitativ brauchbare Beschreibung der Wirklichkeit. Neben den bekannten Beziehungen für die Fahrwiderstände mußten das reale Verbrauchskennfeld des Motors, die Charakteristiken des hydrodynamischen Teils des Automatik-Getriebes, die Last- und Drehzahlabhängigkeit der Wirkungsgrade in Planetensatz, Differential und Übertragungselementen zum Rad, die Abhängigkeit der Schaltpunkte von der Stellung des Lastgebers und der Turbinendrehzahl, die Reg-

lercharakteristik zur Einhaltung der Leerlaufdrehzahl und das Bremsmoment des Motors berücksichtigt werden. Dabei sind nicht nur stationäre oder quasistationäre Zustände zu berücksichtigen, sondern auch stark instationäre, wie sie z. B. das Hochlaufverhalten des Motors bei Wandlerbetrieb und damit die unterschiedlichen Drehzahlen von Pumpe und Turbine und die zugehörigen rotatorischen Massen darstellen.

Wahlweise kann ein Modellgesetz verwendet werden, das die Abweichung des instationären Verbrauchskennfeldes vom stationären berücksichtigt. Um die Modellparameter zu bestimmen, sind allerdings zusätzliche Versuche erforderlich, was nur bei aufgeladenen Motoren mit stark instationärer Betriebsweise nötig ist.

Obwohl im Prinzip die zu integrierenden Gleichungen einfach sind, ergibt sich doch auf Grund der Vielzahl der möglichen Zustände des Automatik-Getriebes und auf Grund der Eigenschaften hydrody-

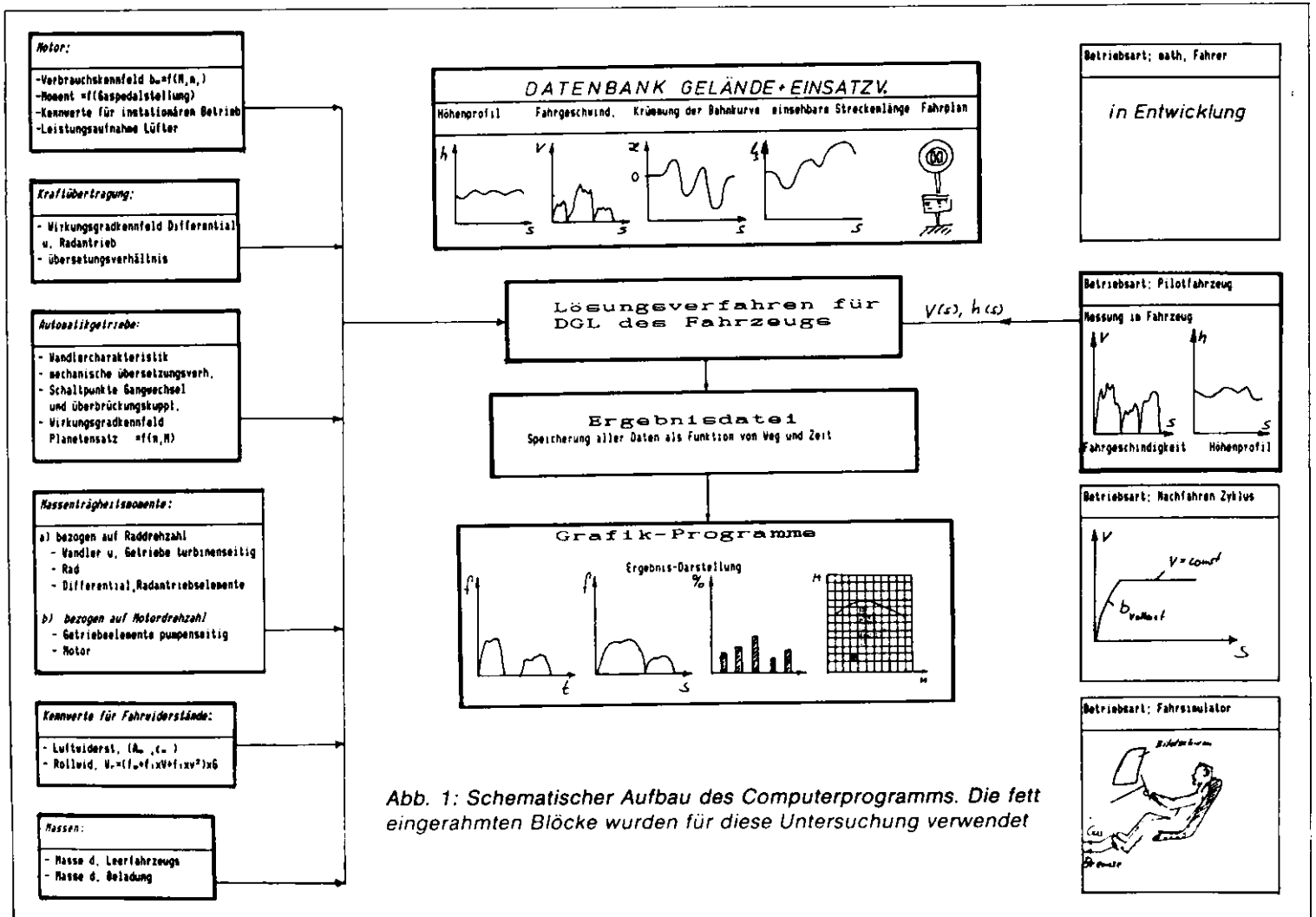


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Computerprogramms. Die fett eingetragenen Blöcke wurden für diese Untersuchung verwendet

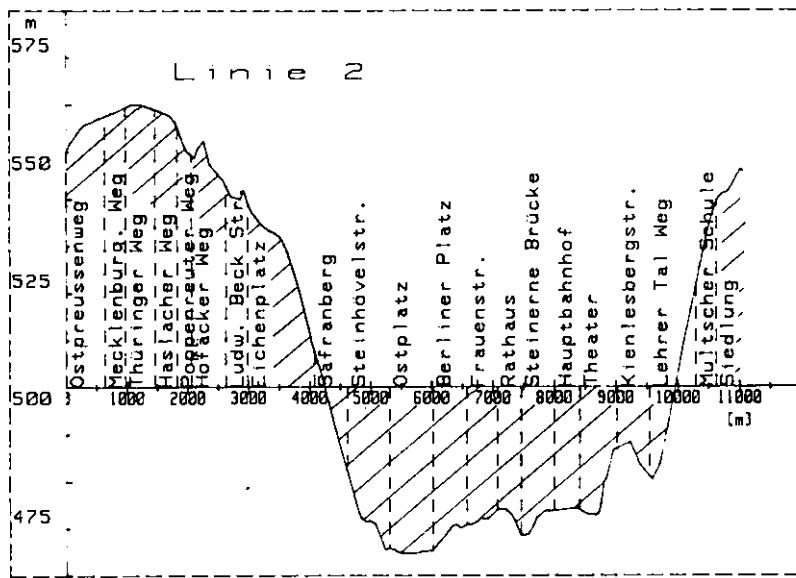


Abb. 2: Höhe über NN als Funktion der Wegstrecke des Busses

Eingabegrößen

Fahrzeugdaten

Eine Darstellung der im Programmsystem berücksichtigten Fahrzeugdaten geht aus Abbildung 1 hervor. Die mit Hilfe einzelner Meßdaten erstellten Kennfelder wurden überwiegend durch Regressionsfunktionen beschrieben. Die Auswahl der für die Regressionsrechnung verwendeten, mathematischen Funktionen erfolgte mit großer Sorgfalt, da kein relevanter Verlust an Genauigkeit durch diese Vorgehensweise hingenommen werden sollte, sondern ein Ausgleich von Meßfehlern. Die Beschreibung der Fahrwiderstände wie Roll-, Luft- und Steigungswiderstand erfolgte entsprechend der üblichen Vorgehensweise.

Fahrer und Gelände

Die Vorgehensweise bei der Simulationsrechnung beruht darauf, daß Fahrten eines Pilotfahrzeugs bezüglich Geschwindigkeits- und Geländeprofil erfaßt und einer anschließenden Computersimulation zugrunde gelegt werden. Die Fahrgeschwindigkeit wurde dazu als Funktion des Weges gemessen. Das Geländeprofil wurde zunächst an Hand von Kartenmaterial im Maßstab 1:500 vermessen und dem gefahrenen Weg zugeordnet (Abb. 2 und 3). Diese aufwendige Erfassung wurde mittlerweile durch ein meßtechnisches Verfahren abgelöst, bei dem das Gelände bei der Pilotfahrt direkt gemessen und in einer Datenbank sofort gespeichert wird. Die Annahme, daß das Geschwindigkeitsprofil eines Pilotfahrzeugs bei einer Simulationsrechnung verwendet werden darf, hat nur dann eine Berechtigung, wenn die Fahrzeugdaten nicht wesentlich von denen des Pilotfahrzeugs abweichen.

Um auch bei stark abweichenden Fahrzeugdaten eine realistische Verbrauchsvorhersage machen zu können, ist der Fahrereinfluß zu berücksichtigen, da in Abhängigkeit z. B. von der Motorisierung des Fahrzeugs der Fahrer anders beschleunigen und auch andere Endgeschwindigkeiten fahren wird. Hierzu wird derzeit ein Fahrermodell entwickelt, das das Verhalten eines Fahrers beschreiben und damit das Nachfahren von Pilotzyklen überflüssig machen soll.

Für diese sehr komplexe Aufgabe der Modellierung des Fahrerverhaltens bieten Stadtbusse im Vergleich zu anderen Straßenfahrzeugen günstige Voraussetzungen, da die Fahrer einerseits klare Zielvorgaben haben und andererseits die Fahrzyklen viele Gemeinsamkeiten aufweisen.

namischer Wandler ein sehr komplexes Programmsystem. Es war ein erheblicher Aufwand erforderlich, um vertretbare Rechenzeiten zu erzielen. Dazu wurden umfangreiche Untersuchungen über Diskretisierungsintervalle und die Konvergenzgeschwindigkeit bei verschiedenen iterativen Verfahren vorgenommen.

Schematisch ist die Programmstruktur in Abbildung 1 dargestellt, wobei für die hier vorliegende Untersuchung nur die Betriebsart Pilotfahrzeug eingesetzt wurde

(fett eingerahmte Programmteile). Um die Übersichtlichkeit zu fördern, ist die Vernetzung der anderen Blöcke in Abbildung 1 nicht angegeben. Das Programm ist auf einem Rechner der Serie 200 von Hewlett-Packard installiert und in den Sprachen Pascal und Basic geschrieben. Mit dem gleichen Rechner wurde auch die Datenerfassung im Fahrzeug vorgenommen, so daß eine kompatible Datenstruktur vorliegt und damit die zeitaufwendige Datenaufbereitung auf ein Minimum reduziert wird.

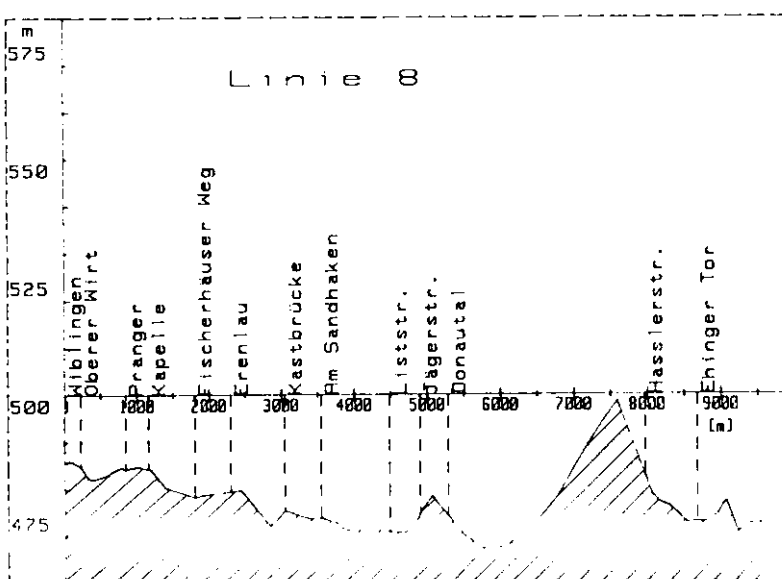


Abb. 3: Höhe über NN als Funktion der Wegstrecke des Busses



Vergleich Rechnung – Messung

Bei Versuchsfahrten wurde die Fahr­geschwindigkeit mit Hilfe eines Peiseler Ra­des und der Kraftstoffverbrauch mit Hilfe des Kienzle Verbrauchsmeßgerätes (ein Impuls entspricht 3 cm³) erfaßt. Das Ge­lände war zuvor vermessen worden. Es wur­den nun folgende Zyklen im Fahrversuch gefahren und anschließend im Computer simuliert:

- **Vollast-Zyklus** (Anfahrt mit Vollast, Kon­stantfahrt, Bremsung). Dabei wurde bei der Konstantfahrt jeweils mit 40, 50 und 60 km/h gefahren (ca. 15 km).

- **Realer Streckeneinsatz des Fahrzeugs** in Ulm z. T. mit Fahrgästen, wobei die Zahl der Fahrgäste zur Gewichtsermittlung ge­zählt wurde (120 km).

Die Meßergebnisse für den Kraftstoffver­brauch wurden als Funktion des Weges

Tabelle 1: Daten des untersuchten Fahr­zeugs

Hersteller:	Kässbohrer
Typ:	Gelenkzug
Motor:	OM 427 HA
Maximale Motorleistung:	206 KW
Getriebe:	VOITH Vier-Gang-Automatik-Getriebe
Hinterachsübersetzung:	4,63
Bereifung:	11/70 R 22,5
Anzahl der Reifen:	10 Stück
Endgeschwindigkeit:	83 km/h
Leergewicht:	13 600 kg

dargestellt und mit den Berechnungser­gebnissen für die gesamte Meßstrecke ver­glichen. Die Berechnungsergebnisse für den Kraftstoffverbrauch lagen dabei inner­halb der Toleranz der Meßeinrichtungen für Verbrauch und Wegstrecke.

Einflußgrößen auf das Verbrauchsverhalten von Stadtbussen

Die hier dargestellten Untersuchungen wurden für Gelenkbusse mit den in Tabel­le 1 dargestellten technischen Daten in Ulm durchgeführt. Da Verbrauchsergeb­nisse stark von den örtlichen Gegeben­heiten abhängig sind, können sie nicht ohne weiteres übertragen werden. Die Rela­tion der im folgenden variierten Parameter dürfte jedoch anders als die Absolutwerte auf andere Städte übertragbar sein, so daß die Verbrauchsergebnisse in Prozent an­gegeben werden.

Einfluß der Gelände­verhältnisse

Die untersuchten Strecken zeigen ein sehr unterschiedliches Gelände­profil. Linie 2 weist Steigungen bis maximal ca. 10% auf, Linie 8 ist vergleichsweise eben (Abb. 2 bis 5). Interessant ist auf diesen Strecken auch das gefahrene Geschwindigkeitspro­fil, das in den Abbildungen 6 und 7 stati­stisch analysiert ist. Die gefahrenen Ge­schwindigkeiten unterscheiden sich deut­lich, und es findet sich erwartungsgemäß

auf der ebenen Linie 8 ein deutlich höhe­res Geschwindigkeitsniveau als auf Linie 2. Die Weganteile der Gänge sind in den Abbildungen 8 und 9 angegeben. Entspre­chend den niedrigeren Geschwindigkeiten werden auf Linie 2 die unteren Gänge sehr viel häufiger als auf Linie 8 gefahren. Ent­sprechendes gilt für die Verbrauchsanteile in den einzelnen Gängen.

Trotz geringerem Geschwindigkeitsniveau ist der Kraftstoffverbrauch auf der Stei­gungsstrecke Linie 2 deutlich höher als auf Linie 8 (Abb. 12), was aus dem größeren Leistungsbedarf bei dem Befahren von Steigungsstrecken resultiert.

Einfluß des Schaltprogramms auf den Kraftstoffverbrauch

Moderne Automatik-Getriebe bieten die Möglichkeit, zwischen mehreren Schalt­programmen zu wählen und damit die Schaltpunkte den Erfordernissen des Ein­satzes anzupassen. Durch eine Verringerung der Schaltdrehzahlen wird ein Be­trieb des Motors im verbrauchsgünstigen Bereich erzwungen und bei einer Reduk­tion der Kick-Down-Schaltdrehzahl die maximal verfügbare Leistung des Motors reduziert. Dies ist z. B. dann sinnvoll, wenn gleichartige Fahrzeuge auf sehr unter­schiedlichen Strecken eingesetzt werden sollen. Dies trifft für Ulm auf der Linie 8 (ebene Strecke) zu, wo ein Schaltpro­gramm mit deutlich niedrigeren Schalt­drehzahlen als auf der Linie 2 (Steigungs­strecke) eingesetzt wird.

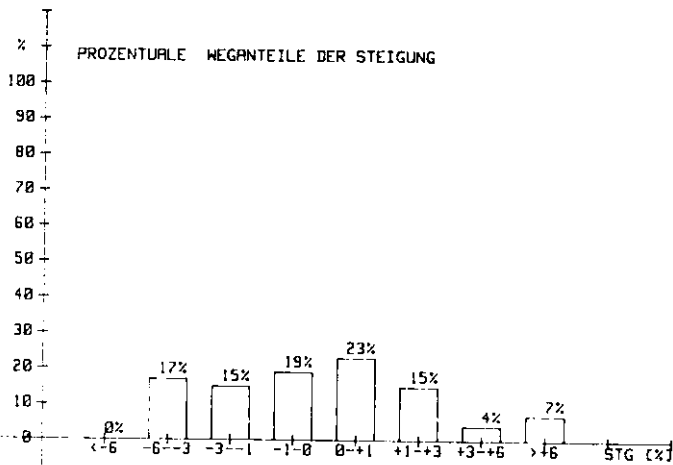


Abb. 4: Prozentuale Weganteile der Steigung auf der Linie 2 in Ulm

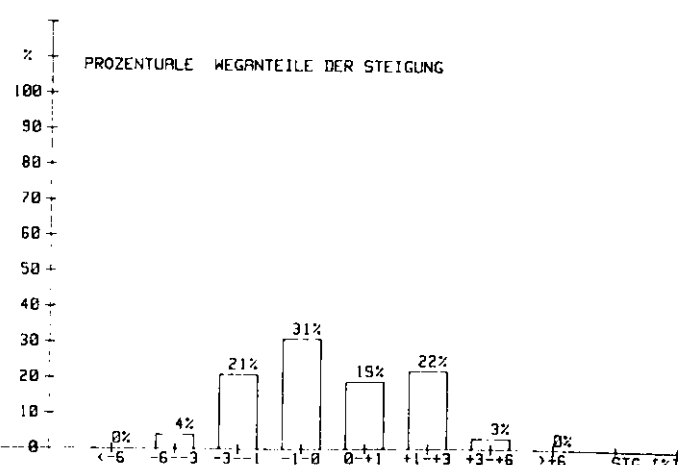
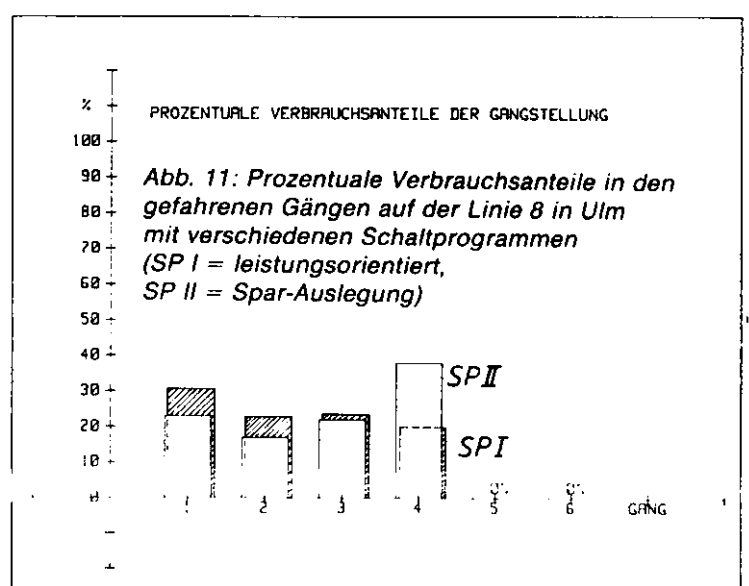
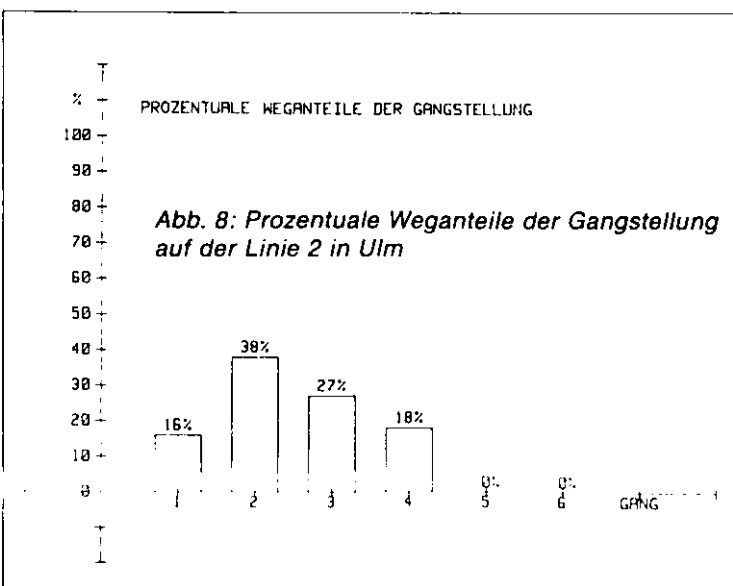
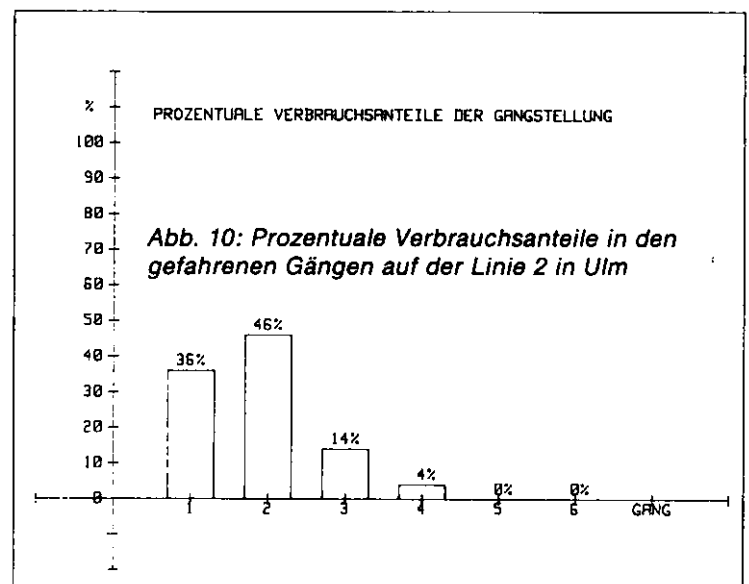
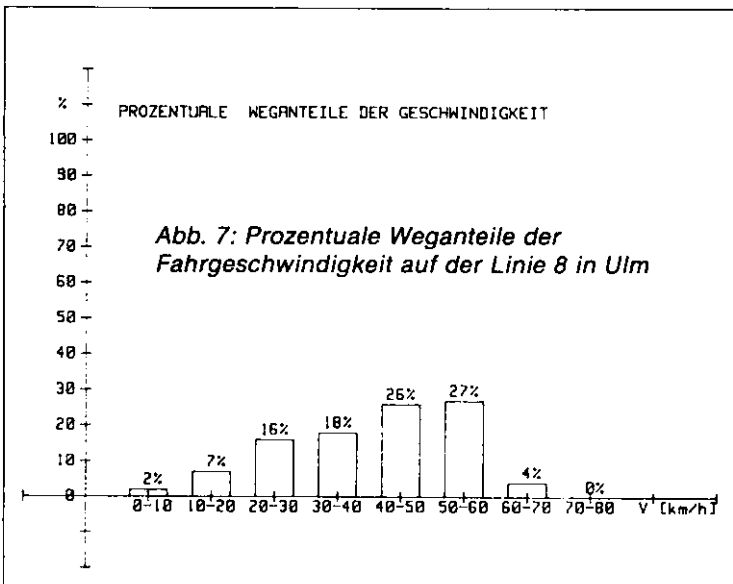
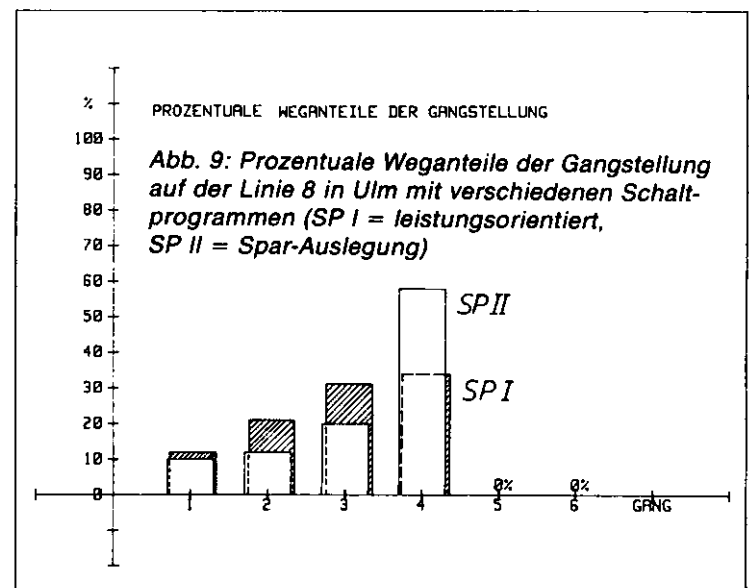
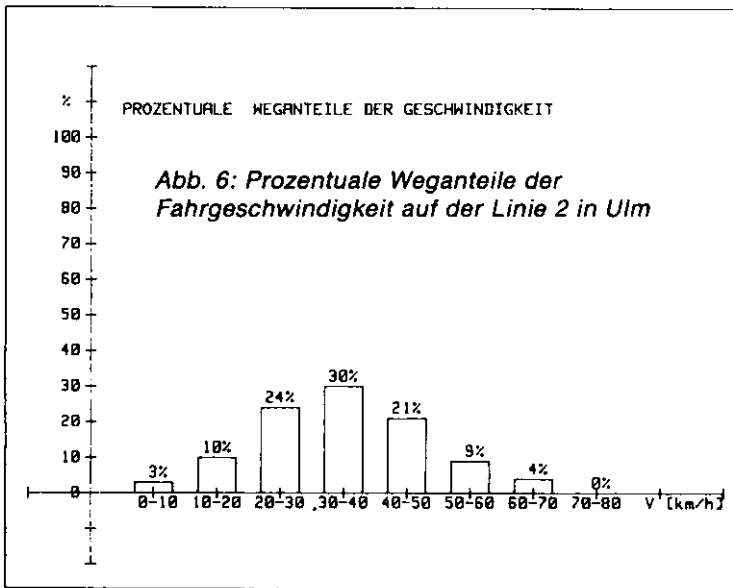


Abb. 5: Prozentuale Weganteile der Steigung auf der Linie 8 in Ulm





Um nun diesen Einfluß zu erfassen, wurde mit den Schaltprogrammen II (Spar-Auslegung) und I (leistungsorientiert) der Verbrauchseinfluß untersucht. Es ist ersichtlich, daß eine Einsparung bei gleichem Geschwindigkeitszyklus von bis zu 2,5 l/100 km möglich ist. Weiterhin ist feststellbar, daß die Einsparung auf Linie 8 (ebene Strecke) größer ist als auf Linie 2. Dies liegt daran, daß auf Linie 2 bereits das zum Befahren der Steigungen erforderliche hohe Drehmoment zu einem Betrieb im verbrauchsgünstigen Teil des Motor-Kennfelds führt, während auf Linie 8 das Fahrzeug mit dem Programm I überwiegend nur im Teillastbetrieb fährt.

Allerdings ist festzustellen, daß bei einer Gesamtmasse von 20 000 kg der vorgegebene Geschwindigkeitsverlauf auf der Linie 2 teilweise nicht erreicht wird, so daß die Verbrauchswerte nicht vergleichbar sind.

Die Wirkung des Schaltprogramms auf die Fahranteile der Gänge und den Verbrauchsanteil in den einzelnen Gängen ist für die Linie 8 ersichtlich (Abb. 9 und 11): Das auf wirtschaftliche Fahrweise ausgelegte Schaltprogramm II bewirkt einen deutlich höheren Weganteil in größeren Gängen und damit eine Verbrauchsreduzierung. Die Kraftstoffverbrauchswerte sind in Abbildung 12 dargestellt.

Maximalgeschwindigkeit im Zyklus

Der Fahrer hat insbesondere durch die Wahl der Maximalgeschwindigkeit im Zy-

klus und durch die Vermeidung unnötiger Bremsvorgänge (Voraussicht) entscheidenden Einfluß auf den Kraftstoffverbrauch. Um den Einfluß der Maximalgeschwindigkeit im Zyklus zu untersuchen, wurde der mit dem Pilotfahrzeug in der Realität gemessene Geschwindigkeitsverlauf $v_0 = f_0(s)$ durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor in einen Verlauf

$$v_1 = 1.05 v_0 \text{ und} \\ v_2 = 0.95 v_0$$

überführt. Dabei stellt v_1 einen Zyklus dar, bei dem die Geschwindigkeit 5% oberhalb und v_2 5% unterhalb der Basisgeschwindigkeit liegt.

Derartige Unterschiede können im realen Fahrbetrieb auftreten und sind einerseits abhängig von der Motivation des Fahrers, aber auch von der Motorisierung des Fahrzeugs. Wird z. B. in einem Fahrzeug die Motorleistung reduziert, was durch Einbau eines anderen Motors oder aber durch ein anderes Schaltprogramm erreicht werden kann, so wird das Geschwindigkeitsniveau im Einsatz sinken.

Den Einfluß auf das Verbrauchsergebnis zeigt Abbildung 13. Der Verbrauchsunterschied bei einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit im gesamten Zyklus um 5% ergibt einen Mehrverbrauch von deutlich mehr als 3 (2) l/100 km; eine Senkung der Geschwindigkeit um 5% ergibt einen Minderverbrauch von bis zu 3,3 (1,8) l/100 km Kraftstoff. Die Klammerwerte beziehen sich auf die Linie 8.

Einfluß des Rollwiderstands auf den Kraftstoffverbrauch

Der Rollwiderstand neuartiger EOT-Reifen ist niedriger als der herkömmliche Reifen. Der Verbrauchseinfluß des Rollwiderstands geht aus Bild 14 hervor. Dort ist das Simulationsergebnis für den Kraftstoffverbrauch für einen Reifen mit einem Rollwiderstandsbeiwert von 0.007 (Normalreifen) und für einen EOT-Reifen ($f = 0.0055$) dargestellt. Es ist ersichtlich, daß eine Verbrauchsminderung je nach Beladungszustand und Höhenprofil der Strecke von bis zu 1,4 l/100 km erzielt wird.

Einfluß des Standverbrauchs auf den Gesamtverbrauch

Der Verbrauch bei stehendem Fahrzeug mit laufendem Motor hat einen merklichen Einfluß auf das Verbrauchsverhalten von Stadtbussen. Um diesen Standverbrauch niedrig zu halten, ist eine möglichst niedrige Leerlaufdrehzahl erforderlich. Andere Maßnahmen – z. B. die Auskupplung des Wandlers bei Stillstand des Fahrzeugs – zielen in die gleiche Richtung. Um den Verbrauchseinfluß zu untersuchen, wurden zwei Fahrzeug-Varianten verglichen, die sich nur durch den Leerlaufverbrauch unterscheiden. Dabei wurde im ersten Fall ein Leerlaufverbrauch von 1,7 kg/h und im zweiten Fall ein Verbrauch von 2,2 kg pro Stunde zugrunde gelegt. Diese unterschiedlichen Werte können z. B. daraus resultieren, daß im einen Fall der Wandler

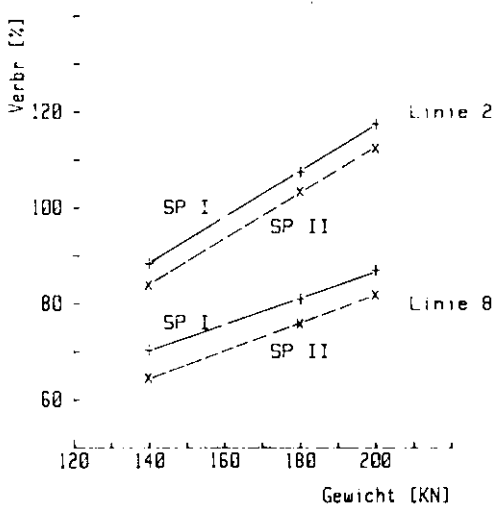


Abb. 12: berechneter Kraftstoffverbrauch auf den Linien 2 und 8 als Funktion des Gesamtgewichtes mit verschiedenen Schaltprogrammen

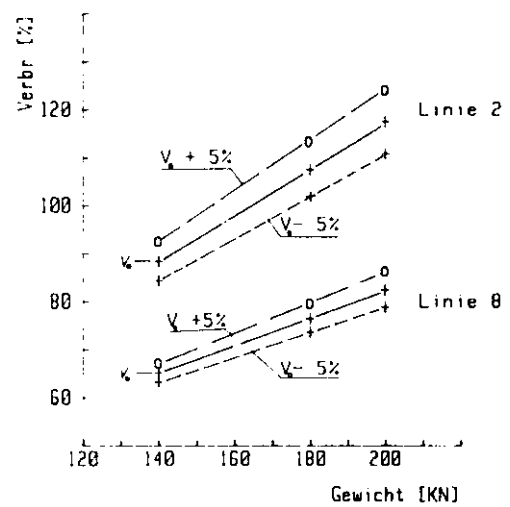


Abb. 13: berechneter Kraftstoffverbrauch auf den Linien 2 und 8 als Funktion des Gesamtgewichtes bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten ($v_0 =$ gemessenes Geschwindigkeitsprofil = Basisgeschwindigkeit und Basisgeschwindigkeit $\pm 5\%$)

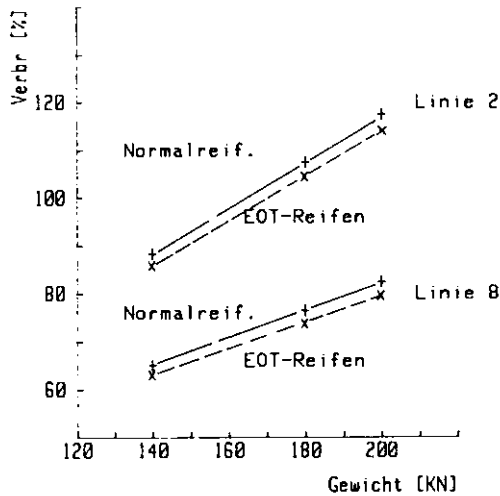


Abb. 14: berechneter Kraftstoffverbrauch auf den Linien 2 und 8 in Ulm in Abhängigkeit von Beladungszustand und Rollwiderstand der Bereifung

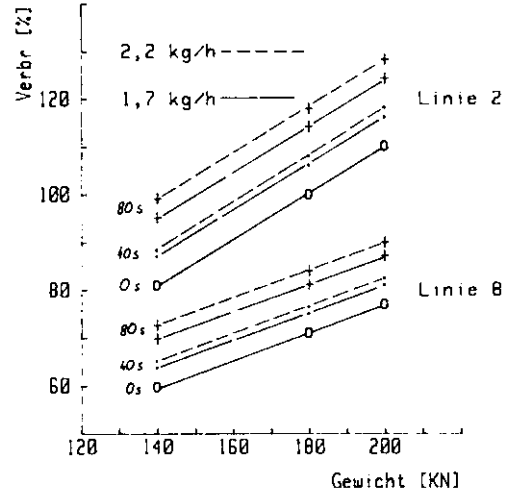


Abb. 15: berechneter Kraftstoffverbrauch auf den Linien 2 und 8 in Ulm in Abhängigkeit von Beladungszustand, Standzeit in einem Haltestellenintervall (0 s, 40 s, 80 s einschl. verkehrsbedingter Halte) und Standverbrauch (1,7 kg/h und 2,2 kg/h)

im Stand ausgekuppelt wird, während dies im anderen Fall nicht geschieht.

Weiterhin wurde der Einfluß der Standzeit pro Intervall untersucht. Dabei wurden zunächst die in Ulm gemessenen 40 Sekunden (Haltezeit an der Haltestelle plus verkehrsbedingte Halte zwischen zwei Haltestellen) zugrunde gelegt. Da Ulm teilweise separate Busspuren aufweist, dürften diese Standzeiten sicher an der unteren Grenze üblicher Werte liegen. Es wurde daher die Berechnung auch mit einer Standzeit von 80 s durchgeführt. Als unterer Grenzwert ist der Kraftstoffverbrauch ohne Standverluste (Kurve mit 0 Sekunden, Abb. 15) angegeben.

Abbildung 15 zeigt den beträchtlichen Einfluß des Leerlaufverbrauchs und der Standzeiten auf den Gesamtverbrauch pro 100 km. Selbst der geringfügig erscheinende Verbrauchsunterschied im Leerlauf von 0,5 kg/h führt zu einem Verbrauchsunterschied von bis zu 2,2 l/100 km. Wenn es gelänge, den Standverbrauch völlig zu eliminieren, so würde sich bei 80 s Standzeit pro Intervall eine beträchtliche Verbrauchsminderung von bis zu 9 l/100 km ergeben.

Weitere Einflußgrößen

Die hier untersuchten Einflußgrößen wurden ausgewählt, weil ein Betreiber von Stadtbussen diese nachträglich möglicherweise optimieren kann, indem

- andere Schaltprogramme nachgerüstet werden,
- Fahrerschulungen durchgeführt werden,
- die Busgröße dem Beförderungsaufkommen angepaßt wird,
- energiesparende Reifen eingesetzt werden,
- der Leerlaufverbrauch untersucht wird,
- eine Wandlerabschaltung im Stand nachgerüstet wird.

Sollen Neufahrzeuge beschafft werden, so sind sehr viel mehr Parameter bei der Fahrzeugauswahl zu berücksichtigen. Neben konstruktiven Merkmalen wie Leergewicht, Luftwiderstandsbeiwert, Wirkungsgrad von Motor und Getriebe, auf die der Käufer nur durch Wahl des Fahrzeugherstellers Einfluß hat, sind neben den bisher genannten Größen die folgenden für kraftstoffsparende Antriebe besonders wichtig:

- Achsübersetzung,
- Motorleistung und Motorcharakteristik,
- Anzahl der Getriebegänge,
- Wandlerauskuppelung im Stand,
- evtl. Sonderkomponenten (Bremsenergiespeicherung).

Insbesondere wenn Verkehrs- und Geländeverhältnisse vorliegen, mit denen in anderen Verkehrsbetrieben wenig Erfahrungen bestehen, kann eine individuelle Untersuchung z. B. mit der Hilfe der hier beschriebenen Computersimulation hilfreich sein.

Literatur

- [1] Bussien: Automobiltechnisches Handbuch
- [2] Rixmann: Zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs bei stationärer Straßenfahrt, ATZ 72 (1970) Heft 7, Seite 255
- [3] Seifried, A.: Kraftstoffverbrauch bei Stadtbussen mit Automatik-Getrieben, ATZ 72 (1970) Heft 7, Seite 251
- [4] Seifried, Buck, Maier: Statistische Fahrmechanik als Grundlage zur Berechnung von Fahrzeugantrieben, ATZ 75 (1973) Heft 5, Seite 163 und ATZ 75 (1973) Heft 8, Seite 290
- [5] Schützner, P.: Berechnung des Kraftstoffverbrauchs und der Fahrleistung für die optimale Auslegung von Antriebssträngen unter Berücksichtigung von Strecken- und Fahrereinfluß
- [6] Striffler, P.: Analytische Untersuchungen zur Optimierung von Triebwerkskomponenten bei Nutzfahrzeugen, VDI-Berichte 367, Seite 75
- [7] Körner, G.: Beeinflussung des Kraftstoffverbrauchs bei Stadtomnibussen, Verkehr und Technik Nr. 9/1981
- [8] Schürmann, D., Schweiner, G. W.: Vergleich der Hochrechnung und Messung von Testverbrauch und Abgasemission.
- [9] Mitschke, M.: Motor, Kennungswandler, Kraftstoffverbrauch, ATZ 83 (1981) Seite 27
- [10] Schubert, K.: Bewertung unterschiedlicher Antriebsaggregate in Nutzfahrzeugen, ATZ 79 (1977) Heft 5, Seite 181
- [11] Kneerich, W.: Optimierung von Getriebewirkungsgrad, Schaltqualität, Beschleunigung, Steigfähigkeit und Kraftstoffverbrauch von Pkw mit automatischem Getriebe durch Einsatz eines Computerprogramm-Systems