

Roadtrain-Konzept für den europäischen Güterverkehr

Roadtrain-Concept for the European Freight Transportation

Dipl.-Ing. Dirk Sandkühler

Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbH, Bereich Verkehr, Steinbachstr. 10,
52074 Aachen,

Tel. +49/(0)241/8861262; e-mail: sandkuehler@fka.de

Dipl.-Inf. Marco Laumanns

Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze, ETH Zürich, Gloriastraße 35,
CH-8092 Zürich,

Tel. +41/16327057, e-mail: laumanns@tik.ee.ethz.ch

Cand.-Ing. Nando Laumanns

Institut für Kraftfahrwesen Aachen, Bereich Verkehr, Steinbachstr. 10, 52074 Aachen,

Tel. +49/(0)241/885615; e-mail: laumanns@ika.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Der Verkehr auf Autobahnen wird stark durch den Nutzfahrzeuganteil beeinflusst. Für die Zukunft wird eine deutliche Steigerung der Belastung der vorhandenen Infrastruktur durch den Güterverkehr prognostiziert. Zur Bewältigung des zu erwartenden Verkehrsaufkommens muss der vorhandene Verkehrsraum effektiver genutzt werden. Für eine Erhöhung des Verkehrsdurchsatzes auf Autobahnen bieten sich zwei Ansatzpunkte. Ein großes Potential besteht in der Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von Nutzfahrzeugen auf 100 km/h. Wird gleichzeitig die Nutzlast und das Transportvolumen je Fahrzeug erhöht, kann der Lkw-Anteil am Gesamtverkehr bei gleichbleibender Transportmasse deutlich verringert werden. Der Beitrag stellt dar, welche Vorteile der Einsatz von Lkw mit erhöhter Nutzlast, sogenannten Roadtrains, in Bezug auf den Verkehrsdurchsatz, den Kraftstoffverbrauch und damit verbunden auf die Umweltverträglichkeit erwarten lässt. Besondere Berücksichtigung findet dabei die Auslegung des Antriebsstranges, der durch Kopplung des Simulationswerkzeugs PELOPS mit einem evolutionären Algorithmus für den Einsatz im Roadtrain optimiert wurde.

Summary

The traffic on highways is strongly influenced by trucks. For the future a growth of traffic load on the existing infrastructure caused by freight transportation is forecasted. To cope this expected volume of traffic the existing infrastructure has to be used more effective. To improve the traffic flow two starting points are possible. A high potential can be expected of an increase of the valid top speed for trucks up to 100 km/h. Increasing the maximum payload per vehicle simultaneously the truck rate of the overall traffic can be reduced conspicuously. This paper exposes the advantages a truck with an increased payload, a "Roadtrain", offers in terms of traffic flow, fuel consumption and environmental impact. A special consideration is put on the design of the powertrain, which was optimized using the traffic simulation tool PELOPS in combination with an evolutionary Algorithm.

1 Einleitung

Der Verkehr auf deutschen Autobahnen wird stark durch den Nutzfahrzeuganteil beeinflusst. Zwischen 1991 und 1998 stieg die Gütertransportleistung des Straßenverkehrs um 28,6 % auf 315,9 Mrd tkm/Jahr. Der Anteil des Straßenverkehrs an der Gesamttransportleistung aller Verkehrsträger erhöhte sich innerhalb dieses Zeitraums von 61,8 % auf 67,4 %. Parallel zu dieser Entwicklung wuchs die Länge des verfügbaren Straßennetzes des überörtlichen Verkehrs (BAB, Bundes-, Landes-, Kreisstraßen) lediglich um 1,9 % auf 230700 km. Prognosen lassen erwarten, dass der Gütertransport auf der Straße weiter zunehmen wird. Bis zum Jahr 2015 wird ein weiterer Zuwachs um 65 % auf eine Transportleistung von rund 600 Mrd tkm/Jahr vorausgesagt /1/.

Diese Zahlen lassen erkennen, dass für die nahe Zukunft mit einer deutlichen Zunahme des Verkehrsaufkommens zu rechnen ist. Da das Straßennetz nicht in gleichem Maße wie der Straßenverkehr wächst, müssen Lösungen gefunden werden, die den vorhandenen Verkehrsraum effektiver nutzen. Für eine Erhöhung des Verkehrsdurchsatzes auf Autobahnen bieten sich als Ansatzpunkte zum einen die Steigerung der Lkw-Geschwindigkeit und zum anderen die Erhöhung der Nutzlast und des Transportvolumens je Fahrzeug an.

Ika und fka haben mit Hilfe der Simulationswerkzeuge PELOPS (**P**rogrammsystem zur **E**ntwicklung **L**ängsdynamischer **mikr**oskopischer **V**erkehrs**P**rozesse in **S**ystemrelevanter Umgebung) und ADAMS in einem ersten Schritt den Einfluss eines Roadtrain-Konzeptes für Tempo 100 auf den Verkehrsdurchsatz, den Kraftstoffverbrauch und die Fahreigenschaften untersucht. Grundlage der Untersuchungen ist ein Roadtrain-Modell bestehend aus einer

Sattelzugmaschine und zwei Standard-Sattelaufliegern. Der zweite Auflieger ist dabei über einen Koppelanhängen an den ersten Auflieger angehängt.

Mit LKW der neuesten Generation ist eine Erhöhung der zulässigen Geschwindigkeit aufgrund moderner Antriebs-, Bremsen- und Fahrwerkstechnologie möglich. Wird gleichzeitig die Nutzlast und das Transportvolumen je Fahrzeug erhöht, kann der Lkw-Anteil am Gesamtverkehr bei gleichbleibender Transportmasse deutlich verringert werden. Das Potential, das eine Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von Nutzfahrzeugen auf 100 km/h zur Verbesserung des Verkehrsflusses bietet, wurde mit Hilfe des Verkehrsflusssimulationsprogramms PELOPS untersucht.

Neben den Vorteilen in Bezug auf eine Verbesserung des Verkehrsflusses bietet eine deutliche Erhöhung der Nutzlast von Lkw erhebliche wirtschaftliche Vorteile, besonders für Betreiber größerer Nutzfahrzeugflotten. Die zu erwartende Kraftstoffersparnis bezogen auf eine Tonne Transportgut wurde ebenfalls mit PELOPS untersucht und durch Koppelung dieses Tools mit einem evolutionären Algorithmus wurde der Antriebsstrang des Roadtrains hinsichtlich minimalen Kraftstoffverbrauchs optimiert.

Neben der technischen Realisierbarkeit des Roadtrain-Konzeptes ist sicherzustellen, dass die Randbedingungen des europäischen Straßenverkehrs berücksichtigt werden. So muss beispielsweise die Befahrbarkeit von Autobahnauffahrten oder das Abbiegen an Kreuzungen mit einem Roadtrain möglich sein. Daraus resultiert eine entsprechende Auslegung in Bezug auf den Raumbedarf des Lastzuges bei Kurvenfahrt. Hierzu wurde ein Modell des Roadtrains für das MKS-System ADAMS aufgebaut und hinsichtlich seiner Kurvengängigkeit untersucht.

2 Kurvengängigkeit und Handling

Das für die Simulationen in ADAMS aufgebaute Fahrzeug-Modell basiert auf einem Standard-Sattelzug, das anhand von Fahrversuchen validiert worden ist. Dieses Modell wurde um einen zweiten Auflieger erweitert, der über einen Koppelanhängen an den ersten Auflieger angehängt wurde. Die Simulationen wurden mit dem so erweiterten Modell
-1).

Ausgehend von diesem Basisfahrzeug wurden die beiden Auflieger mit unterschiedlichen Lenkachskonzepten ausgerüstet, um die Kurvengängigkeit des Roadtrains zu verbessern /2/. Ziel war es, den Anforderungen des in der Straßenverkehrszulassungsordnung StVZO) definierten „BO-Kraftkreises“ gerecht zu werden. In der Simulation wurden die

-Kraftkreises“ nach §32d StVZO erfüllen (Abb. 2-2).

Das Basisfahrzeug ohne lenkbare Aufliegerachsen ist nicht in der Lage, die Kreisbahn korrekt zu befahren.

Eine wichtige Aufgabe der Untersuchungen war es, eine geeignete Lenkstrategie für die Aufliegerachsen zu finden. Ausgewählt wurde eine Strategie, die abhängig vom Knickwinkel zwischen Zugmaschine und erstem Auflieger bzw. zwischen Koppelanhänger und zweitem Auflieger einen Lenkwinkel an den Aufliegerachsen einstellt. Es wurde ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Parametern Knickwinkel und Lenkwinkel festgelegt. Die Wahl eines linearen Zusammenhangs vereinfacht die Realisierung der Lenkaktuatorik.

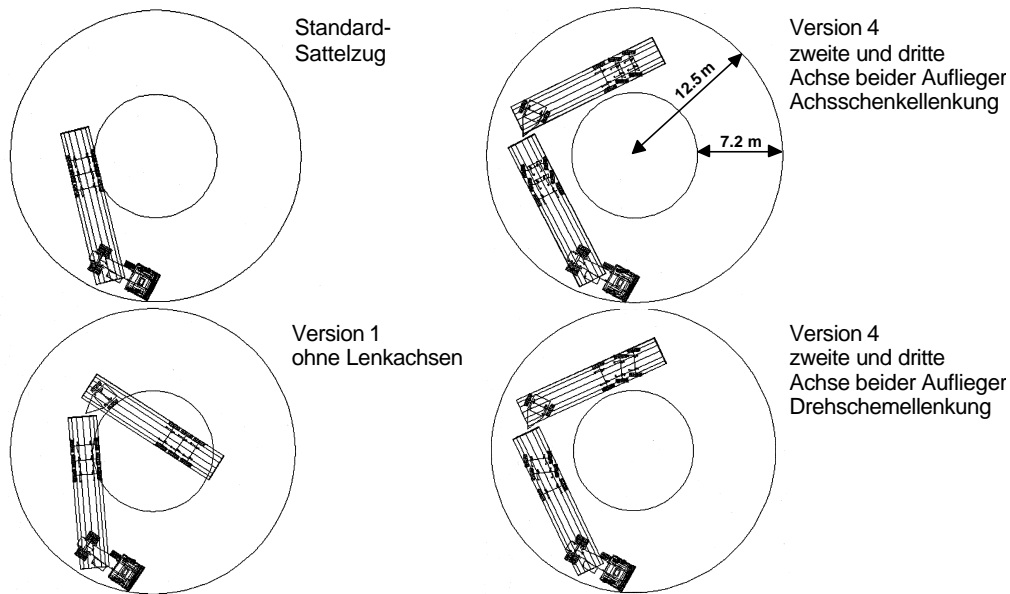


Abb. 2-2: Befahren des “BO-Kraftkreises”: Simulationsergebnisse

Fig. 2-2: “BO-Kraftkreis”-manoeuvre: simulation results

Weitere Untersuchungen wurden hinsichtlich der Fahrdynamik des Roadtrains vorgenommen. In der Simulation wurden folgende typische Fahrmanöver durchgeführt:

- Stationäre Kreisfahrt,
- Einfacher Fahrspurwechsel,
- Lenkwinkelsprung.

Die Abbildungen 2-3 und 2-4 zeigen ausgewählte Ergebnisse für den einfachen Fahrspurwechsel und den Lenkwinkelsprung für das Basisfahrzeug ohne lenkbare Aufliegerachsen.

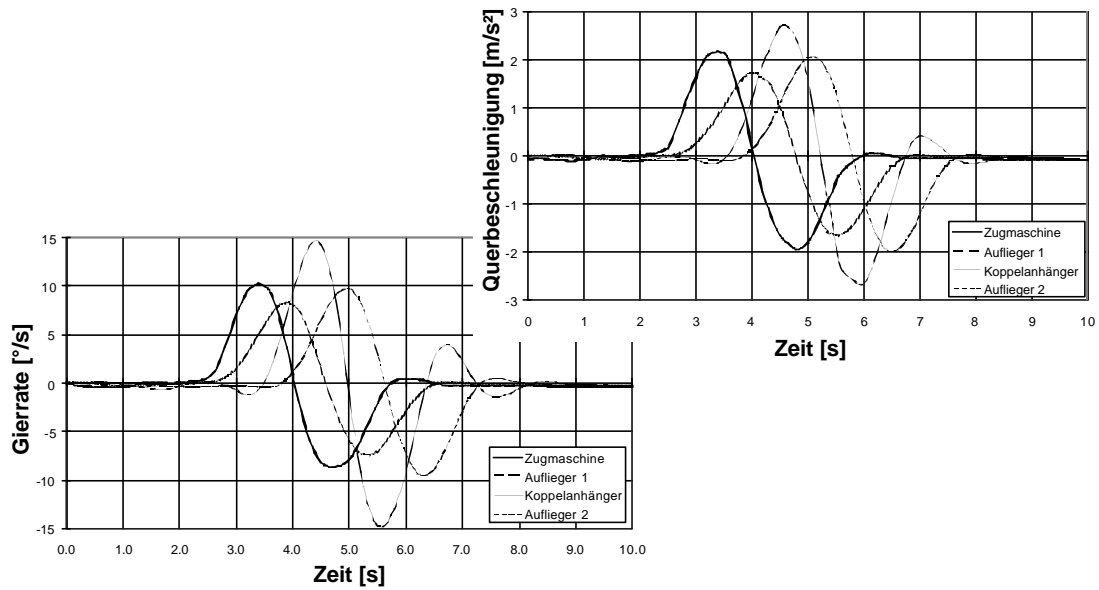


Abb. 2-3: Einfacher Fahrspurwechsel: Simulationsergebnisse, Version ohne lenkbare Aufliegerachsen

Fig. 2-3: Lane change manoeuvre: simulation results, version without steering trailer axle

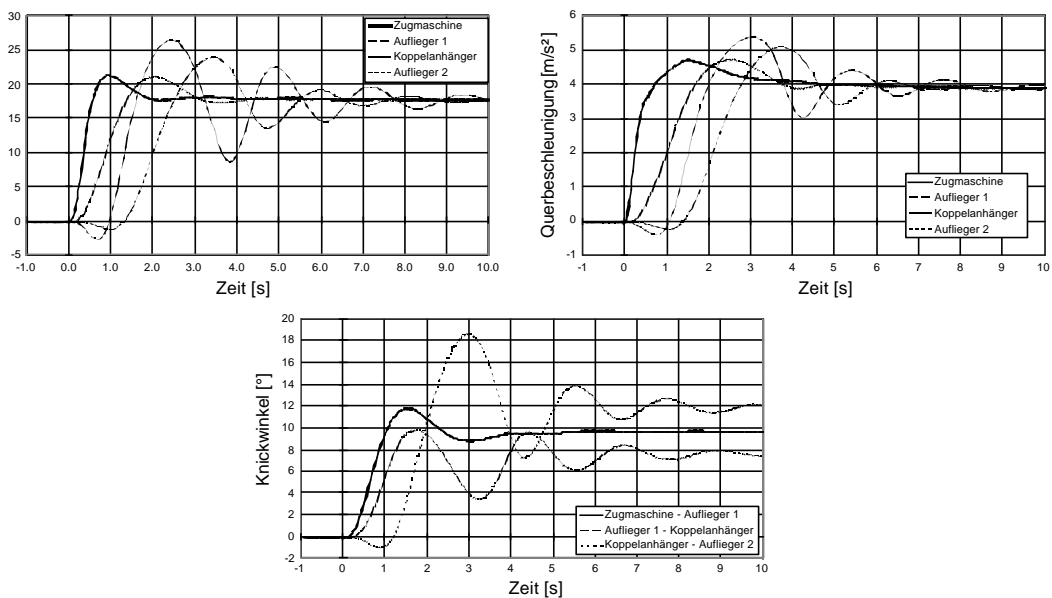


Abb. 2-4: Lenkwinkelsprung: Simulationsergebnisse, Version ohne lenkbare Aufliegerachsen

Fig. 2-4: Steering-angle jump manoeuvre: simulation results, version without steering trailer axle

Beide Fahrmanöver wurden mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h durchgeführt. Wie die dargestellten Diagramme zeigen, sind aus Sicht der Querdynamik der Koppelanhänger und der zweite Auflieger die kritischen Komponenten des Roadtrains. Beim Lenkwinkelsprung schwingt die am Koppelanhänger auftretende Querbewegung mit einer Amplitude von $1,3 \text{ m/s}^2$ über. Am zweiten Auflieger beträgt dieser Wert $1,1 \text{ m/s}^2$. Darüber hinaus ist die Schwingungsdauer bis zum Erreichen des stationären Endwertes für die beiden Komponenten etwa doppelt so hoch wie für den ersten Auflieger.

Die Abbildung 2-5 zeigt die Ergebnisse der stationären Kreisfahrt.

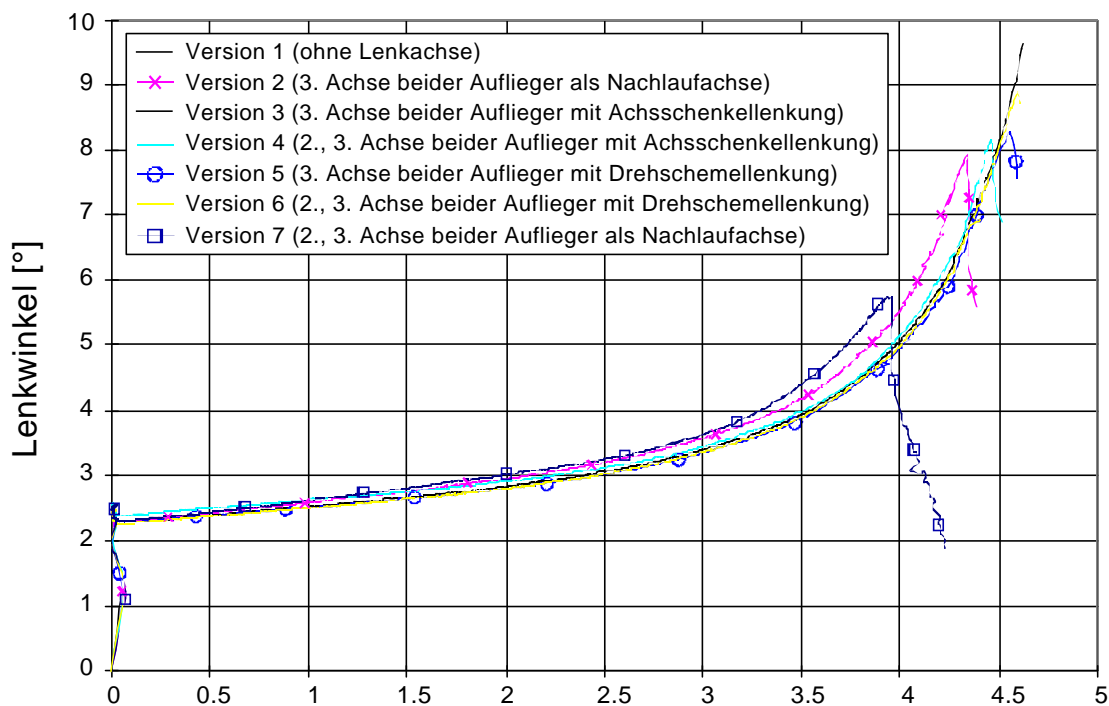


Abb. 2-5: Stationäre Kreisfahrt: Simulationsergebnisse

Fig. 2-5: Handling on circular course manoeuvre: simulation results

Die Modellvariante, die mit zwei Nachlaufachsen pro Auflieger ausgerüstet ist, zeigt bei der stationären Kreisfahrt die schlechtesten Resultate. Das Fahrzeug beginnt bereits bei einer Querbewegung von $3,9 \text{ m/s}^2$ auszubrechen. Die besten Resultate zeigt das Basisfahrzeug ohne lenkbare Aufliegerachsen. Diese Modellvariante zeigt bis zu einer Querbewegung von $4,6 \text{ m/s}^2$ ein untersteuerndes Fahrverhalten.

3 Kraftstoffverbrauch

Neben der Fahrdynamik lag ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Abschätzung des Potentials der Kraftstoffersparnis, die das Roadtrain-Konzept bietet. Dazu wurde ein Modell des Roadtrains für das Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS erstellt. PELOPS bietet ein hochauflösendes Fahrzeugmodell, das die verschiedenen Komponenten des Antriebsstrangs wie Motor, Getriebe, Retarder etc. in einer hohen Genauigkeit abbildet. Dieses Simulationswerkzeug wurde mit einem evolutionären Algorithmus gekoppelt, um den Antriebsstrang des Roadtrains hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs zu optimieren. Bevor das Vorgehen und die Ergebnisse der Simulation detailliert erläutert werden, soll kurz das Simulationswerkzeug PELOPS vorgestellt werden.

3.1 Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS

Das Simulationsprogramm PELOPS (**P**rogrammsystem zur **E**ntwicklung **L**ängsdynamischer **m**ikr**O**skopischer Verkehrs**P**rozesse in **S**ystemrelevanter Umgebung) stellt ein Werkzeug sowohl zur Beurteilung infrastrukturgestützter Maßnahmen zur Verkehrsflussoptimierung als auch zur Bewertung emissions- und verbrauchsreduzierender fahrzeugseitiger Maßnahmen dar. Es ist in den letzten Jahren von fka/ika in Zusammenarbeit mit der BMW AG entwickelt worden. Die Analyse sowohl der Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Mensch und Umwelt als auch des Einflusses des Automobils auf dieses Gesamtsystem ist die Aufgabe des Programmsystems PELOPS.

Den Kern des Programms bilden die drei wesentlichen Elemente des Verkehrs - Strecke/Umwelt, Fahrer und Fahrzeug. Mit ihnen kann PELOPS durch seine komplexe Software den Verkehr in einer bislang unerreichten Genauigkeit simulieren. Das umfassende Streckenmodell erlaubt bei Bedarf eine detaillierte Beschreibung der Einflüsse einer stationären Verkehrsumgebung. Mit der Vorgabe streckenabhängiger Umweltparameter ist diese Verkehrsumgebung durch Parameter wie Nässe, Glätte etc. erweiterbar. Die Abbildung des Verkehrselementes Fahrer ist in ein Verhaltensmodell und in ein Handlungsmodell gegliedert. Im Verhaltensmodell werden die Parameter der lokalen Fahrstrategie wie Geschwindigkeits- und Spurwahl bestimmt. Das Handlungsmodell setzt die Kenngrößen der lokalen Fahrstrategie in fahrzeugseitige Stellgrößen wie Gaspedalstellung, Gangstellung etc. um.

Im Fahrzeugmodell werden diese Stellgrößen in dynamische Fahrzeuggrößen umgewandelt. Die Modellierung des Fahrzeugs ist durch einen hohen Detaillierungsgrad geprägt. Das

Motordrehzahl und -moment Daten zu Kraftstoffverbrauch und den gesetzlich limitierten Abgaskomponenten CO, HC und NO_x enthält. Auf diese Weise ist es möglich, Verbrauchsangaben zu vorgegebenen Streckenabschnitten oder bekannten Geschwindigkeitszyklen zu ermitteln. In Abbildung 3-1 ist die beschriebene Struktur von PELOPS dargestellt.

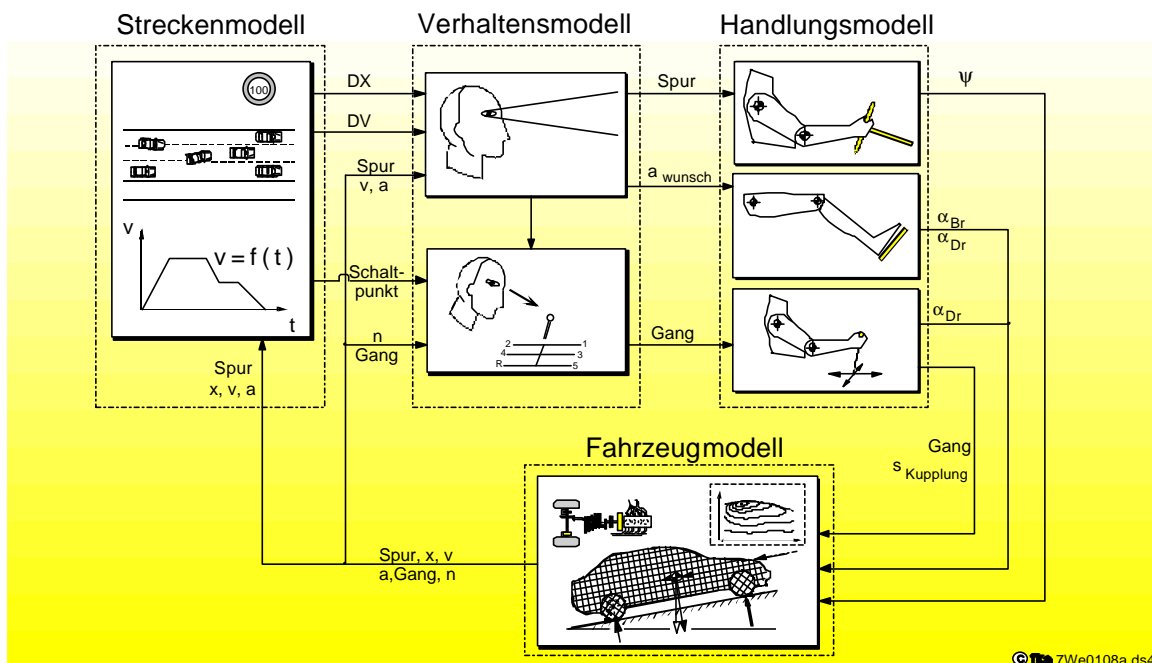


Abb. 3-1: Das mikroskopische Simulationswerkzeug PELOPS

Fig. 3-1: The microscopic simulation-tool PELOPS

3.2 Antriebsstrangoptimierung

Die Optimierung des Antriebsstranges wurde durch Koppelung von PELOPS mit einem evolutionären Algorithmus durchgeführt. Vorrangiges Ziel der Optimierung war es, den

Kraftstoffverbrauch des Roadtrains zu minimieren. Dabei sollten akzeptable längsdynamische Fahreigenschaften erhalten bleiben.

Der evolutionäre Algorithmus stellt für Probleme mehrdimensionaler Optimierung geeignete Lösungsverfahren zur Verfügung. Dabei stellt er keine speziellen Anforderungen an die Art der zu optimierenden Zielfunktionen und Entscheidungsparameter. Diese Eigenschaft lässt ihn für diese spezielle Anwendung als besonders gut geeignet erscheinen. So ist es möglich, die Zielfunktionen nicht in analytischer Form, sondern, wie in diesem Fall, als Ausgabe-größen eines Simulators zur Verfügung zu stellen.

Ein Evolutionsprozess betrachtet im allgemeinen das Individuum als das zu optimierende Objekt. Die Merkmale des Individuums, die für die Optimumssuche relevant sind, werden auf reelle Zahlen abgebildet. Dabei wird zwischen Entscheidungs- und Objektvariablen unterschieden. Objektvariablen beschreiben die Eigenschaften des Individuums. Entscheidungsvariablen sind das Resultat der Zielfunktionen und beschreiben die Qualität des Individuums in Relation zu anderen Individuen einer Population hinsichtlich der durch die Zielfunktionen beschriebenen Eigenschaften. Diese Zahlen werden in einem Vektor zusammengefasst, so dass jedes Individuum durch einen Vektor in seinen für die Optimierung relevanten Eigenschaften vollständig beschrieben ist. Ausgehend von einem Satz von Individuen, der sog. Population, werden diese Individuen einem iterativen Prozess von Auswahl und Variation unterzogen, bis ein Endkriterium erfüllt ist. Variationen werden nach den Prinzipien der Rekombination und der Mutation erzeugt. Rekombination meint den Austausch von Eigenschaften existierender Individuen zur Bildung eines neuen. Mutation ist die Bildung eines neuen Individuums durch zufällige Veränderung. Die Auswahl selektiert anhand der vorgegebenen Zielfunktionen die dominanten Individuen. Dazu werden alle Individuen anhand der vorgegebenen Zielfunktionen beurteilt. Alle rezessiven Individuen einer Generation werden gelöscht. Als rezessiv gilt ein Individuum dann, wenn es in allen durch die Zielfunktionen beschriebenen Eigenschaften einem anderen Individuum unterlegen ist. Die dominanten Individuen bilden die Eltern für die nächste Iteration. Um genetische Drift und dadurch eine zu starke Betonung einzelner Bereiche des Lösungsraumes zu vermeiden, wurde die Auswahl der Individuen zur Mutation dichteabhängig getroffen. Dadurch wird eine gleichmäßigere Verteilung der Alternativen im Lösungsraum erreicht. Bei dem angewendeten Typ des mehrdimensionalen evolutionären Algorithmus handelt es sich um einen sogenannten UMMEA (Unified Model for Multi-objective Evolutionary Algorithms) /3/.

Im Folgenden werden die Objektparameter vorgestellt, die dem evolutionären Algorithmus n.

Ausgehend von einer maximalen Zuladung von 24 t pro Auflieger konnte die Zuladung zwischen 24 t und 48 t für den gesamten Zug variiert werden. Abhängig von der Ausnutzung der Zuladung des zweiten Aufliegers wurde das Aufliegergewicht in einem festen Verhältnis bei der Berechnung des gesamten Zuggewichts berücksichtigt.

Zur Abbildung des Motors wurde das Kennfeld eines Serienmotors mit einer Nennleistung von 280 kW und einem maximalen Drehmoment von 1791 Nm gewählt. Die Vollastkennlinie konnte vom Algorithmus durch einen Skalierungsfaktor „verschoben“ werden, der Werte zwischen eins und zwei annehmen konnte, d.h. für den Optimierungsprozess stand dem evolutionären Algorithmus theoretisch ein maximales Motormoment von 3582 Nm zur Verfügung. Die Kennlinien konstanten spezifischen Kraftstoffverbrauchs wurden dabei immer der Motorskalierung angepasst. Der Wert des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs blieb dabei jedoch immer konstant.

Die Hinterachsübersetzung konnte vom Algorithmus im Intervall zwischen zwei und vier frei gewählt werden. Darüber hinaus konnte der Algorithmus zwischen zwei Schaltgetrieben wählen. Beide Getriebe besitzen 16-Gänge, wobei bei einem Getriebe der 15. Gang, bei dem anderen Getriebe der 16. Gang als direkter Gang ausgeführt sind.

Der fünfte Objektparameter beschreibt die Schaltstrategie des Fahrers. Hier wurde dem Algorithmus eine Differenz zwischen oberer und unterer Schaltdrehzahl von 300/min vorgegeben. Die untere Schaltdrehzahl konnte vom Algorithmus zwischen 1300/min und 1600/min verändert werden. Aus der vorgegebenen Differenz ergeben sich daraus obere Schaltdrehzahlen zwischen 1600/min und 1900/min.

Die Objektparameter sind in Abbildung 3-2 zusammengestellt.

Als Entscheidungsparameter wurden zehn Kenngrößen festgelegt, die als Ergebnisse den im Simulationswerkzeug PELOPS als Zielfunktionen abgelegten Beurteilungsszenarien entnommen werden konnten. Zur Beurteilung und Auswahl einzelner Roadtrain-Varianten wurde der in Abbildung 3-3 dargestellte Satz von Entscheidungsparametern festgelegt.

Objektparameter	
1. Motormoment, Skalierungsfaktor $1+x_0$, $x_0 \in [0...1]$	
2. Fahrzeuggesamtgewicht, Skalierungsfaktor x_1 , $x_1 \in [0...1]$	
3. Übersetzung Hinterachse, Skalierungsfaktor x_2 , $x_2 \in [0...1]$	
4. untere Schaltdrehzahl, Skalierungsfaktor x_3 , $x_3 \in [0...1]$	
5. Auswahl Schaltgetriebe, Skalierungsfaktor x_4 , $x_4 \in [0,1]$	

Abb. 3-2: Objektparameter des Roadtrains

Fig. 3-2: *Object-parameters of roadtrain*

Entscheidungsparameter	
1. Zeit für eine Beschleunigung 0-40 km/h	y_0
2. Zeit für eine Beschleunigung 40-90 km/h	y_1
3. Höchstgeschwindigkeit in der Ebene	y_2
4. Höchstgeschwindigkeit im 14. Gang, 1,5% Steigung	y_3
5. Höchstgeschwindigkeit im 16. Gang, 1% Steigung	y_4
6. Kraftstoffverbrauch bei konstant 100 km/h	y_5
7. Kraftstoffverbrauch bei konstant 80 km/h	y_6
8. Durchschnittsgeschwindigkeit auf einem Autobahnabschnitt	y_7
9. Kraftstoffverbrauch auf einem Autobahnabschnitt	y_8
10. Anzahl der Gangwechsel auf einem Autobahnabschnitt	y_9

Abb. 3-3: Entscheidungsparameter des Roadtrains

Fig. 3-3: *Decision-parameters of roadtrain*

Die Werte ergeben sich aus den in PELOPS abgelegten Szenarien. Dazu werden zunächst die Objektparameter des Individuums an PELOPS übergeben und in das Fahrzeugmodell übernommen. Die Simulation wird dann mit diesen Parametern durchgeführt. Die speziellen Randbedingungen, die die verschiedenen Szenarien charakterisieren, sind im Vorhinein definiert und für alle Simulationen konstant. Diese Randbedingungen beschreiben den Fahrer sowie das erforderliche Streckenprofil. So wurde beispielsweise für den Autobahnzyklus ein 18 km langes Streckenprofil mit Steigungen zwischen $-4,5\%$ und $3,9\%$ ausgewählt und dieses im PELOPS-Streckenmodell abgebildet. Der Fahrer ist in seinen Eigenschaften durch das PELOPS-Fahrermodell abgebildet. Alle vorkommenden Roadtrain-Varianten werden exakt demselben Szenario unterzogen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Ergebnisse unterschiedlicher Individuen miteinander vergleichbar sind. Nachdem alle Szenarien für ein Individuum durchlaufen worden sind, werden die ermittelten Werte für alle Entscheidungsparameter dem evolutionären Algorithmus übergeben, der dann anhand dieser Ergebnisse einen Vergleich mit den im Archiv befindlichen Individuen vornimmt. Handelt es bei dem neuen Individuum um ein rezessives, wird es sofort gelöscht. Ist es hingegen dominant und einem anderen in allen Entscheidungsparametern überlegen, so wird das rezessive Individuum aus dem Archiv gelöscht. Dieser Vorgang wird anschließend mit einem neuen Individuum durchgeführt, das sich aus einer Mutation einer archivierten Variante ergibt. Dieser iterative Prozess wird fortgesetzt, bis die vorgegebene Anzahl von Iterationen erreicht ist.

Zur Variation der Individuen wurde für diese spezielle Anwendung ausschließlich das Prinzip der Mutation verwendet. Dazu wurden die Objektparameter durch eine zufällige Variable

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + x_i', \quad x_i' \sim N(0, \mathbf{s}) \quad (1)$$

verändert. Die Mutationsvariable ist durch eine Normalverteilung mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,02$ gekennzeichnet. Die Rekombination hat sich hier als ungeeignet erwiesen, da die Abhängigkeit der verschiedenen Objektparameter sich als zu stark ausgeprägt gezeigt hat.

Für den Optimierungsprozess wurde ein hierarchisches Vorgehen gewählt. Dabei wurde der erste Durchlauf des Algorithmus dazu verwendet, eine Eingrenzung der Intervalle für die zu optimierenden Objektparameter vornehmen zu können. Auf diese Weise kann der notwendige Rechenaufwand erheblich reduziert werden. Die Abbildung 3-4 zeigt die Resultate für

alle Objektparameter. Eine Analyse der Ergebnisse dieses ersten Durchlaufs zeigt, dass die Festlegung des Ziels eines möglichst geringen Kraftstoffverbrauchs nicht unbedingt bedeutet, dass sich die übrigen Entscheidungsparameter signifikant verschlechtern. Da der Kraftstoffverbrauch ein wesentliches Element für die Profitabilität eines Fahrzeugkonzepts darstellt, bedarf dieser einer besonderen Beachtung.

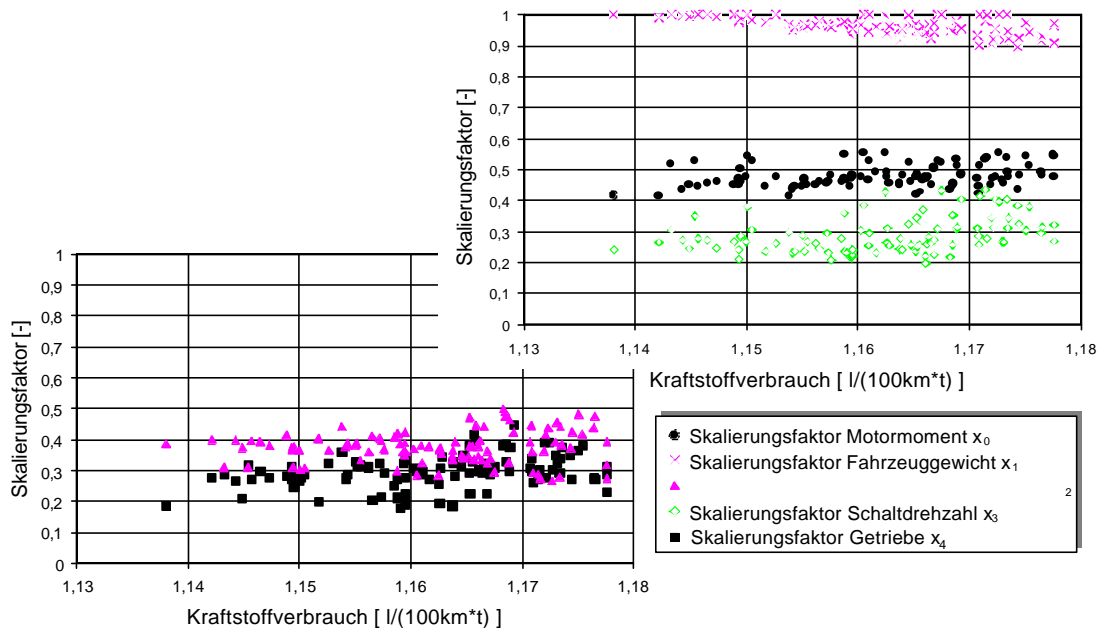


Abb. 3-4: Ergebnis für die Objektparameter, erster Durchlauf

Fig. 3-4: Results for object-parameters, first run

Aufgrund der Ergebnisse nach Abbildung 3-4 wurden die Intervalle der Objektparameter wie folgt festgelegt:

- Motormoment $x_0 \in [0.4, 0.6]$
- Gesamtgewicht des Fahrzeugs $x_1 = 1$
- Übersetzung Hinterachse $x_2 \in [0.3, 0.4]$
- Schaltdrehzahlen $x_3 \in [0, 0.5]$
- Getriebe $x_4 = 0, 16$. Gang ist als direkter Gang ausgeführt

Mit diesen Vorgaben wurde ein zweiter Durchlauf des Algorithmus gestartet. Auf diese Weise lässt sich die sogenannte Pareto-Menge, die Menge der optimalen Lösungen, für den für die

Anwendung interessantesten Bereich des Lösungsraumes in geeigneter Weise approximieren.

Die Auswahl einer Roadtrain-Variante kann nun durch eine beliebige Kombination der Entscheidungsparameter getroffen werden. Beispielsweise könnte ein Roadtrain von Interesse sein, der bei einer Steigung von 1,5 % im 14. Gang eine Geschwindigkeit von 96 km/h nicht unterschreitet, und dabei den geringsten Kraftstoffverbrauch bezogen auf eine Tonne Nutzlast aufweist. Aus einem Diagramm, das diese Entscheidungsparameter in Abhängigkeit voneinander darstellt, kann die für diese Kriterien günstigste Variante -5).

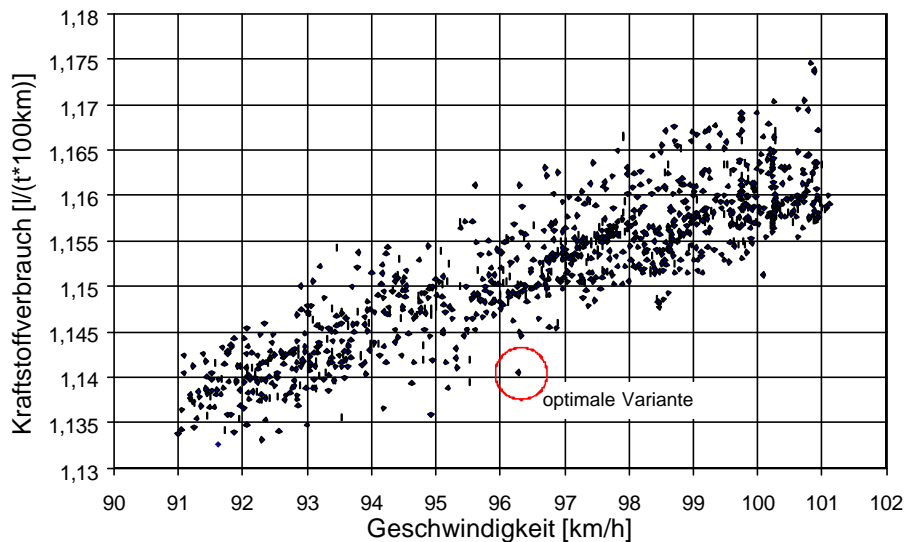


Abb. 3-5: Kraftstoffverbrauch bei konstanter Geschwindigkeit und 1,5 %-Steigung

Fig. 3-5: Fuel consumption at constant velocity and 1,5 % road gradient

Die anhand der genannten Kriterien ausgewählte Roadtrain-Variante soll nun abschließend mit einem Standard-Sattelzug hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs bezogen auf eine Tonne Nutzlast verglichen werden. In Abbildung 3-6 zeigt ein solcher Vergleich den Kraftstoffverbrauch, der für die beiden Gespanne auf einem Autobahnabschnitt von 18 km Länge simulationstechnisch ermittelt wurde. Das Streckenprofil entstammt einem der im Optimierungsprozess verwendeten Szenarien.

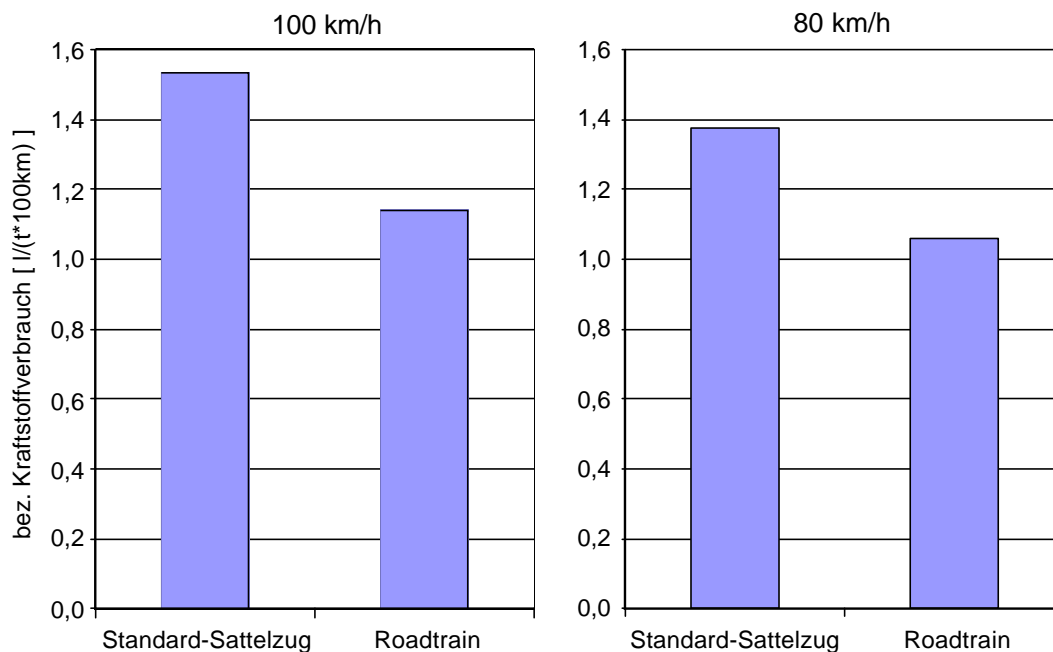


Abb. 3-6: Kraftstoffverbrauch von Roadtrain und Standard-Sattelzug

Fig. 3-6: Fuel consumption of roadtrain and normal truck

Dargestellt sind die Ergebnisse getrennt für 80 km/h und 100 km/h als zulässige Höchstgeschwindigkeit. Es zeigt sich, dass der bezogene Kraftstoffverbrauch des Roadtrains im Betrieb auf der Autobahn um 26 % (100 km/h) bzw. 23 % (80 km/h) geringer ist als der des Standard-Sattelzuges. In einzelnen stationären Betriebspunkten können sogar Verbesserungen von bis zu 35 % erzielt werden. In den Fahrleistungen müssen gleichzeitig keine signifikanten Einbußen hingenommen werden.

4 Verkehrsdurchsatz

Die verkehrlichen Auswirkungen des Einsatzes von Roadtrains wurden ebenfalls mit Hilfe des Simulationswerkzeugs PELOPS untersucht. Als Strecke wurde ein zweispuriger Autobahnabschnitt der BAB 61 zwischen Köln und Koblenz abgebildet. Die Untersuchungen wurden mit einer mittleren und einer hohen Verkehrsbelastung durchgeführt. Der Lkw-Anteil am Gesamtverkehr betrug jeweils 25 %. Eine Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für Nutzfahrzeuge von 80 km/h auf 100 km/h resultiert bei mittlerer Verkehrsbelastung in einer Verbesserung der Durchschnittsgeschwindigkeit um 10 % auf 120 km/h. Im Falle einer hohen Verkehrsbelastung fällt die Verbesserung mit einem Anstieg der Durchschnittsgeschwindigkeit um 14 % auf 117 km/h noch deutlicher aus (Abb. 4-1).

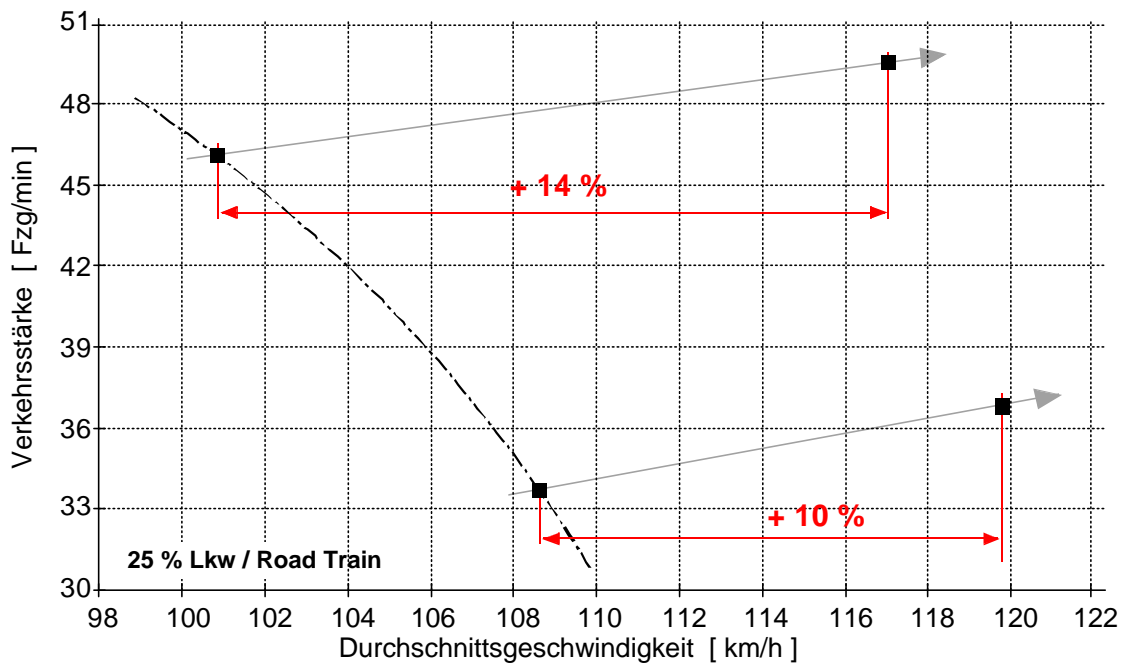


Abb. 4-1: Auswirkung auf den Verkehrsdurchsatz

Fig. 4-1: Improvement of traffic flow

5 Zusammenfassung

Die Bedeutung des Gütertransports auf der Straße hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Für die Zukunft wird eine weitere deutliche Zunahme der Straße prognostiziert. Da der Ausbau der zur Verfügung stehenden Infrastruktur mit diesem zunehmenden Bedarf nicht Schritt halten kann, müssen Lösungen gefunden werden, wie der vorhandene Verkehrsraum effektiver genutzt werden kann. Ein möglicher Lösungsansatz kann der Einsatz von Roadtrains sein.

Das diesen Untersuchungen zugrunde gelegte Roadtrain-Konzept besteht aus einer Sattelzugmaschine und zwei Standard-Sattelaufliegern. Der zweite Auflieger ist dabei über einen Koppelanhängen an den ersten Auflieger angehängt. Der Beitrag zeigt, welches Potential der Roadtrain in Bezug auf die Erhöhung des Verkehrsdurchsatzes auf Autobahnen hat. Mit Hilfe des Verkehrsflusssimulationsprogramms PELOPS wurde der Einfluss des Einsatzes von Roadtrains in Verbindung mit einer Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h auf den Verkehrsdurchsatz untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung der Durchschnittsgeschwindigkeit von 14 % bei hoher Verkehrsdichte erzielt werden kann.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Ermittlung des Potentials des Roadtrains in Hinblick auf eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs. Durch Koppelung des Simulationswerkzeugs PELOPS mit einem evolutionären Algorithmus wurde eine Roadtrain-Variante ermittelt, die unter Erhaltung akzeptabler Fahreigenschaften eine erhebliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zu einem konventionellen Sattelzug zeigt.

Für den Betrieb im europäischen Straßenverkehr ist neben dem Fahrverhalten die Kurvengängigkeit des Roadtrains von besonderer Bedeutung. Daher war dies ein zusätzlicher Schwerpunkt der Betrachtungen. Die Simulationen wurden mit dem MKS-System ADAMS durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kurvengängigkeit des Roadtrains unter Verwendung von lenkbaren Aufliegerachsen soweit verbessert werden kann, dass die Anforderungen des §32d StVZO erfüllt werden.

Die Untersuchung der fahrdynamischen Eigenschaften des Roadtrains wurden ebenfalls mit Hilfe von ADAMS untersucht. Anhand der Standard-Fahrmanöver stationäre Kreisfahrt, Lenkwinkelsprung und einfacher Fahrspurwechsel wurden die querdynamischen Eigenschaften des Gespanns untersucht. Die Resultate zeigen, dass hinsichtlich der Fahrstabilität die Auflieger die kritischen Komponenten des Zuges sind. Um eine akzeptable Fahrstabilität des gesamten Zuges zu erreichen, erscheint es erforderlich, zusätzliche Maßnahmen wie beispielsweise den Einsatz eines elektronischen Lenkassistenten zu ergreifen.

6 Literatur

- /1/ N.N.:
Verkehrsbericht 2000
Integrierte Verkehrspolitik: Unser Konzept für eine mobile Zukunft
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, November 2000
- /2/ Sandkühler, D.:
Simulationstechnische Untersuchung des Fahrverhaltens von mehrgliedrigen Roadtrain-Sattelzügen
Studienarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen, Aachen, 1998
- /3/ Laumanns, M.; Laumanns, N.; Neunzig, D.:
Multi-Objective Design Space Exploration of Road Trains with Evolutionary Algorithms

EMO '01, First Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization,
Zürich, März 2001