



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und  
Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Abteilung Energiewirtschaft

Daniel Oppliger, Christopher Onder, Lino Guzzella

---

# Simulationsstudie energiesparende Fahrweise für Heavy-Duty-Fahrzeuge Schlussbericht

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

**Auftragnehmer:**

Institut für Mess- und Regeltechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

**Autoren:**

Daniel Oppliger  
Christopher Onder  
Lino Guzzella

**Begleitgruppe:**

Kurt Bisang, Bundesamt für Energie BFE (Leitung)  
Reiner Langendorf, Quality Alliance Eco-Drive  
Martin Pulfer, BFE  
Thomas Schmid, Stiftung Klimarappen

Diese Studie wurde im Rahmen der Evaluationen des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt ist allein der/die Studiennehmer/in verantwortlich.



## Vorwort

Die vorliegende Simulationsstudie ermittelt das technisch machbare Einsparpotential der energiesparenden Fahrweise bei schweren Fahrzeugen. Die Resultate zeigen, dass ein angepasstes Schaltverhalten und eine vorausschauende Fahrweise bei schweren Fahrzeugen Treibstoff sparen helfen. Das Einsparpotential ist zwar geringer als bei Personenfahrzeugen und variiert je nach Einsatzgebiet. Vor allem im Stadtverkehr und bei Fahrten mit geringer Auslastung sind die Einsparungen aber beträchtlich. Mit einer angepassten Fahrtechnik können Fahrer von schweren Fahrzeugen Treibstoff einsparen. Das zahlt sich für die Fahrer und die Flottenbesitzer finanziell aus und unterstützt den Klimaschutz.

Die ETHZ liefert mit diesen Resultaten eine weitere Grundlage, um die Massnahmen des Bundesamts für Energie für die Förderung der energiesparenden Fahrweise gezielt auszurichten. Diese Grundlage ist gerade jetzt wichtig, weil sich die Rahmenbedingungen stark ändern: Die energiesparende Fahrtechnik ist ab 2009 Bestandteil der obligatorischen Fahrausbildung. Zudem steht zur Disposition, dass begleitende Massnahmen durch die Stiftung Klimarappen gefördert werden können.

Die Diskussion zum genauen Mix der Massnahmen, mit dem sichergestellt wird, dass die Fahrtechniken effizient mit wenig Aufwand gelernt und von den Fahrern in der Praxis umgesetzt werden, ist nicht abgeschlossen. Das jedoch zeigen die Resultate der Simulationsstudie bereits: Es lohnt sich, dass der Bund am Ball bleibt und die energiesparende Fahrweise bei Fahrern von schweren Fahrzeugen weiter unterstützt. Es ist zu wünschen, dass die energiesparende Fahrtechnik in der Praxis unter den Fahrern verbreitet und zu einem festen Bestandteil wird.

Michael Kaufmann, Leiter Programm EnergieSchweiz, BFE

Bern, 15.2.08

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Quasistatische Simulation . . . . .	3
1.1.1	Fahrzyklen . . . . .	5
1.1.2	Fahrzeuge . . . . .	6
1.2	Eco-Drive Massnahmen . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Validation</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Durchgeführte Simulationen und Resultate</b>	<b>9</b>
3.1	Schaltverhalten . . . . .	9
3.1.1	Schaltstrategien . . . . .	9
3.1.2	Zyklen . . . . .	11
3.1.3	Resultate Schaltverhalten . . . . .	13
3.1.4	Sensibilitätsanalysen . . . . .	18
3.2	Vorausschauendes Fahren . . . . .	29
3.2.1	NEFZ - Stadtteil . . . . .	29
3.2.2	Resultate NEFZ - Stadtteil . . . . .	32
3.2.3	Überland und Autobahn . . . . .	37
3.2.4	Resultate Überland und Autobahn . . . . .	39
3.2.5	Sensibilitätsanalysen . . . . .	44
3.3	Kombination Schaltverhalten und vorausschauendes Fahren . . . . .	54
3.3.1	Einsparungen durch Eco-Drive Schaltverhalten beim NEFZ - Stadtteil . . . . .	54
3.3.2	Kombination beider Massnahmen . . . . .	54
3.4	Entfernung von unnötigem Ballast . . . . .	55
3.5	Pneudruck . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>Danksagung</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Fahrzeugdaten</b>	<b>58</b>
A.1	Lastwagen 18t . . . . .	58
A.2	Lastwagen 40t . . . . .	59
A.3	Sattelschlepper . . . . .	60
A.4	Bus . . . . .	61
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>63</b>

# Zusammenfassung

Beim Betrieb von Personenwagen können Eco-Drive Massnahmen hohe Verbrauchersparnisse bewirken. Die wesentlichen Eco-Drive Massnahmen sind ein korrektes Schaltverhalten und ein vorausschauendes Fahrverhalten.

Mit Hilfe Quasi-Statistischer Simulationen (QSS) können effizient Verbrauchszahlen für definierte Fahrzyklen und Schaltstrategien bei gegebenem Fahrzeug berechnet werden.

Diese Studie untersucht anhand von QSS das technisch mögliche Einsparpotential durch Eco-Drive Massnahmen bei Nutzfahrzeugen. Als Eco-Drive Massnahmen werden untersucht: das Schaltverhalten, ein vorausschauendes Fahren, ein Achten auf richtigem Pneudruck und das Mitführen von unnötigem Ballast. Dabei liegt der Schwerpunkt beim Schaltverhalten und beim vorausschauenden Fahren.

Das technisch mögliche Einsparpotential von Nutzfahrzeugen hängt stark vom Fahrzeugtyp und Einsatzgebiet des Fahrzeuges ab. Um das breite Spektrum an Nutzfahrzeugen abzudecken, werden Simulationen mit vier verschiedenen Fahrzeugmodellen durchgeführt. Ein 18t Lastwagen, ein 40t Lastwagen, ein 40t Sattelschlepper und ein Linienbus.

Das Schaltverhalten wurde anhand bestehender Fahrzyklen für Stadt-, Überland-, Autobahn- und Bergfahrtzyklen untersucht.

Um den Einfluss des vorausschauenden Fahrens zu untersuchen, musste ein neuer Fahrzyklus definiert werden. Der Stadtteil des Neuen Europäischen Fahrzyklus wurde an eine vorausschauende Fahrweise angepasst. Anschliessend wurden die Ergebnisse auf Überland- und Autobahnzyklen übertragen.

Der Einfluss des richtigen Pneudruckes auf den Treibstoffverbrauch wurde mit dem Modell eines 18t Lastwagens untersucht. Ebenso der Mehrverbrauch an Treibstoff beim Mitführen von unnötigem Ballast.

Das höchste Einsparpotential für Lastwagen durch Eco-Drive Schaltverhalten und vorausschauendes Fahren resultiert in der Stadt. Es liegt zwischen 8.2 %, für beladene Fahrzeuge, und 21.1 %, für leere Fahrzeuge. Auf Überlandstrecken ist die Situation ähnlich, das Einsparpotential liegt zwischen 8.8 % und 15.2 %. Auf der Autobahn ist mit diesen Eco-Drive Massnahmen kein Einsparpotential zu verzeichnen. Für Bergfahrten wurde das Einsparpotential durch Eco-Drive Schaltverhalten zu 0.6 % bis 2.9 % ermittelt.

Für den Linienbus liegt das Einsparpotential mit den beiden Massnahmen zwischen 10 % auf Überlandstrecken und 18 % in der Stadt.

Für die Massnahmen für richtigen Pneudruck und entfernen von unnötigem Ballast beträgt das Einsparpotential 1.4 % bzw. 1 %.

Diese Ergebnisse können als oberes Limit des technisch möglichen Einsparpotentials angesehen werden.

Die Simulationsstudie hat gezeigt, dass ein technisches Einsparpotential für Verbrauch durch Eco-Drive Massnahmen vorhanden ist. Die Simulation hat auch gezeigt, dass das Einsparpotential sehr stark vom Einsatzgebiet des Fahrzeuges abhängt. Auf der Autobahn ist kein Einsparpotential vorhanden, wohingegen das Einsparpotential mit leerem Fahrzeug in der Stadt dem eines Personenwagens entspricht.

# Kapitel 1

## Einleitung

Mit der energieeffizienten Fahrweise Eco-Drive kann der Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen von Personen- und Kraftwagen gesenkt werden. Eco-Drive besteht im Wesentlichen daraus, dass Fahrer zügig beschleunigen, früh hoch- und spät herunterschalten, im höchstmöglichen Gang vorausschauend und gleichmässig fahren.

In der Schweiz wurde Eco-Drive massgeblich durch Energie2000 und Energie-Schweiz aufgebaut und gefördert. In dem vom Bundesamt für Energie unterstützten Verein Quality Alliance Eco-Drive (QAED) sind die Anbieter von Eco-Drive Kursen sowie weitere Organisationen und Verkehrsverbände zusammengeschlossen.

Das Bundesamt für Energie liess in einer Expertise (Varone [4]) die bisherigen Erfahrungen und die Wirkungsberechnung von Eco-Drive zusammenfassen und Vorschläge für notwendige Ergänzungen oder Änderungen formulieren. In dieser Expertise wurde eine möglichst rasche Durchführung von Evaluationen in zwei Bereichen empfohlen: Neulenker bzw. Fahrer schwerer Fahrzeuge. Die vorliegende Studie untersucht die Einflüsse des Eco-Drive für Berufsfahrer schwerer Fahrzeuge.

Die Expertise Varone schlägt vor, die Evaluation im Bereich der Berufsfahrer schwerer Fahrzeuge in zwei Schritten durchzuführen: Im ersten Schritt soll das technische Wirkungspotenzial von Eco-Drive bei schweren Fahrzeugen beziffert werden. Zweitens sollen durch mittel- und langfristige Datenreihen zum Treibstoffverbrauch die Lerneffekte und Umsetzung der Fahrweise in der Praxis genau evaluiert werden. Diese Studie deckt den ersten Teil ab.

### 1.1 Quasistatische Simulation

Das Verhalten eines Fahrzeuges kann in einfacher Weise wie folgt beschrieben werden:

Aus der Motordrehzahl und der Gaspedalstellung, ergibt sich das Motormoment. Das Motormoment und der Fahrtwiderstand wirken auf das Fahrzeug, es ergibt sich die Beschleunigung. Mit der Beschleunigung ändert sich die Geschwindigkeit des Fahrzeuges und damit Motorleistung und Fahrtwiderstand, was sich wieder auf die Beschleunigung auswirkt.

Eine solche Beschreibung respektiert die Kausalität der physikalischen Gesetze. Man spricht von einer 'vorwärts Beschreibung'. Das Fahrzeug kann auf diese Weise modelliert und simuliert werden. Dies ist jedoch aufwendig, da alle Dynamiken des Fahrzeuges simuliert werden müssen. Die Simulation wird viel einfacher, wenn von einer umgekehrten Fragestellung ausgegangen wird:

*Welche Leistung muss der Motor zu einem bestimmten Zeitpunkt erbringen, um einem vorgegebenem Geschwindigkeitsverlauf zu folgen?*

Von dieser Fragestellung geht die Quasistatische Simulation (QSS) aus.

Der Rechenaufwand wird geringer, weil die Geschwindigkeit des Fahrzeuges von vornherein bekannt ist. Dadurch können alle Widerstände a priori berechnet werden.

Es wird berechnet, wie viel Energie das Fahrzeug in jeder Sekunde braucht, um alle Widerstände zu überwinden und einem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil zu folgen. Aus der Geschwindigkeit und dem momentanen Gang ergibt sich die Motordrehzahl und das Motordrehmoment. Die Motordrehzahl und das Motordrehmoment bilden zusammen den Betriebspunkt des Motors. Im Verbrauchskennfeld des Motors ist der momentane Verbrauch für diesen Betriebspunkt hinterlegt.

Die QSS geht davon aus, dass sich der Betriebspunkt höchstens jede Sekunde ändert und dass keine höherfrequenten Effekte auftreten, d.h. von einer Sekunde zur nächsten ändert sich der Betriebspunkt so, dass der Motor diesen Wechsel nachvollziehen kann.

Um eine Quasistatische Simulation durchzuführen braucht es

- ein Geschwindigkeitsprofil respektive einen Fahrzyklus inklusive Steigung der Fahrbahn.
- die Fahrzeugdaten, insbesondere das Verbrauchskennfeld des Motors.
- eine Schaltstrategie, entweder durch den Fahrzyklus vorgegeben oder anderweitig definiert.

Der Fehler der Quasistatischen Simulation liegt zwischen 0 % und 3 %.

### 1.1.1 Fahrzyklen

Für Personenwagen gibt es normierte Fahrzyklen, anhand deren Verbrauch und Emissionswerte von Fahrzeugen bestimmt werden. In Europa wird der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) verwendet.

Für Lastwagen existieren keine normierten Fahrzyklen. Für Lastwagen typische Fahrzyklen müssen also anderweitig gefunden werden.

**Fahrzyklen für Untersuchungen, die keine Anpassung des Geschwindigkeitsprofils erfordern** Für die Simulation des Einflusses

- des Schaltverhaltens
- des Mitführens von unnötigem Ballast
- des richtigen Pneudruckes

auf den Treibstoffverbrauch wird nach bestehenden Geschwindigkeitsprofilen gesucht. Das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik an der Technischen Universität in Graz (TUG) ist auf dem Gebiet der Fahrzeugmodellierung für Nutzfahrzeuge tätig. Es hat Fahrzyklen für Nutzfahrzeuge entwickelt und diese für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung gestellt. Diese Fahrzyklen werden beim Projekt "Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs" (HBFA) verwendet, welches vom BAFU, dem Umweltbundesamt von Deutschland in Berlin und dem Umweltbundesamt von Österreich in Wien in Auftrag gegeben wurde. Das HBFA wird verwendet, um Hochrechnungen über Verbrauch und Emissionen in diesen drei Ländern zu betreiben.

Es wurde bestätigt, dass diese Zyklen verlässlich und die am besten Geeigneten für die Zwecke dieser Studie sind.

**Fahrzyklen für Untersuchungen, die eine Anpassung des Geschwindigkeitsprofils erfordern** Um den Einfluss des vorausschauenden Fahrens zu untersuchen, braucht man zwei verschiedene Geschwindigkeitsprofile. Eines, das eine Fahrt mit 'normaler' Fahrweise repräsentiert, und eines, das die Fahrt der gleichen Strecke mit 'vorausschauender' Fahrweise repräsentiert. Bis jetzt bestehen noch keine Geschwindigkeitsprofile, die eine vorausschauende Fahrweise widerspiegeln. Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten das vorausschauende Fahren zu modellieren. Erstere besteht darin, mehrere Fahrten von Eco-Drive-Fahrten aufzuzeichnen und daraus Fahrzyklen zu generieren. Dies ist sehr aufwendig und sprengt den Rahmen dieser Studie. Zweitens gibt es die Möglichkeit, bestehende Fahrzyklen so anzupassen, dass sie der vorausschauenden Fahrweise entsprechen. Für diese Studie wird die zweite Möglichkeit gewählt. Wie diese Anpassungen im Detail vorgenommen werden, wird in Abschnitt 3.2 genauer beschrieben.

### 1.1.2 Fahrzeuge

Es werden vier verschiedene Fahrzeuge simuliert.

- Ein Lastwagen mit 18t zulässigem Gesamtgewicht
- Ein Lastwagen mit 40t zulässigem Gesamtgewicht
- ein Sattelschlepper mit 40t zulässigem Gesamtgewicht
- ein Bus mit 50 Sitzplätzen

Die Daten der Fahrzeuge sind im Anhang A angeführt.

#### Verbrauchskennfelder

Das Kernstück der Quasistatischen Simulation ist das Verbrauchskennfeld des Fahrzeuges. Es gibt an, wie viel Treibstoff ein Fahrzeug in einem gewissen Betriebspunkt verbraucht. Aus einem Verbrauchskennfeld kann viel Information über die Auslegung und Dimensionierung eines Motors herausgelesen werden. Aus diesem Grund ist die Industrie oft nicht bereit, Informationen über Verbrauchskennfelder herauszugeben. In dieser Studie werden normierte Verbrauchskennfelder verwendet, welche uns von der TUG zur Verfügung gestellt wurden. Weitere Informationen über die normierten Kennfelder können dem folgenden Bericht entnommen werden: 'Energy and Fuel Consumption from Heavy Duty Vehicles - COST 346 - Final Report'. Von P.J. Sturm und S. Hausberger [1].

**normierte Kennfelder** Die Kennfelder sind bezüglich Leistung  $P$  und Drehzahl  $n$  normiert. Die Normierung bezüglich der Leistung erfolgt indem die normierte Leistung als prozentualer Anteil der Nennleistung angegeben wird. Eine normierte Leistung  $P_{norm}$  von 1 entspricht der Nennleistung des Motors.

$$P_{norm} = \frac{P}{P_{nenn}}$$

Normierung bezüglich der Drehzahl bewirkt, dass eine normierte Drehzahl  $n_{norm}$  von 1 der Nenndrehzahl  $n_{nenn}$  entspricht, und eine normierte Drehzahl von 0 der Leerlaufdrehzahl  $n_{leerlauf}$  entspricht.

$$n_{norm} = \frac{n - n_{leerlauf}}{n_{nenn} - n_{leerlauf}}$$

Die normierten Kennfelder wurden für die jeweiligen Fahrzeuge aufskaliert.

**Verifikation der normierten Kennfelder** Das normierte Verbrauchskennfeld wird für einen Motor aufskaliert, der am Institut für Mess- und Regeltechnik vermessen wurde. In Abbildung 1.1 ist Verbrauch und Drehmoment für unterschiedliche Drehzahlen des Motors OM 906 LA (blau) und des aufskalierten Kennfeldes (schwarz) abgebildet. Es besteht eine gute Übereinstimmung.

## 1.2 Eco-Drive Massnahmen

Als Eco-Drive Massnahmen werden das Schaltverhalten, vorausschauendes Fahren, entfernen von unnötigem Ballast und Fahren mit richtigem Pneudruck untersucht. Der Schwerpunkt liegt beim Schaltverhalten und beim vorausschauenden Fahren. In einem ersten Schritt werden alle Massnahmen einzeln untersucht. Im Kapitel 3.3

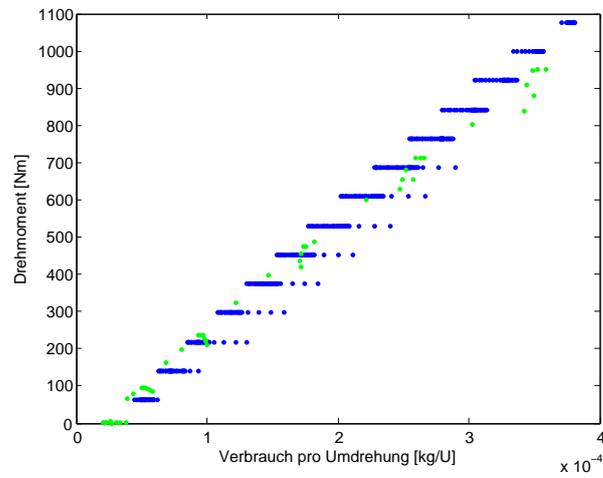


Abbildung 1.1: Verbrauch und Drehmoment für unterschiedliche Drehzahlen des Motors OM 906 LA. blau: durch das IMRT vermessen, schwarz: vom normierten Kennfeld aufskaliert

wird dann auf die Kombination von Schaltverhalten und vorausschauendem Fahren eingegangen.

Ebenfalls werden Sensibilitätsanalysen bezüglich der Beladung, der Spezifischen Leistung des Fahrzeuges (Leistung des Fahrzeuges pro Masse des Fahrzeuges) und des Widerstandbeiwertes durchgeführt.

## Kapitel 2

# Validation

Die EMPA hat 2004 mit einem Sattelschlepper eine Testfahrt über den Gotthard durchgeführt. Sie stellte die gemessenen Daten für eine Validierung der QSS Methodik zur Verfügung. Die Validierung zeigt eine hohe Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den simulierten Daten. Treibstoffverbrauch Messungen: 45.9 l/100km, Treibstoffverbrauch Simulation: 45.8 l/100km.

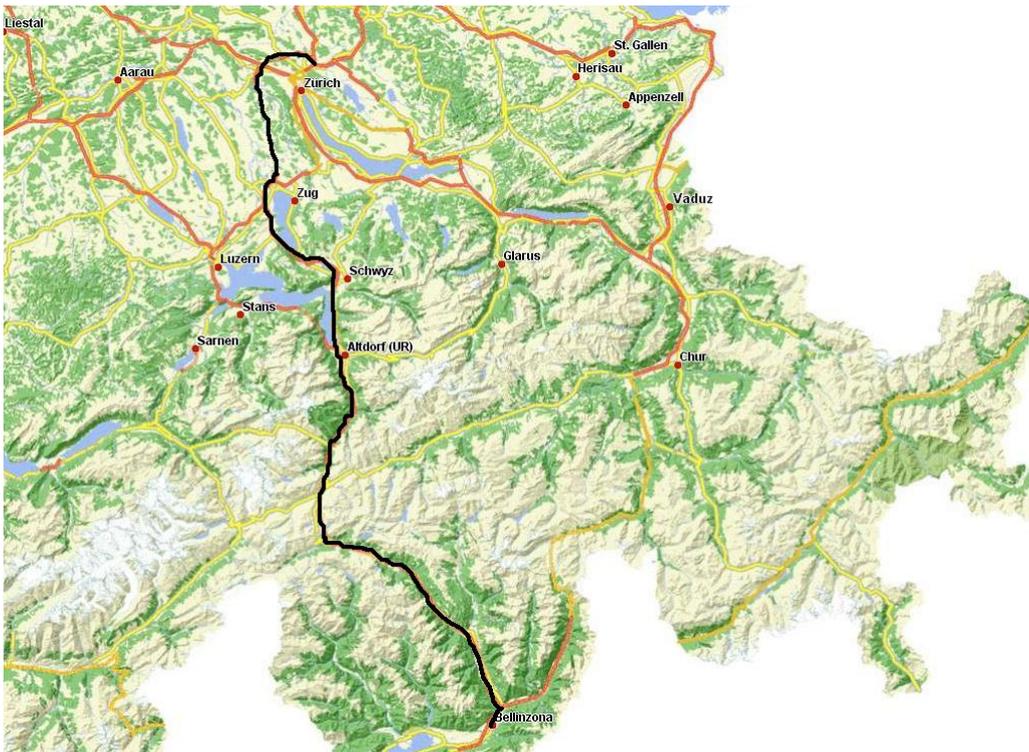


Abbildung 2.1: Testfahrtroute über den Gotthard

# Kapitel 3

## Durchgeführte Simulationen und Resultate

### 3.1 Schaltverhalten

#### 3.1.1 Schaltstrategien

Es werden zwei Schaltstrategien beschrieben. Eine, die das Schaltverhalten des herkömmlichen, 'normalen' Fahrers repräsentiert und eine, die das Schaltverhalten nach Eco-Drive repräsentiert.

#### **Generelle Regeln - gültig für beide Schaltstrategien**

1. Sobald das maximale Drehmoment des Motors erreicht ist, wird herunter geschaltet.
2. Falls die benötigte Leistung vom Motor in keinem Gang erbracht werden kann, wird die Fahrzeuggeschwindigkeit angepasst.
3. Sobald das Fahrzeug nicht mehr dem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil folgt, wird der Gang eingelegt, mit dem das Fahrzeug die höchste Leistung erbringt.
4. Der Gang wird höchstens alle zwei Sekunden gewechselt. Ausser wenn Punkt 1 einen Gangwechsel erzwingt.

#### **Fahrerspezifische Regeln**

**EcoDrive Schaltstrategie** Die Schaltstrategie für Eco-Drive wurde aus der Broschüre 'Geben Sie richtig Gas' der Eco-Drive Quality Alliance entnommen.

- Es wird hinauf geschaltet sobald die momentane Motordrehzahl über einem bestimmten Wert  $n_{up} \approx 1500U/min$  liegt.
- es wird hinunter geschaltet sobald die momentane Motordrehzahl unter einem bestimmten Wert  $n_{down} \approx 900U/min$  liegt.
- Beim Schalten werden, wo möglich, Gänge übersprungen.
- Beim Dahinrollen wird der höchstmögliche Gang eingelegt.

### 'Normale' Schaltstrategie

- Es wird hinauf geschaltet sobald die momentane Motordrehzahl über einem bestimmten Wert  $n_{up}$  liegt.
- es wird hinunter geschaltet sobald die momentane Motordrehzahl unter einem bestimmten Wert  $n_{down}$  liegt.
- $n_{down}$  wird so gewählt, dass darüber das Gebiet mit dem grössten Drehmoment liegt.  $n_{up}$  wird im Bereich der maximalen Leistung gewählt, in dem das Drehmoment immer noch gross ist.

In Abbildung 3.1 ist die simulierte Motordrehzahl eines leeren 18t Lastwagens dargestellt. Die Simulation wurde mit dem Stadtzyklus durchgeführt. Schaltpunkte für die normale Schaltstrategie sind mit zwei roten Linien eingezeichnet, diejenigen für die Eco-Drive Schaltstrategie sind in grün eingezeichnet.

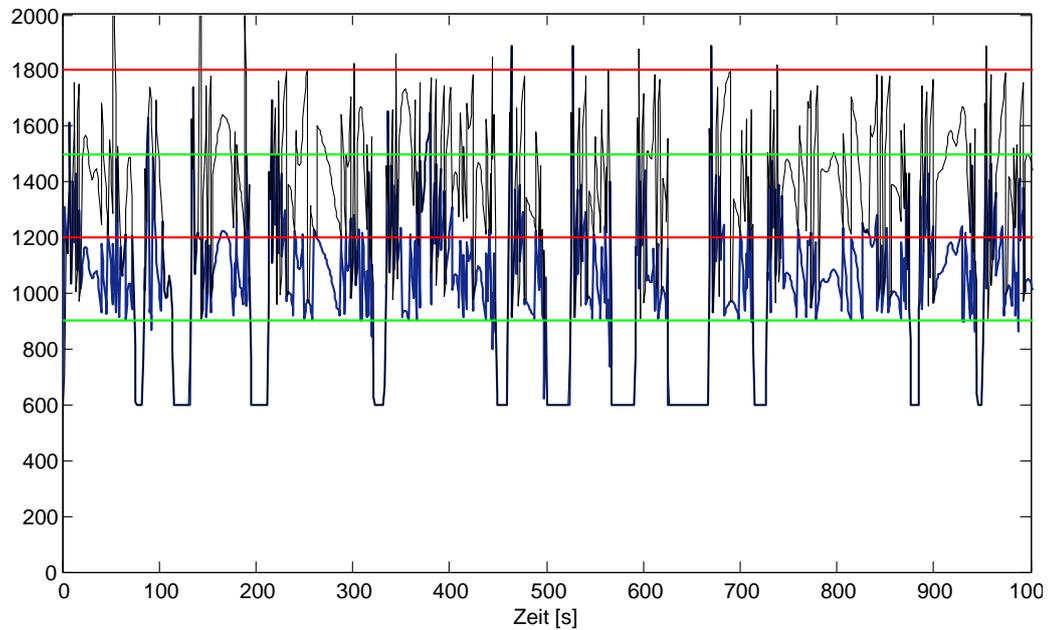


Abbildung 3.1: Simulierte Motordrehzahl des leeren 18t Lastwagens, Stadtzyklus normale Schaltstrategie (schwarz) und Eco-Drive Schaltstrategie (blau)

### 3.1.2 Zyklen

Die verwendeten Fahrzyklen sollten die Extrema des möglichen Einsatzgebietes der Fahrzeuge abstecken. Dies stellt sicher, dass das durchschnittliche Einsparpotential zwischen den simulierten Eckwerten liegt.

Das Schaltverhalten für die drei Lastwagen wird auf Stadtzyklen, Bergfahrtzyklen, Überlandzyklen und einem Autobahnzyklus simuliert. Für Stadt-, Überland- und Bergfahrten gibt es unterschiedliche Zyklen für beladene und leere Fahrzeuge. Für den Autobahnzyklus wird ein Zyklus für beladene und leere Fahrzeuge verwendet.

Für den Bus werden drei Zyklen verwendet: ein Stadtzyklus mit vielen Stopps, ein Überlandzyklus von Stadt zu Stadt und der gleiche Autobahnzyklus wie bei Lastwagen.

In Abbildung 3.2 bis 3.4 sind drei Fahrzyklen abgebildet.

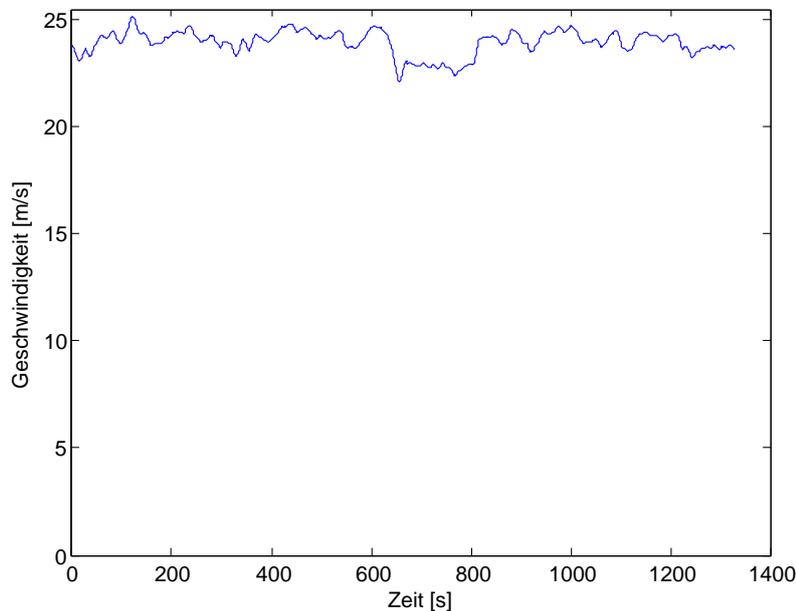


Abbildung 3.2: Geschwindigkeitsprofil Autobahnzyklus für Lastwagen

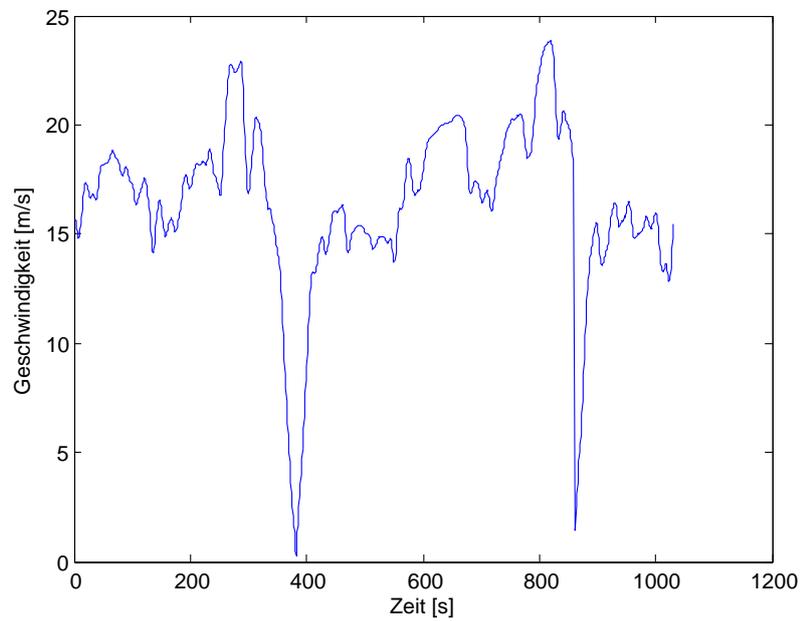


Abbildung 3.3: Geschwindigkeitsprofil Überlandzyklus für leere Lastwagen

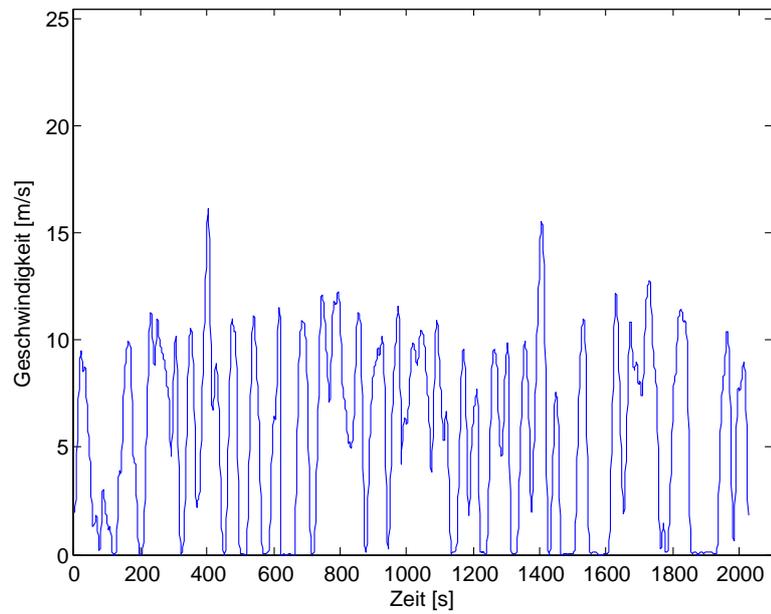


Abbildung 3.4: Geschwindigkeitsprofil Stadtzyklus für leere Lastwagen

### 3.1.3 Resultate Schaltverhalten

Die Tabellen 3.1 und 3.2 enthalten die Resultate der Simulationsstudie für das Schaltverhalten.

Fahrzeuge	Autobahn leer	Autobahn beladen	Überland leer	Überland beladen	Stadt leer	Stadt beladen	Bergfahrt leer	Bergfahrt Beladen
Lastwagen 18 t	0 %	0 %	7.7 %	7.8 %	10.8 %	(13.5 %)	2.7 %	0.8 %
Lastwagen 40 t	0 %	0 %	9.1 %	5.7 %	9.1 %	6.0 %	2.9 %	0.6 %
Sattelschlepper	0 %	0 %	8.6 %	5.8 %	7.4 %	6.0 %	2.7 %	1.0 %

Tabelle 3.1: Treibstoffeinsparungen infolge des Eco-Drive Schaltverhaltens bei den Lastwagen

	Autobahn leer	Autobahn beladen	Überland leer	Überland beladen	Stadtfahrt leer	Stadtfahrt beladen
Bus	0 %	0 %	7.2 %	6.0 %	17.7 %	16.6 %

Tabelle 3.2: Treibstoffeinsparung infolge des Eco-Drive Schaltverhaltens beim Bus

**Illustration der Resultate** Zur Illustration der Resultate, sind am Ende des Kapitels die Kennfelder der Fahrzeuge abgebildet. Die Kennfelder zeigen die Isowirkungsgrad-Linien des Motors. Rot bedeutet, einen guten Wirkungsgrad und blau einen Schlechten. Weiter sind alle Betriebspunkte der jeweiligen Simulation eingezeichnet. Die Betriebspunkte, die sich aus der 'normalen' Schaltstrategie ergeben sind mit blauen Kreuzen eingezeichnet, diejenigen der Eco-Drive Schaltstrategie mit schwarzen x-en.

Die magentafarbene Linie entspricht der Vollastlinie des Motors. Das Kennfeld entstand durch Hochskalierung eines normierten Kennfeldes, deshalb ist das Kennfeld zum Teil auch jenseits der Vollastlinie definiert.

Im Folgenden werden die Resultate für die einzelnen Fahrzeuge genauer betrachtet.

## Lastwagen 18t

	Verbrauch Eco-Drive Schaltstrategie [l/100km]	Verbrauch 'normale' Schaltstrategie [l/100km]	Einsparung [%]
Autobahn mit leerem Fahrzeug	21.4	21.4	0
Überland mit leerem Fahrzeug	17.8	19.3	7.8
Stadt mit leerem Fahrzeug	25.4	28.5	10.8
Berg mit 4 % Steigung, mit leerem Fahrzeug	41.6	42.8	2.7
Autobahn mit beladenem Fahrzeug	29.2	29.2	0
Überland mit beladenem Fahrzeug	25.2	28.0	7.7
Stadt mit beladenem Fahrzeug	39.9	46.1	13.5
Berg mit 4 % Steigung, mit beladenem Fahrzeug	78.6	79.2	0.8

Tabelle 3.3: Einfluss des Schaltverhaltens auf den Treibstoffverbrauch des 18t Lastwagens

**Autobahn mit leerem Fahrzeug** Der Zyklus wurde mit beiden Schaltstrategien ausschliesslich im achten Gang gefahren. Deshalb ist hier keine Einsparung zu verzeichnen. In Abbildung 3.9a ist ersichtlich, dass die Betriebspunkte in beiden Fällen übereinander liegen.

**Stadt mit leerem Fahrzeug** In Abbildung 3.9c sind die Betriebspunkte für beide Schaltstrategien in das Verbrauchskennfeld des Fahrzeuges eingetragen. Die Verbrauchseinsparung von 10.8 % ist höher als erwartet. Um die Situation genauer zu analysieren wird der Verbrauch von je einem typischen Betriebspunkt nachgerechnet.

Als Beispiel für den Betrieb mit der 'normalen' Schaltstrategie wird der Betriebspunkt  $P1 = (160\text{rad/s} / 200\text{Nm}) = (1527.8\text{U/min} / 200\text{Nm})$  betrachtet. Dieser ist in Abbildung 3.9c rot eingezeichnet. Das Übersetzungsverhältnis zwischen zwei benachbarten Gängen liegt etwa bei 1.4. Der zweite Betriebspunkt wird so gewählt, dass er mit einer 1.4 mal tieferen Drehzahl die gleiche Leistung wie der erste erbringt. Der Punkt  $P2 = (114.28\text{rad/s} / 280\text{Nm}) = (1091.2\text{U/min} / 280\text{Nm})$  ist grün eingezeichnet. Der Verbrauch im Betriebspunkt P1 beträgt  $V_{P1} = 2.215 \text{ [g/s]}$ . Der Verbrauch im Betriebspunkt P2 beträgt  $V_{P2} = 1.993 \text{ [g/s]}$ . Wird der Verbrauch der beiden Punkte verglichen ergibt sich eine Einsparung von 10.03 %.

**Autobahn mit beladenem Fahrzeug** Der Fahrzyklus wurde ausschliesslich im achten Gang abgefahren. Die Einsparung beträgt 0 %.

**Stadt mit beladenem Fahrzeug** Überraschend hierbei ist, dass die Verbrauchseinsparung mit beladenem Wagen grösser ist als mit leerem. Es handelt sich hierbei um ein Artefakt, Die Erklärung folgt später in Abschnitt 3.1.4 im Teil über Beladung.

**Bergfahrt mit 4 % Steigung, beladen** Das Fahrzeug wird nahe am Limit betrieben. In diesem Bereich lässt die beschränkte Leistung des Motors keine Freiheit in der Gangwahl zu. Die Einsparung beträgt 0.8 %

### Lastwagen 40t

	Verbrauch Eco-Drive Schaltstrategie [l/100km]	Verbrauch 'normale' Schaltstrategie [l/100km]	Einsparung [%]
Autobahn normal, mit leerem Fahrzeug	25.9	25.9	0
Überland mit leerem Fahrzeug	23.9	26.3	9.1
Stadt mit leerem Fahrzeug	38.1	42.0	9.1
Bergfahrt mit 4% Steigung mit leerem Fahrzeug	66.5	68.5	2.9
Autobahn mit beladenem Fahrzeug	37.8	37.8	0
Überland mit beladenem Fahrzeug	40.6	43.1	5.7
Stadt mit beladenem Fahrzeug	70.2	74.8	6.0
Bergfahrt mit 4% Steigung mit beladenem Fahrzeug	151.7	152.8	0.6

Tabelle 3.4: Einfluss des Schaltverhaltens auf den Treibstoffverbrauch des 40t Lastwagens

Im Vergleich zum 18t Lastwagen sind die Verbrauchseinsparungen beim 40t Lastwagen viel kleiner. Ein Grund dafür ist, dass der 40t Lastwagen im Vergleich zum 18t Lastwagen einen schwächeren Motor hat. Dies hat zwei Effekte: Einerseits ist die freie Gangwahl stärker eingeschränkt und das Limit des Motors schneller erreicht. Das führt dazu, dass der Motor in einem Bereich hoher Leistung gefahren werden muss. Andererseits wird der Motor öfter in einem Betriebspunkt betrieben, in dem die Linien für einen konstanten Wirkungsgrad weiter auseinander liegen. Das führt dazu, dass eine Änderung im Betriebspunkt entlang einer Leistungskonstante nur eine kleine Änderung im Verbrauch zur Folge hat.

**Autobahn mit beladenem Fahrzeug** Mit der Eco-Drive Schaltstrategie wurde der ganze Zyklus im sechzehnten Gang zurückgelegt. Mit der Schaltstrategie normal wurde ein Teil der Strecke im fünfzehnten Gang zurückgelegt. Die Einsparung beträgt 0.02 %

**Bergfahrt mit 4% Steigung, beladen** Es konnte dem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil nicht gefolgt werden, deshalb wurde das Geschwindigkeitsprofil um 4 m/s verschoben. Die Einsparung beträgt 0.6 %.

## Sattelschlepper

	Verbrauch Eco-Drive Schaltstrategie [l/100km]	Verbrauch 'normale' Schaltstrategie [l/100km]	Einsparung [%]
Autobahn mit leerem Fahrzeug	24.6	24.6	0
Überland mit leerem Fahrzeug	24.0	26.3	8.6
Stadt mit leerem Fahrzeug	40.5	43.8	7.4
Bergfahrt mit 4 % Steigung mit leerem Fahrzeug	66.3	68.2	2.7
Autobahn mit beladenem Fahrzeug	35.8	35.8	0
Überland mit beladenem Fahrzeug	40.7	43.2	5.8
Stadt mit beladenem Fahrzeug	73.1	77.8	6.0
Bergfahrt mit 4 % Steigung mit beladenem Fahrzeug	150.1	151.7	1.0

Tabelle 3.5: Einfluss des Schaltverhaltens auf den Treibstoffverbrauch des Sattelschleppers

**Bergfahrt mit 4 % Steigung, beladen** Da das Fahrzeug dem vorgegebenen Zyklus nicht folgen konnte, wurde die Geschwindigkeit des Zyklus um 4 m/s nach unten korrigiert.

**Bus**

	Verbrauch Eco-Drive Schaltstrategie [l/100km]	Verbrauch 'normale' Schaltstrategie [l/100km]	Einsparung [%]
Stadzyklus, viele Stationen mit leerem Fahrzeug	30.4	36.9	17.7
Autobahn mit leerem Fahrzeug	20.8	20.8	0
Überland, von Stadt zu Stadt mit leerem Fahrzeug	20.6	22.2	7.2
Stadzyklus, viele Stationen mit beladenem Fahrzeug	37.3	44.7	16.6
Autobahn mit beladenem Fahrzeug	22.7	22.7	0
Überland, von Stadt zu Stadt mit beladenem Fahrzeug	25.0	26.7	6.0

Tabelle 3.6: Einfluss des Schaltverhaltens auf den Treibstoffverbrauch des Busses

### 3.1.4 Sensibilitätsanalysen

Alle Sensibilitätsanalysen werden mit dem 18t Lastwagen durchgeführt.

#### Unterer Schaltpunkt

In dieser Sensibilitätsanalyse wird untersucht, wie sich das Einsparpotential ändert, wenn man die 'normale' Schaltstrategie (wie oben beschrieben definiert) ändert. In der Simulationsstudie wird nun der untere Schaltpunkt ( $n_{down}$ ) über einen Bereich von 800 [U/min] bis 1600 [U/min] variiert. Der Abstand zwischen dem oberen und dem unteren Schaltpunkt wird nicht verändert er beträgt 600 [U/min]. Der untere Schaltpunkt für die Eco-Drive Schaltstrategie ist bei  $n_{down} = 900$  [U/min]. In Abbildung 3.5a ist die Verbrauchseinsparung über dem unteren Schaltpunkt aufgetragen. Zu Beachten ist, dass auch wenn der untere Schaltpunkt der 'normalen' Schaltstrategie tiefer liegt als derjenige der Eco-Drive Schaltstrategie, so ist durch die Eco-Drive Schaltstrategie eine Verbrauchseinsparung zu erreichen.

Die Analyse zeigt, dass die Verbrauchseinsparung stark von der Definition des Schaltverhaltens des 'normalen' Fahrers abhängt.

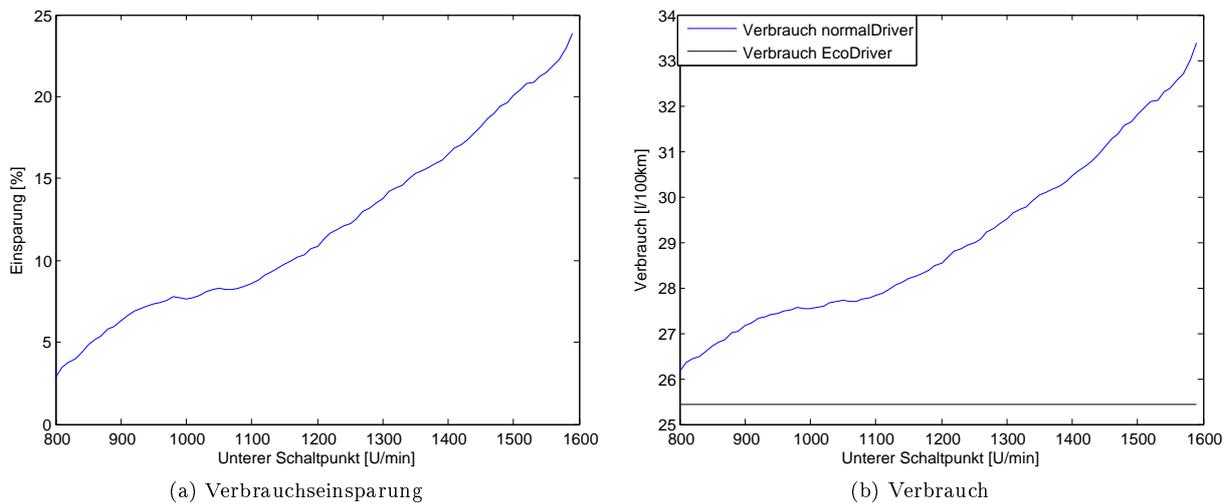


Abbildung 3.5: Sensibilitätsanalyse bezüglich des normalen Schaltverhaltens

#### Beladung

Diese Sensibilitätsanalyse untersucht den Einfluss der Beladung eines Fahrzeuges auf das Einsparpotential des Eco-Drive Schaltverhaltens. Die Beladung des Fahrzeuges wird zwischen leer (0t) und voll beladen (10t) variiert.

Für diese Untersuchung werden die Stadtzyklen verwendet, weil bei diesen die Verbrauchseinsparung infolge des Eco-Drive Schaltverhaltens gross ist. Die Beladung variiert sehr stark, deshalb wird ein Zyklus für ein beladenes und einer für ein leeres Fahrzeug für die Untersuchung verwendet.

In Abbildung 3.6a ist die Analyse dargestellt, die Anhand des Zyklus für ein leeres Fahrzeug erstellt wurde. Ab einer Beladung von 8500 kg konnte mit dem Fahrzeug nicht mehr dem Geschwindigkeitsprofil gefolgt werden.

Abbildung 3.6b zeigt die Ergebnisse wie sie mit dem Fahrzyklus für ein beladenes Fahrzeug zustande kommen. Zu beachten ist, dass mit dem Zyklus für ein beladenes Fahrzeug viel grössere Verbrauchseinsparungen möglich sind. Dies lässt sich

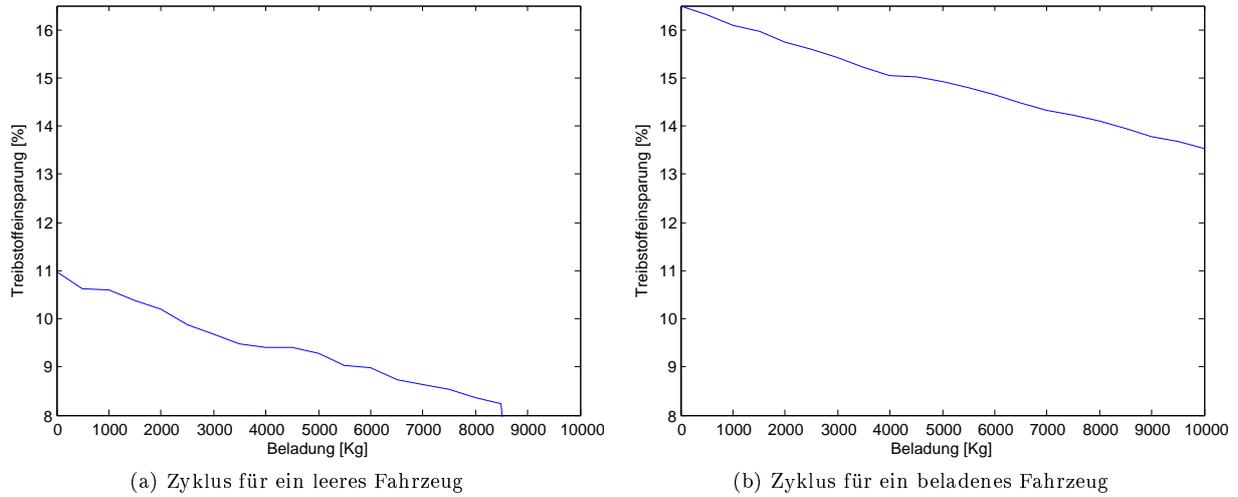


Abbildung 3.6: Sensibilitätsanalyse bezüglich der Beladung des Fahrzeuges

dadurch erklären, dass das Geschwindigkeitsprofil in diesem Zyklus für ein Fahrzeug entwickelt wurde, dass eine viel kleinere spezifische Leistung hat (z.B. den 40t Lastwagen). Der hier verwendete 18t Lastwagen würde zügiger durch eine Stadt fahren. Auf dieses Phänomen wird genauer eingegangen. Werden Abbildung 3.12c (Stadtzyklus beladener 40t Lastwagen) und 3.10c (Stadtzyklus beladener 18t Lastwagen) miteinander verglichen, so fällt auf, dass der 18t Lastwagen im Teillastbereich betrieben wird, wohingegen der 40t Lastwagen viel besser ausgelastet ist. Eine solche Auslastung entspricht eher den Bedingungen eines beladenen Lastwagens in einer Stadt.

Die Erkenntnis, dass der Stadtzyklus für ein beladenes Fahrzeug nicht für einen Lastwagen wie der verwendete 18t Lastwagen ausgelegt ist erklärt das auffallend hohe Ergebnis für die Verbrauchseinsparung des beladenen 18t Lastwagens in der Stadt. Das Ergebnis des beladenen 18t Lastwagens in der Stadt ist demnach als Artefakt zu betrachten.

Die Sensibilitätsanalyse zeigt eindeutig, dass die mögliche Treibstoffeinsparung durch ein Eco-Drive Schaltverhalten mit zunehmender Beladung abnimmt.

### Spezifische Leistung

Die spezifische Leistung des Fahrzeuges sei definiert als die Nennleistung geteilt durch das Gesamtgewicht:  $P_{spez} = P_{nenn}/m_{ges}$ .

Ein PW mit 1500 [kg] und einer Leistung von 120 [kW] hat eine spezifische Leistung von 80 [W/kg].

Im Fall des 18t Lastwagens (voll beladen) beträgt die spezifische Leistung  $P_{spez} = 11.44$  [W/kg]. Beim 40t Lastwagen (voll beladen) sind es  $P_{spez} = 7.35$  [W/kg]. Dies macht deutlich, dass der 40t Lastwagen bezogen auf sein Gesamtgewicht einen deutlich kleineren Motor hat, als der 18t Lastwagen. In dieser Sensibilitätsanalyse wird die Leistung des 18t Lastwagens variiert. Das Gesamtgewicht des Lastwagens wird konstant gehalten. So wird die spezifische Leistung des Fahrzeuges zwischen 5 [W/kg] und 20 [W/kg] variiert. In Abbildung 3.7 ist das Ergebnis dargestellt.

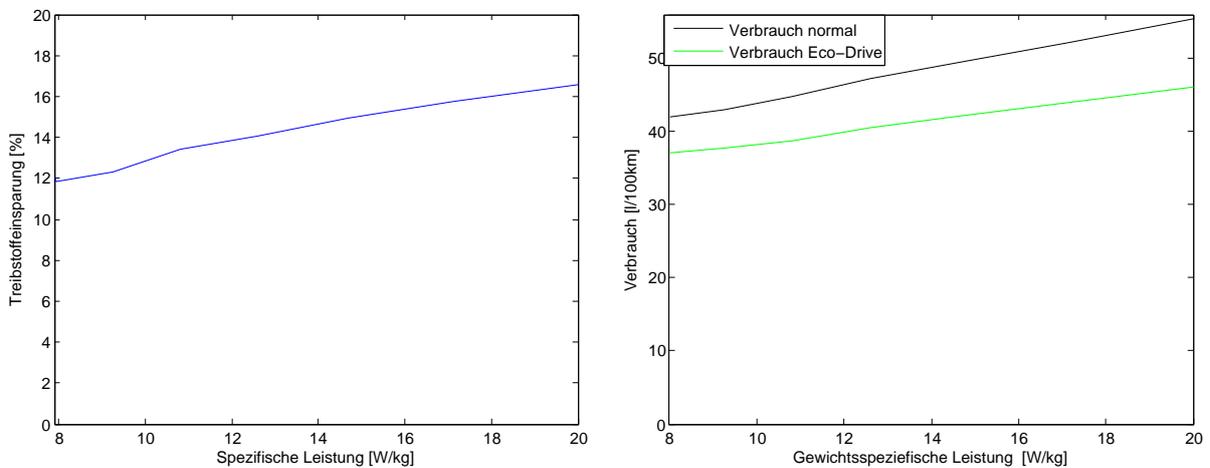


Abbildung 3.7: Sensibilitätsanalyse bezüglich der spezifischen Leistung des 18t Lastwagens

Das Fahrzeug kann erst ab einer spezifischen Leistung von 7.9 [W/kg] dem Geschwindigkeitsprofil des Zyklus folgen. Je grösser die spezifische Leistung des Fahrzeuges ist, desto grösser ist auch das Einsparpotential durch ein Eco-Drive Schaltverhalten.

### Luftwiderstandsbeiwert

Der Luftwiderstandsbeiwert des Lastwagens (leer) wurde zwischen 0.4 und 1 variiert. Der Luftwiderstandsbeiwert hat vernachlässigbaren Einfluss auf das Einsparpotential.

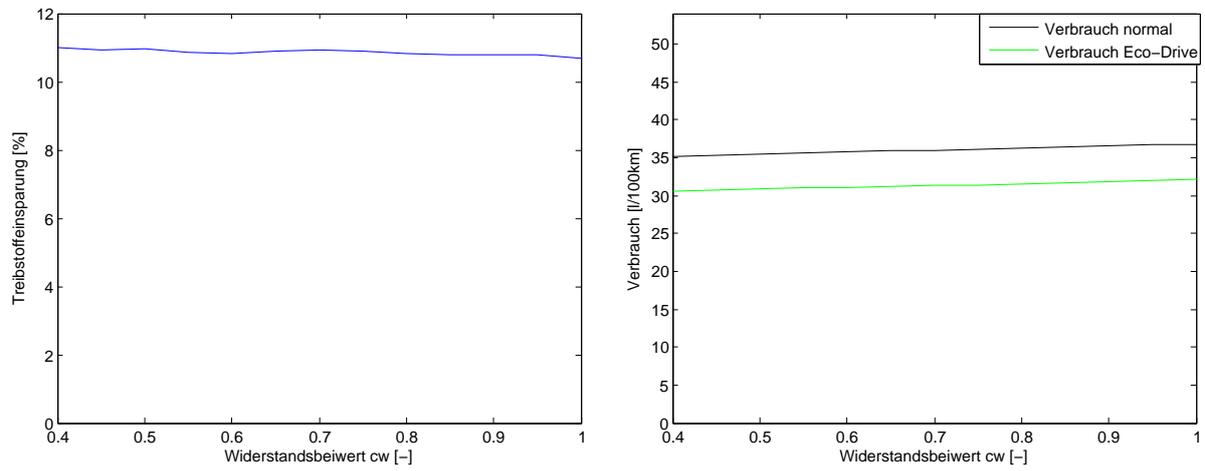
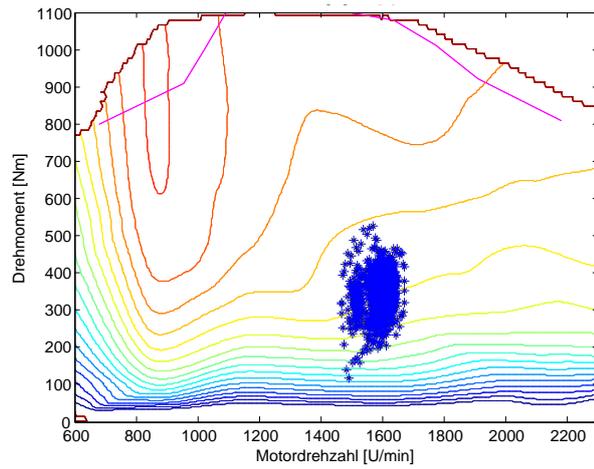
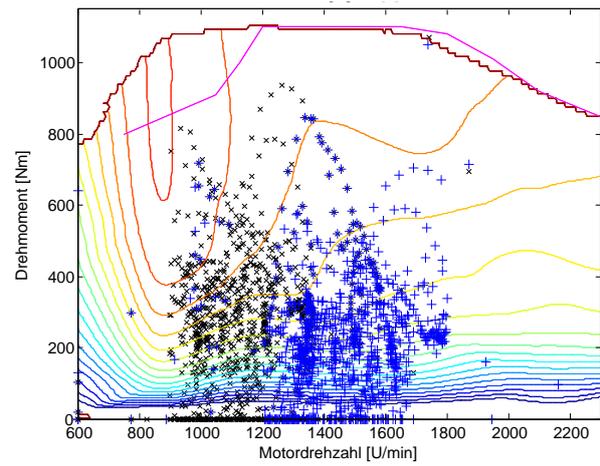


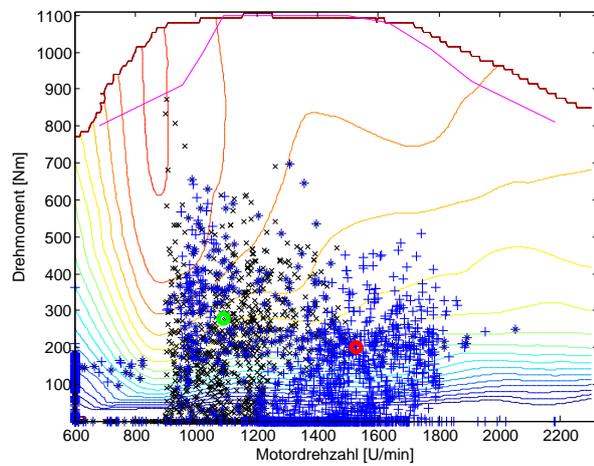
Abbildung 3.8: Sensibilitätsanalyse bezüglich des Luftwiderstandsbeiwertes des 18t Lastwagens



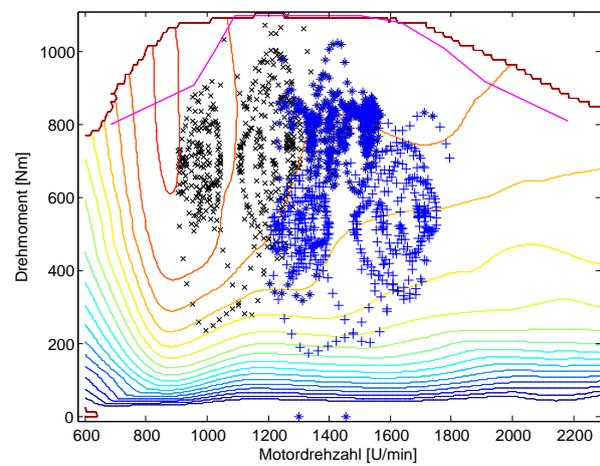
(a) Autobahnzyklus mit leerem Fahrzeug.



(b) Überlandzyklus mit leerem Fahrzeug.

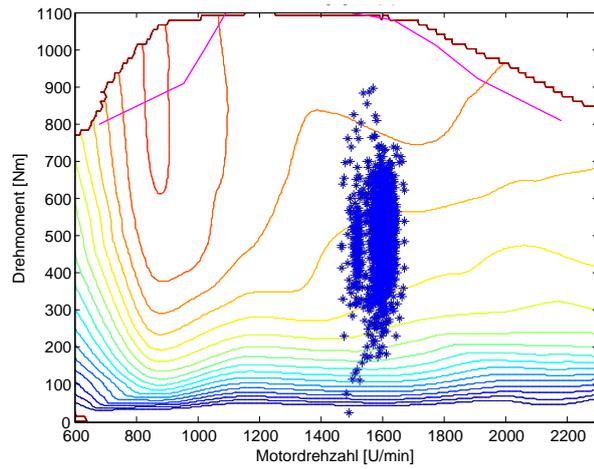


(c) Stadtzyklus mit leerem Fahrzeug.

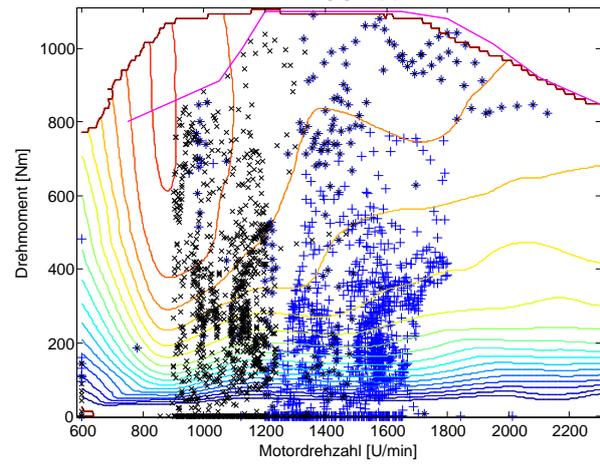


(d) Bergfahrt Zyklus mit leerem Fahrzeug.

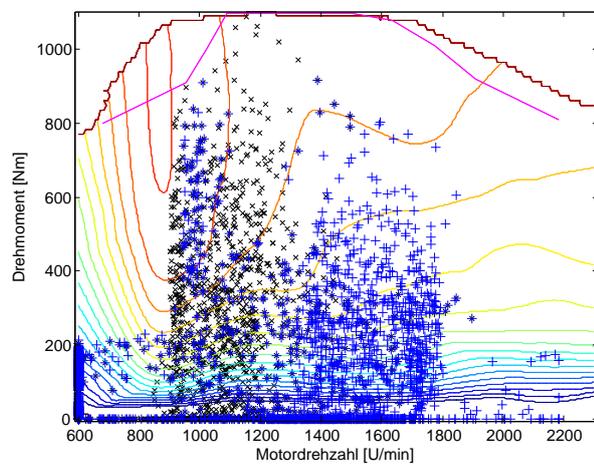
Abbildung 3.9: Verbrauchskennfeld des 18t Euro 3 Lastwagens. schwarze x: Eco-Drive Schaltstrategie, blaue +: Schaltstrategie 'normal'.



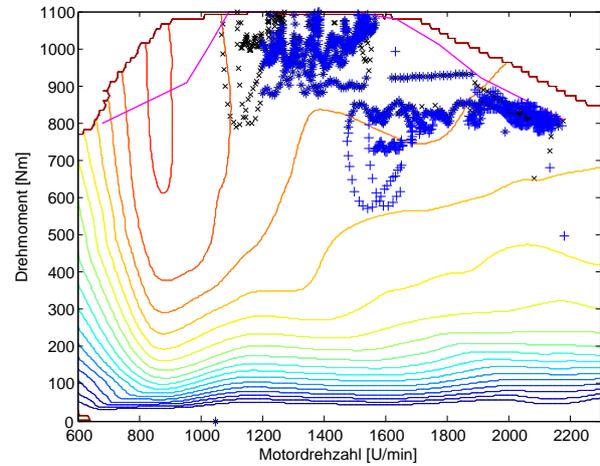
(a) Autobahnzyklus mit beladenem Fahrzeug.



(b) Überlandzyklus mit beladenem Fahrzeug.



(c) Stadtzyklus mit beladenem Fahrzeug.



(d) Bergfahrt Zyklus mit beladenem Fahrzeug.

Abbildung 3.10: Verbrauchskennfeld des 18t Euro 3 Lastwagens. schwarze x: Eco-Drive Schaltstrategie, blaue +: Schaltstrategie 'normal'.

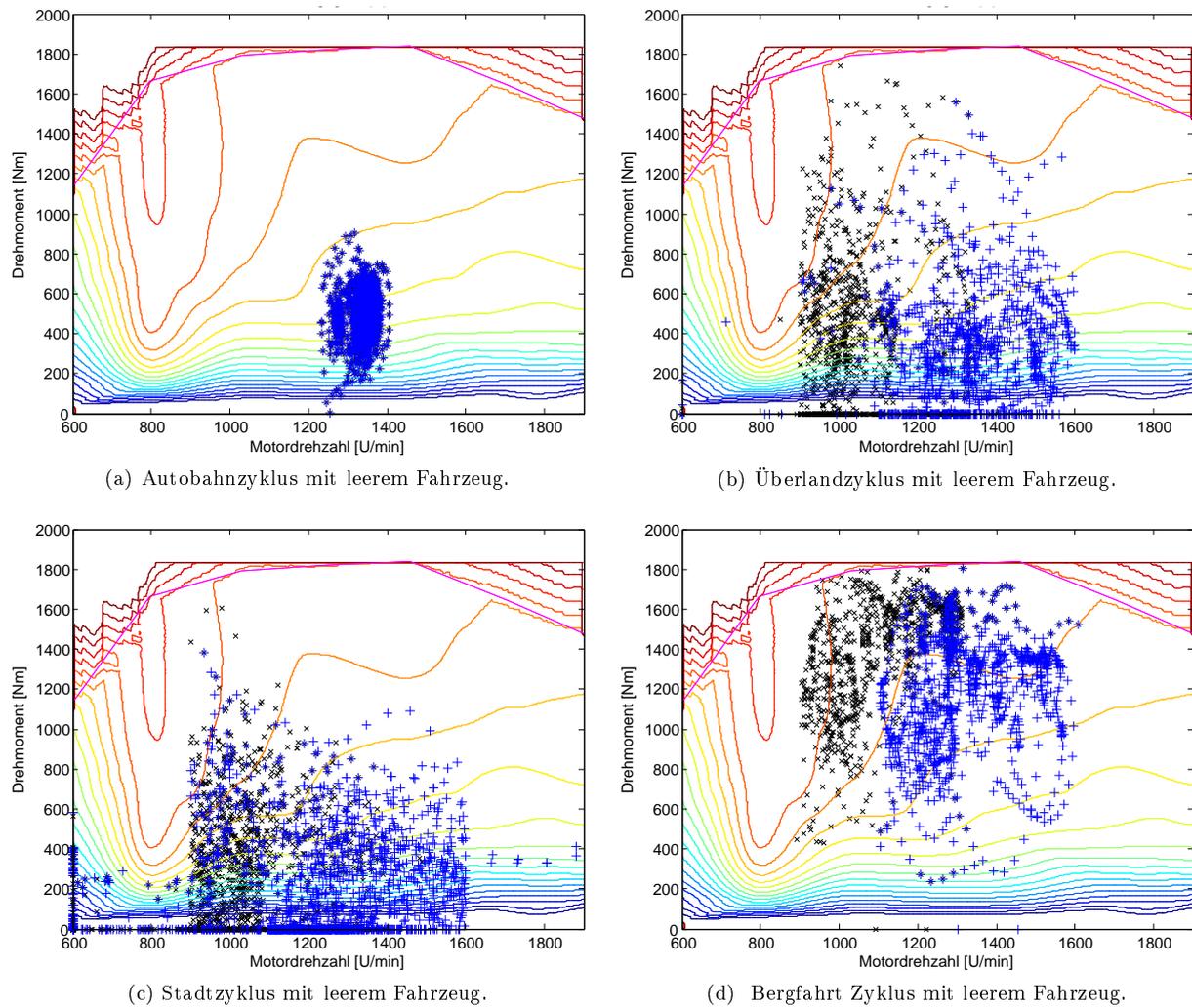
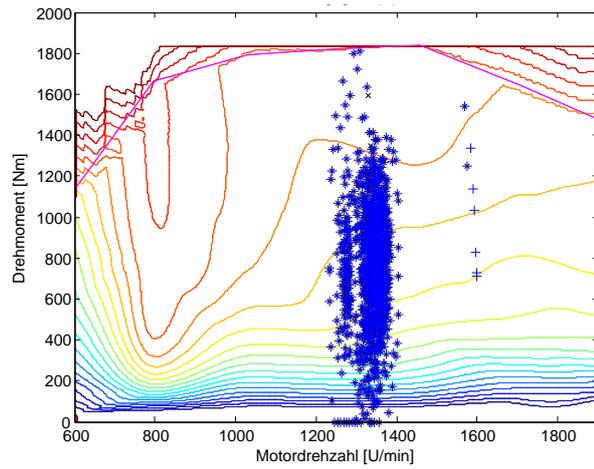
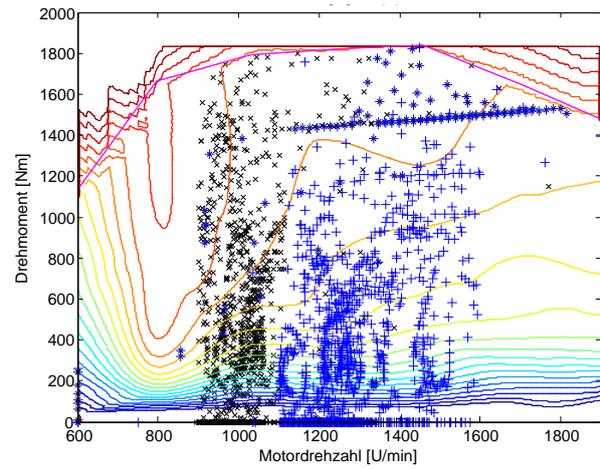


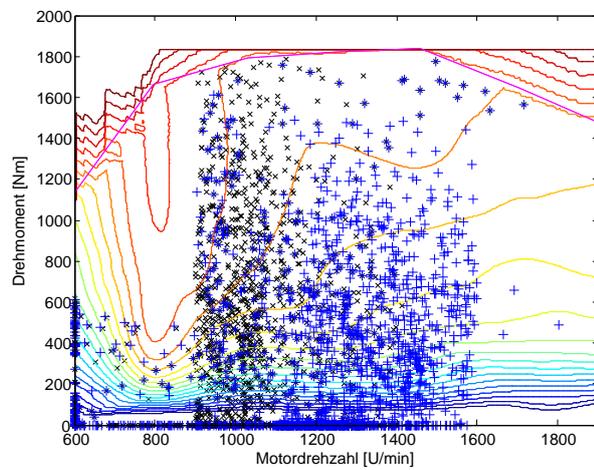
Abbildung 3.11: Verbrauchskennfeld des 40t Euro 3 Lastwagens. schwarze x: Eco-Drive Schaltstrategie, blaue +: Schaltstrategie 'normal'.



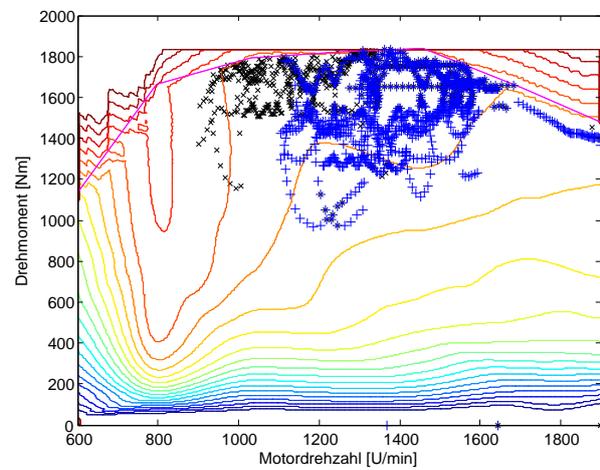
(a) Autobahnzyklus mit beladenem Fahrzeug.



(b) Überlandzyklus mit beladenem Fahrzeug.



(c) Stadtzyklus mit beladenem Fahrzeug.



(d) Bergfahrt Zyklus mit beladenem Fahrzeug.

Abbildung 3.12: Verbrauchskennfeld des 40t Euro 3 Lastwagens. schwarze x: Eco-Drive Schaltstrategie, blaue +: Schaltstrategie 'normal'.

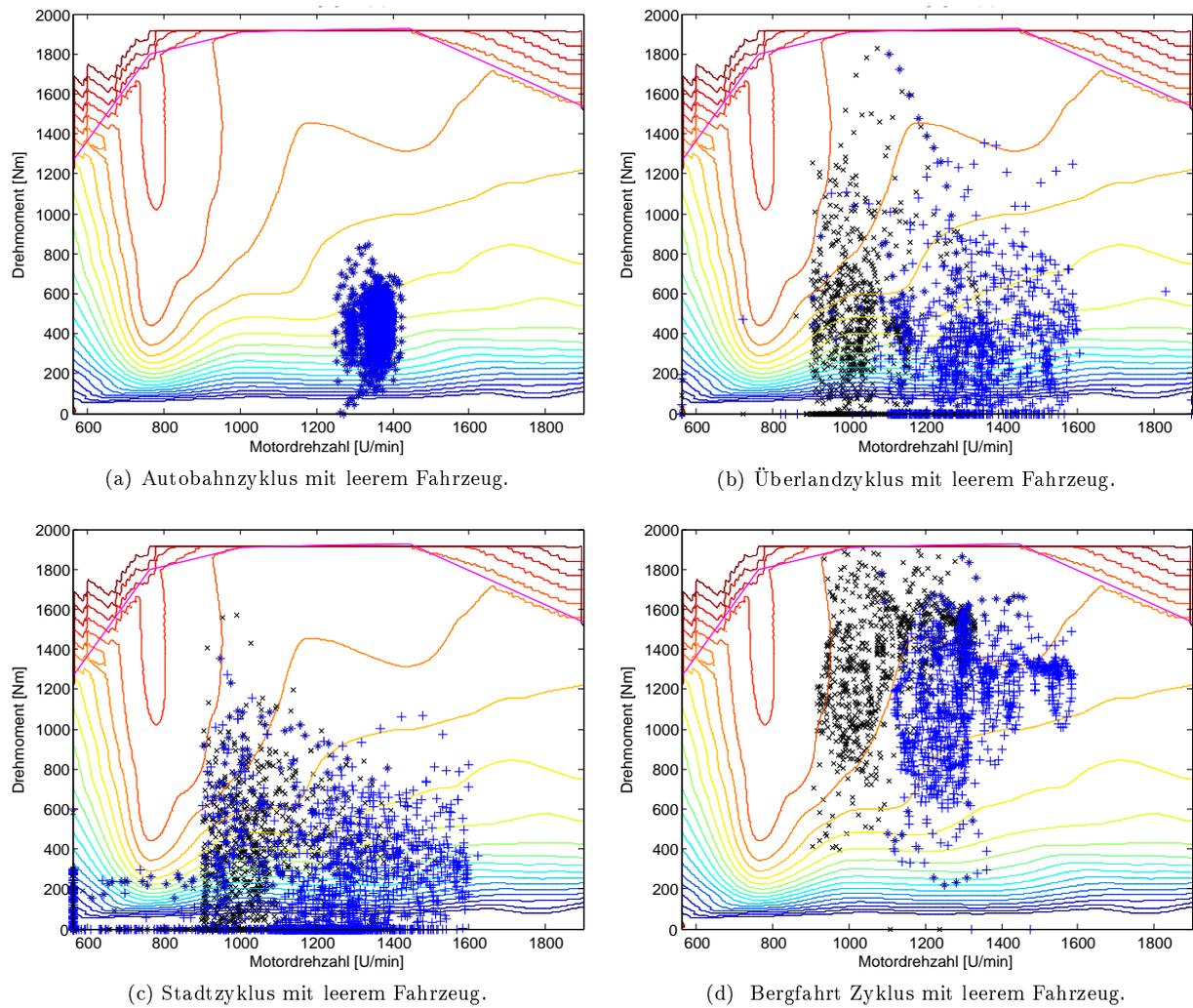
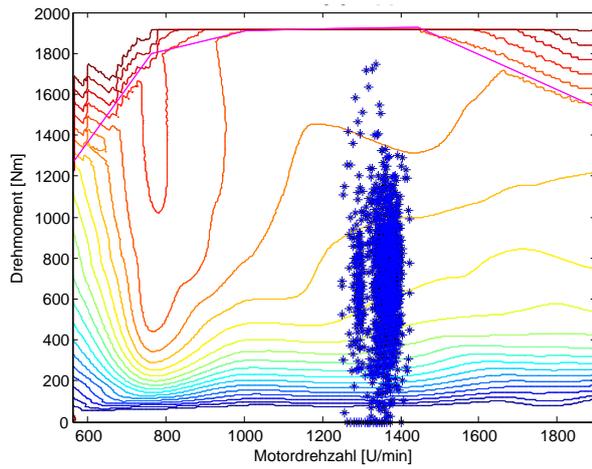
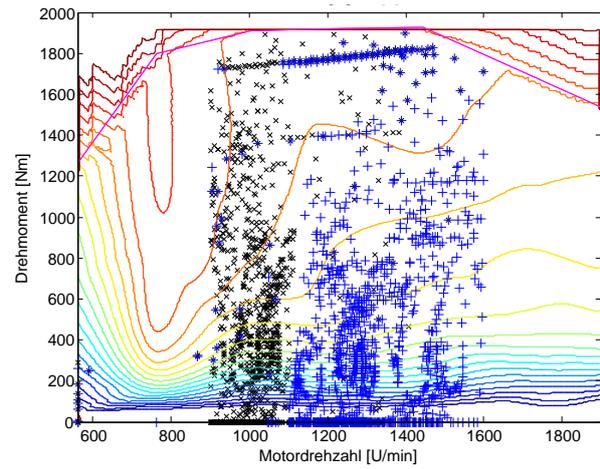


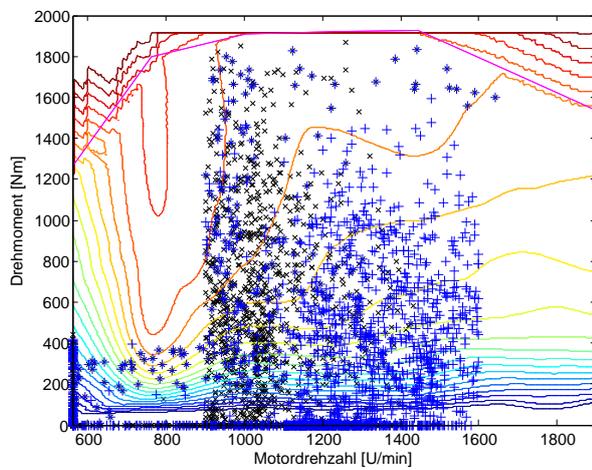
Abbildung 3.13: Verbrauchskennfeld des Euro 3 Sattelschleppers. schwarze x: Eco-Drive Schaltstrategie, blaue +: Schaltstrategie 'normal'.



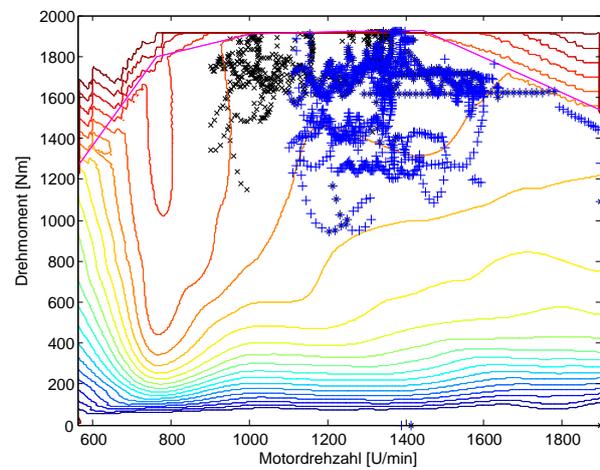
(a) Autobahnzyklus mit beladenem Fahrzeug.



(b) Überlandzyklus mit beladenem Fahrzeug.

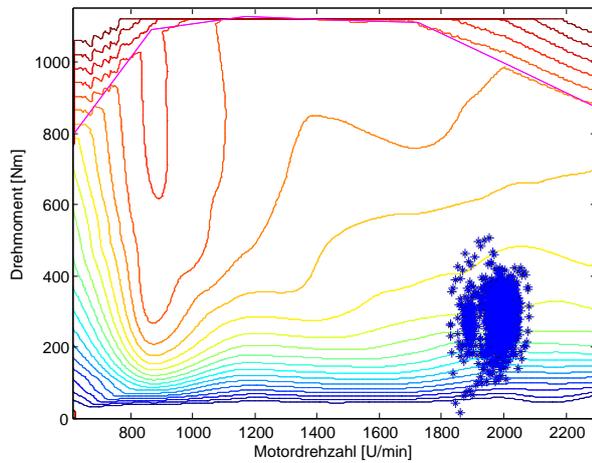


(c) Stadtzyklus mit beladenem Fahrzeug.

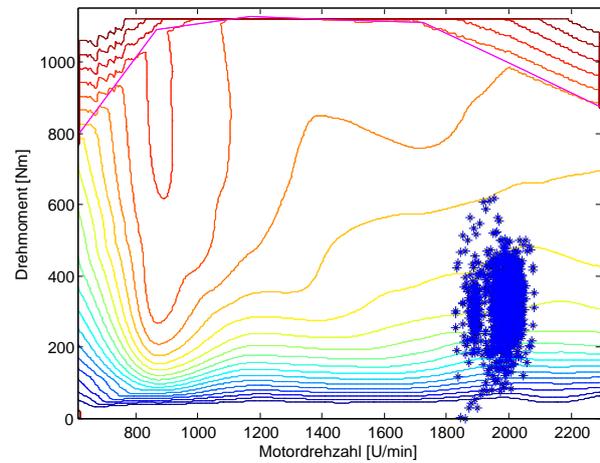


(d) Bergfahrt Zyklus mit beladenem Fahrzeug.

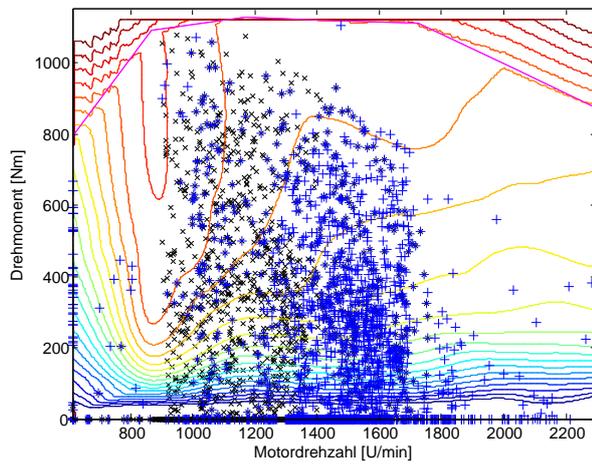
Abbildung 3.14: Verbrauchskennfeld des Euro 3 Sattelschleppers. schwarze x: Eco-Drive Schaltstrategie, blaue +: Schaltstrategie 'normal'.



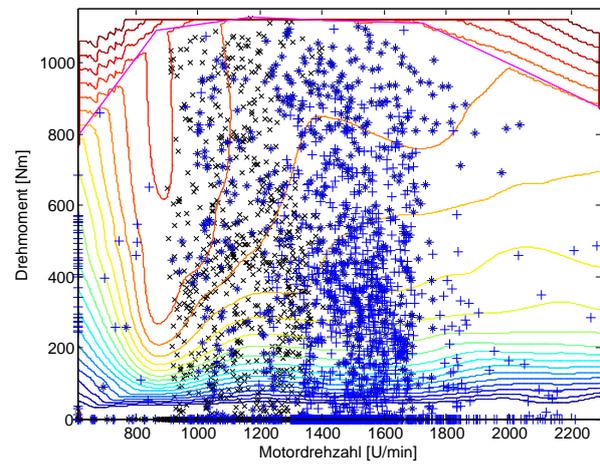
(a) Autobahnzyklus mit leerem Bus.



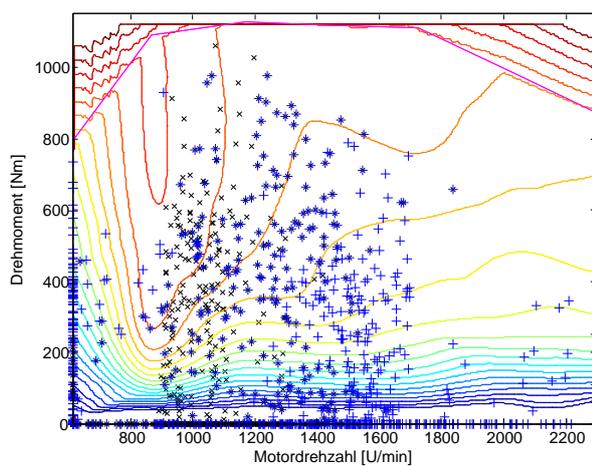
(b) Autobahnzyklus mit beladenem Bus.



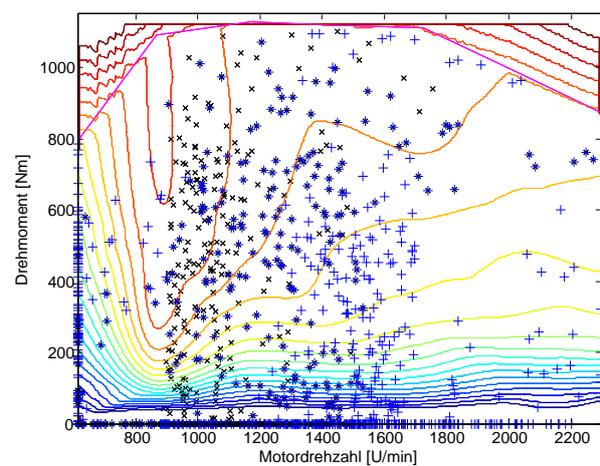
(c) Von Stadt zu Stadt mit leerem Bus.



(d) Von Stadt zu Stadt mit beladenem Bus.



(e) Stadtzyklus mit leerem Bus.



(f) Stadtzyklus mit beladenem Bus.

Abbildung 3.15: Verbrauchskennfeld des Euro 3 Busses. schwarze x: Eco-Drive Schaltstrategie, blaue +: Schaltstrategie 'normal'.

## 3.2 Vorausschauendes Fahren

Bis jetzt gibt es noch keine quantitative Beschreibung für vorausschauendes Fahren oder den Unterschied zwischen vorausschauendem und herkömmlichen 'normalen' Fahren. Um in dieser Studie den Begriff zu fassen, wird nach einer möglichst einfachen und genau zu definierenden Methode gesucht, um vorausschauendes Fahren zu modellieren. Eine Möglichkeit besteht darin einen bestehenden Fahrzyklus zu nehmen und diesen abzuändern.

In einem ersten Schritt wird der NEFZ - Stadtteil abgeändert. In einem Zweiten werden anhand dieser Ergebnisse Überland- und Autobahnzyklen an ein vorausschauendes Fahren angepasst.

### 3.2.1 NEFZ - Stadtteil

Ein einfacher Zyklus ist der NEFZ 'Neuer Europäischer Fahrzyklus' (Abbildung 3.16). Der NEFZ besteht aus einem Stadtteil und einem Überlandteil. Hier wird der Stadtteil verwendet (in Abbildung 3.16 rot umrahmt). Die Gründe dafür sind:

- Der Überlandteil des NEFZ kann mit einem normalen Lastwagen nicht gefahren werden
- In der Stadt ist Überholen oft nicht möglich. Um den Verkehrsfluss nicht zu behindern, sollte ein Lastwagen in der Lage sein diesem zu folgen. Daher ist es legitim, den NEFZ Stadtteil auch für Lastwagen zu verwenden.
- Der NEFZ Stadtteil ist übersichtlich und einfach. Die Anpassungen können genau definiert werden.
- Es wird angenommen, dass Verbrauchseinsparungen durch vorausschauendes Fahren in der Stadt am grössten sind.
- Der NEFZ ist international anerkannt, um Emissions- und Verbrauchswerte für Personewagen zu bestimmen.

Gründe die dagegen sprechen, den NEFZ - Stadtteil zu verwenden sind:

- Der NEFZ wurde für Personewagen definiert.
- Es ist nicht klar, in wiefern der NEFZ die reale Strassensituation widerspiegelt.

### Anpassungen NEFZ Stadtteil

Der NEFZ Stadtteil besteht aus drei Intervallen. Um das vorausschauende Fahren zu modellieren wurde der NEFZ Stadtteil wie folgt angepasst:

- **1. Intervall:** Beschleunigung von 0 auf  $4.16 \text{ m/s}$  ( $15 \text{ km/h}$ ) mit einer Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$ . Danach stetiges Abbremsen, bis die gesamte Strecke des ersten Intervalls zurückgelegt ist.
- **2. Intervall:** Beschleunigung mit  $1 \text{ m/s}^2$  von 0 auf  $8.88 \text{ m/s}$  ( $32 \text{ km/h}$ ) oder falls der Motor diese Leistung nicht erbringen kann, mit der maximal möglichen Beschleunigung. Danach wird so früh wie möglich abgebremst, so dass das Fahrzeug nach der gleichen Strecke und nach der gleichen Zeit wie beim originalen Zyklus steht.

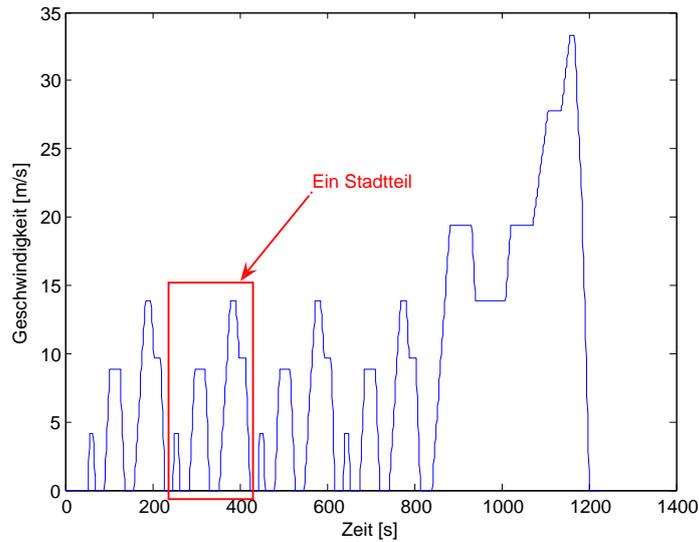


Abbildung 3.16: NEFZ

- 3. Intervall:** Beschleunigung mit  $1 \text{ m/s}^2$  von 0 auf  $13.8 \text{ m/s}$  ( $50 \text{ km/h}$ ) oder falls der Motor diese Leistung nicht erbringen kann, mit der maximal möglichen Beschleunigung. Danach wird so früh wie möglich abgebremst, so dass das Fahrzeug nach der gleichen Strecke und nach der gleichen Zeit wie beim originalen Zyklus steht. Bemerkung: Im originalen Zyklus wird zuerst von  $13.8 \text{ m/s}$  auf  $9.72 \text{ m/s}$  abgebremst und erst nach weiteren  $15 \text{ s}$  bis zum Stillstand abgebremst. Beim angepassten Zyklus wird kontinuierlich abgebremst

Dadurch, dass die zeitliche Auflösung der Simulation auf  $1 \text{ s}$  begrenzt ist, entstehen gewisse Rundungsfehler bezüglich der Beschleunigungen und der gefahrenen Strecken. Diese sind jedoch klein.

**Beispiel: Anpassungen für den beladenen 40t Sattelschlepper** In Abbildung 3.17 sind der originale NEFZ - Stadtteil und der angepasste NEFZ - Stadtteil übereinander gelegt. Im 3. Intervall ist ersichtlich, dass der Sattelschlepper nur bis zu einer Geschwindigkeit von  $6 \text{ m/s}$  mit  $1 \text{ m/s}^2$  beschleunigen kann, danach wird die Beschleunigung nach unten angepasst.

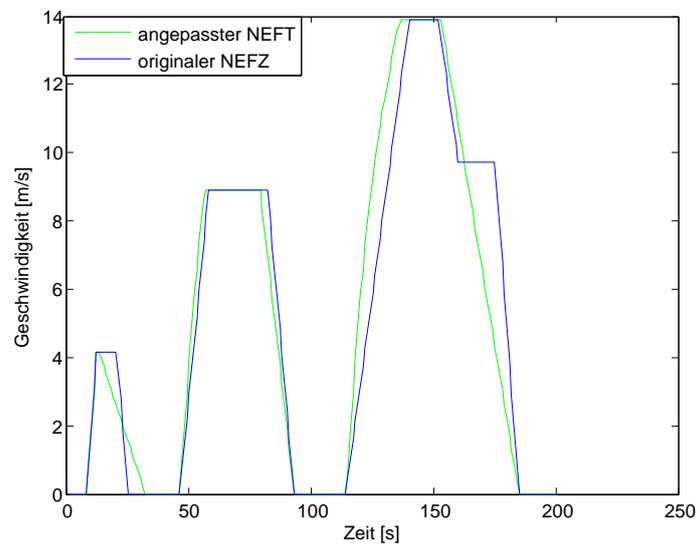


Abbildung 3.17: der NEFZ Stadtteil für den Sattelschlepper angepasst.

### 3.2.2 Resultate Vorausschauendes Fahren NEFZ - Stadtteil

Schaltstrategie	Beladung	Einsparung % 18t Lastwagen	Einsparung % 40t Lastwagen	Einsparung % Sattelschlepper	Einsparung % Bus
normal	beladen	7.8	7.1	6.2 (4.7)	7.9
Eco	beladen	6.0	5.5	5.7	4.3
normal	leer	9.9	8.6	7.3	8.5
Eco	leer	10.6	9.0	8.8	4.3

Tabelle 3.7: Einsparung durch vorausschauendes Fahren NEFZ - Stadtteil

**Illustration der Resultate** Zur Illustration der Resultate, sind am Ende des Kapitels die Kennfelder der Fahrzeuge abgebildet. Es sind alle Betriebspunkte der jeweiligen Simulation eingezeichnet. In den Abbildungen 3.23 bis 3.30 sind wesentlich weniger Betriebspunkte eingezeichnet als in den Abbildungen 3.9 bis 3.15. Der Grund dafür ist, dass Der NEFZ - Stadtteil ein generischer Zyklus und ausserdem sehr kurz ist. Die Betriebspunkte, die sich aus der 'normalen' Schaltstrategie ergeben sind mit blauen Kreuzen eingezeichnet, diejenigen der Eco-Drive Schaltstrategie mit schwarzen x-en.

#### Lastwagen 18t

Am Beispiel der Simulation mit einem leerem Fahrzeug und der Eco-Drive Schaltstrategie wird das Einsparpotential des Vorausschauenden Fahrens genauer betrachtet.

Eine erste wichtige Komponente ist der Energieverbrauch am Rad. Das ist die Energie, die vom Motor aufgebracht werden muss, um den Roll- und Luftwiderstand zu überwinden, sowie um das Fahrzeug zu beschleunigen. In Tabelle 3.8 ist aufgelistet, wie viel Energie wofür aufgewendet werden muss.

*Rollwiderstand* Es wird die Energie aufsummiert, welche für die Überwindung des Rollwiderstandes aufgebracht werden muss. Der Rollwiderstand ist immer positiv und proportional zum Fahrzeuggewicht. Während des Abbremsens wird der Rollwiderstand von der freigesetzten kinetischen Energie überwunden und nicht vom Motor. Im angepassten Zyklus bremst das Fahrzeug über eine längere Strecke hinweg ab und braucht deshalb weniger Energie für die Überwindung des Rollwiderstandes

*Beschleunigung* Es wird die Energie aufsummiert, welche für die Beschleunigung des Fahrzeuges aufgebracht werden muss, ohne die Energie abzuziehen, die während dem Abbremsen wieder frei wird. Das Fahrzeug wird in beiden Zyklen auf die gleichen Geschwindigkeiten beschleunigt, deshalb ist die aufgebrachte Energie bei beiden Zyklen gleich gross.

*Luftwiderstand* Es wird die Energie aufsummiert, welche für die Überwindung des Luftwiderstandes aufgebracht werden muss. Der Luftwiderstand ist proportional zum Quadrat der Fahrzeuggeschwindigkeit. Beim angepassten Zyklus wird länger mit hoher Geschwindigkeit gefahren, deshalb ist der Luftwiderstand beim angepassten Zyklus insgesamt grösser als beim originalen Zyklus.

*Totale Energie am Rad* Der gesamte Energieverbrauch am Rad ist beim angepassten Zyklus um 5.45 % kleiner als beim Original. Die Differenz resultiert daraus, dass während des Abbremsens des Fahrzeuges der Roll- und der Luftwiderstand

Energie Rollwiderstand für den normalen Zyklus :	0.628	[MJ]
Energie Rollwiderstand für den angepassten Zyklus:	0.513	[MJ]
Einsparung Rollwiderstand:	18.3	[%]
Energie Beschleunigung für den normalen Zyklus:	1.211	[MJ]
Energie Beschleunigung für den angepassten Zyklus:	1.211	[MJ]
Einsparung Beschleunigung:	0	[%]
Energie Luftwiderstand für den normalen Zyklus:	0.212	[MJ]
Energie Luftwiderstand für den angepassten Zyklus:	0.215	[MJ]
Einsparung Luftwiderstand:	-1.5	[%]
Totale Energie am Rad für den normalen Zyklus:	2.052	[MJ]
Totale Energie am Rad für den angepassten Zyklus:	1.941	[MJ]
Totale Einsparung am Rad:	5.45	[%]
Totale Energie am Motor für den normalen Zyklus:	2.506	[MJ]
Totale Energie am Motor für den angepassten Zyklus:	2.391	[MJ]
Totale Einsparung am Motor:	4.59	[%]

Tabelle 3.8: Energieaufwand für den normalen und den angepassten NEFZ - Stadtteil

durch die freigesetzte kinetische Energie überwunden wird, und nicht vom Motor angewendet werden muss.

*Totale Energie am Motor* Dies ist gesamte Energie, die vom Motor geleistet werden muss. D.h. im Wesentlichen ist es die Energie am Rad plus die Verluste, die im Getriebe entstehen.

Es ist ersichtlich, dass der Motor beim angepassten Zyklus 4.59 % weniger Energie leisten muss als beim Originalen. Eine weitere Einsparung entsteht dadurch, dass der Motor beim angepassten Zyklus in einem besseren Betriebspunkt betrieben wird. In Tabelle 3.9 ist der Treibstoffverbrauch während den drei Beschleunigungsphasen aufgelistet.

Verbrauch 1. Beschleunigung normal:	1.01	[cl]
Verbrauch 1. Beschleunigung Eco:	1.01	[cl]
Einsparung Verbrauch 1. Beschleunigung:	0	[%]
Verbrauch 2. Beschleunigung normal:	4.03	[cl]
Verbrauch 2. Beschleunigung Eco:	3.72	[cl]
Einsparung Verbrauch 2. Beschleunigung:	7.8	[%]
Verbrauch 3. Beschleunigung normal:	8.86	[cl]
Verbrauch 3. Beschleunigung Eco:	7.90	[cl]
Einsparung Verbrauch 3. Beschleunigung:	10.8	[%]
Verbrauch Beschleunigung total normal:	13.91	[cl]
Verbrauch Beschleunigung total Eco:	12.64	[cl]
Einsparung Beschleunigung total:	9.1	[%]

Tabelle 3.9: Energieaufwand für den normalen und den angepassten NEFZ

Der Treibstoffverbrauch für die Beschleunigungsphasen ist also beim angepassten Zyklus deutlich kleiner als beim originalen.

Durch diese beiden Effekte, den besseren Betriebspunkt während der Beschleunigungen und der besseren Ausnutzung der Kinetischen Energie während des Abbremsens wird eine Verbrauchseinsparung von 10.3 % erzielt.

Schaltverhalten	Beladung	Zyklus	Verbrauch l/100km
normal	beladen	original	47.5
Eco	beladen	original	43.4
normal	leer	original	30.5
Eco	leer	original	26.9
normal	beladen	angepasst	43.8
Eco	beladen	angepasst	40.8
normal	leer	angepasst	27.5
Eco	leer	angepasst	24.1

Tabelle 3.10: Verbrauch des 18t Lastwagens beim angepassten und originalen NEFZ - Stadtteil

### Lastwagen 40t

Das Einsparpotential des 40t Lastwagens durch ein Vorausschauendes Fahren ist in Tabelle 3.7 eingetragen. In Tabelle 3.11 ist der Verbrauch des 40t Lastwagens eingetragen.

Schaltverhalten	Beladung	Zyklus	Verbrauch l/100km
normal	beladen	original	80.5
Eco	beladen	original	78.0
normal	leer	original	45.3
Eco	leer	original	40.3
normal	beladen	angepasst	74.8
Eco	beladen	angepasst	73.7
normal	leer	angepasst	41.4
Eco	leer	angepasst	36.6

Tabelle 3.11: Verbrauch des 40t Lastwagens beim angepassten und originalen NEFZ Zyklus

### Sattelschlepper

Das Einsparpotential des Sattelschleppers durch ein Vorausschauendes Fahren ist in Tabelle 3.7 eingetragen. In Tabelle 3.12 ist der Verbrauch des Sattelschleppers eingetragen.

Schaltverhalten	Beladung	Zyklus	Verbrauch l/100km
normal	beladen	original	83.3
Eco	beladen	original	80.2
normal	leer	original	48.3
Eco	leer	original	43.6
normal	beladen	angepasst	78.1
Eco	beladen	angepasst	75.6
normal	leer	angepasst	44.8
Eco	leer	angepasst	39.7

Tabelle 3.12: Verbrauch des Sattelschleppers beim angepassten und originalen NEFZ - Stadtteil

**Beladenes Fahrzeug, normale Schaltstrategie** Eine Einsparung von 4.7 % ist auffallend klein. Die Ursache ist im zweiten Intervall des NEFZ-Stadtteils zu finden. Genauer im Bereich, der mit konstanter Geschwindigkeit abgefahren wird. Im Angepassten Zyklus wird dieser Bereich mit höherem Gang (11) abgefahren als im originalen (10). Wird das Intervall in beiden Fällen im gleichen Gang (10) abgefahren, so ergibt sich eine Einsparung von 6.2 %.

### Bus

Das Einsparpotential des Busses durch Vorausschauendes Fahren ist in Tabelle 3.7 dargestellt. In Tabelle 3.13 ist der Verbrauch des Busses eingetragen.

**Unterschied zwischen der 'normalen' und der Eco-Drive Schaltstrategie** Auffällig an den Resultaten für den Linienbus ist der eher grosse Unterschied zwischen dem Einsparpotential im Bezug auf die Schaltstrategie. Die Ursache liegt im

Schaltverhalten	Beladung	Zyklus	Verbrauch l/100km
normal	beladen	original	37.7
Eco	beladen	original	32.1
normal	leer	original	31.3
Eco	leer	original	26.9
normal	beladen	angepasst	34.1
Eco	beladen	angepasst	30.7
normal	leer	angepasst	28.6
Eco	leer	angepasst	25.7

Tabelle 3.13: Verbrauch des Busses beim angepassten und originalen NEFZ - Stadtteil

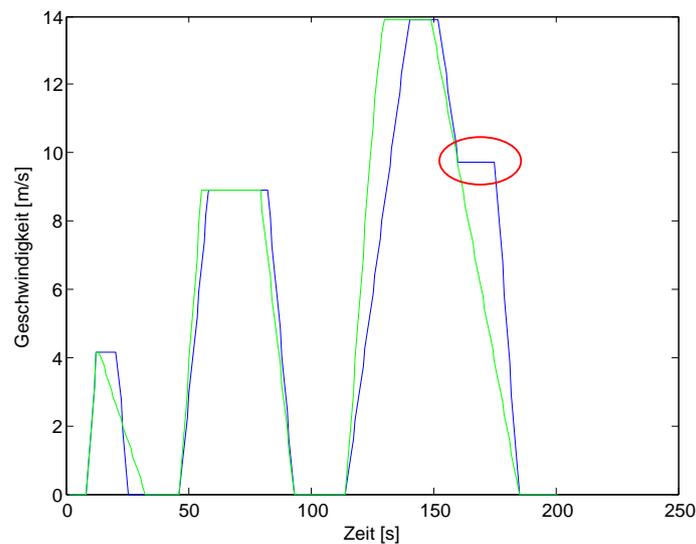


Abbildung 3.18: NEFZ - Stadtteil original (blau) und für den Linienbus an ein Vorausschauendes Fahren angepasst (grün).

dritten Intervall des NEFZ-Stadtteils. Der Bereich ist in Abbildung 3.18 rot markiert. Im rot markierten Bereich fährt das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit. Im angepassten Zyklus fällt dieser Bereich weg. Die Tatsache, dass dieser Bereich im angepassten Zyklus wegfällt, trägt viel zum Einsparpotential des vorausschauenden Fahrens bei.

Wird das Fahrzeug mit der 'normalen' Schaltstrategie betrieben, so fährt es in diesem Bereich im dritten Gang. Falls das Fahrzeug mit der Eco-Drive Schaltstrategie betrieben wird, wird der Bereich im vierten Gang abgefahren. D.h. mit der 'normalen' Schaltstrategie braucht das Fahrzeug in diesem Bereich mehr Treibstoff, und der Unterschied zum vorausschauenden Fahren ist grösser, als wenn das Fahrzeug mit der Eco-Drive Schaltstrategie betrieben wird.

### 3.2.3 Überland und Autobahn

In der Stadt wurde der Einfluss des Vorausschauenden Fahrens durch Anpassungen am NEFZ - Stadtteil modelliert.

Um das Vorausschauende Fahren auf der Autobahn und auf Überlandstrecken zu modellieren, werden die bestehenden HBEFA Autobahn- und Überlandzyklen abgeändert, indem sie geglättet werden.

Um herauszufinden, wie stark die Autobahn- und Überlandzyklen geglättet werden müssen, wird der HBEFA Stadtzyklus so stark geglättet, bis die gleiche Verbrauchseinsparung resultiert, wie durch die NEFZ Anpassung erreicht wurde.

Die Glättung wird durch ein Tiefpassfilter erster Ordnung realisiert. Das heisst die hochfrequenten Anteile des Geschwindigkeitsprofils werden gedämpft. Als Mass für die Glättung des Zyklus wird die Eckfrequenz  $f = \frac{1}{T}$  genommen. D.h. alle Änderungen im Geschwindigkeitsprofil, welche in weniger als  $T$  Sekunden ablaufen, werden herausgefiltert.

In Abbildung 3.19 und 3.20 ist der Überlandzyklus, für den leere 18t Lastwagen, abgebildet. Blau: original, grün: geglättet

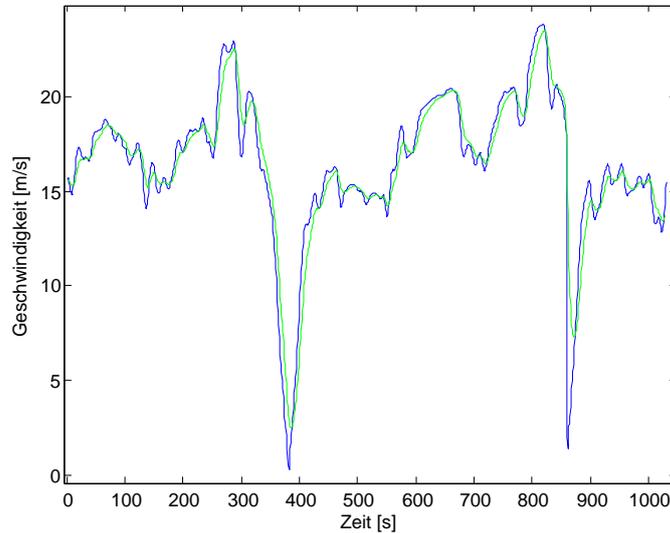


Abbildung 3.19: Anpassungen am Überlandzyklus für den leeren 18t Lastwagennormal. normal: blau, gefiltert: grün

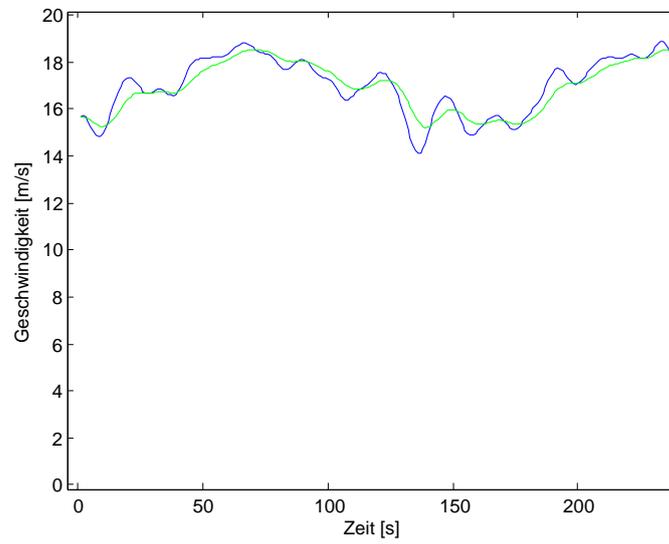


Abbildung 3.20: Ein Ausschnitt aus dem Überlandzyklus, vergrößert. normal: blau, gefiltert: grün

### 3.2.4 Resultate Vorausschauendes Fahren Überland und Autobahn

	Lastwagen 18t	Lastwagen 40t	Sattelschlepper	Linienbus
<b>Überland</b>				
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	5.1 %	6.7 %	6.5 %	4.3 %
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	3.7 %	4.7 %	5.8 %	3.8 %
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	3.4 %	3.5 %	3.2 %	3.9 %
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	2.3 %	2.7 %	2.9 %	3.7 %
<b>Autobahn</b>				
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.0 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.0 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.2 %
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.2 %

Tabelle 3.14: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Überland und Autobahn

**Lastwagen 18t**

<b>Überland</b>	Einsparpotential %	Verbrauch normal [l/100km]	Verbrauch vorausschauendes Fahren [l/100km]	Tiefpass Zeitkonstante [s]
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	5.1	17.7	16.8	7.9
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	3.7	19.2	18.5	7.9
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	3.4	25.8	24.9	5.9
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	2.3	28.0	27.4	5.9

Tabelle 3.15: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Überland für den 18t Lastwagen

<b>Autobahn</b>	Einsparpotential %	Verbrauch normal [l/100km]	Verbrauch vorausschauendes Fahren [l/100km]	Tiefpass Zeitkonstante [s]
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.0	21.4	21.4	7.9
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.0	21.4	21.4	7.9
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	-0.1	29.2	29.3	5.9
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	-0.1	29.2	29.3	5.9

Tabelle 3.16: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Autobahn für den 18t Lastwagen

**Lastwagen 40t**

<b>Überland</b>	Einsparpotential %	Verbrauch normal [l/100km]	Verbrauch vorausschauendes Fahren [l/100km]	Tiefpass Zeitkonstante [s]
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	6.7	23.8	22.2	5.4
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	4.7	26.2	24.9	5.4
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	3.5	40.9	39.4	4.1
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	2.7	43.3	42.1	4.1

Tabelle 3.17: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Überland für den 40t Lastwagen

<b>Autobahn</b>	Einsparpotential %	Verbrauch normal [l/100km]	Verbrauch vorausschauendes Fahren [l/100km]	Tiefpass Zeitkonstante [s]
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.2	25.9	25.9	5.4
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.2	25.9	25.9	5.4
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	0.0	37.8	37.8	4.1
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	0.0	37.8	37.8	4.1

Tabelle 3.18: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Autobahn für den 40t Lastwagen

**Sattelschlepper**

<b>Überland</b>	Einsparpotential %	Verbrauch normal [l/100km]	Verbrauch vorausschauendes Fahren [l/100km]	Tiefpass Zeitkonstante [s]
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	6.5	23.8	22.2	5.8
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	5.8	26.1	24.5	5.8
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	3.2	40.6	39.3	4.2
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	2.9	43.1	41.8	4.2

Tabelle 3.19: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Überland für den Sattelschlepper

<b>Autobahn</b>	Einsparpotential %	Verbrauch normal [l/100km]	Verbrauch vorausschauendes Fahren [l/100km]	Tiefpass Zeitkonstante [s]
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.2	24.6	24.5	5.8
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.2	24.6	24.5	5.8
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	0.0	35.8	35.8	4.2
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	0.0	35.8	35.8	4.2

Tabelle 3.20: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Autobahn für den Sattelschlepper

**Linienbus**

	Einsparpotential %	Verbrauch normal [l/100km]	Verbrauch vorausschauendes Fahren [l/100km]	Tiefpass Zeitkonstante [s]
<b>Überland</b>				
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	4.3	20.5	19.6	3.0
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	3.8	22.1	21.3	3.0
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	3.9	25.0	24.0	2.4
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	3.7	26.7	25.7	2.4

Tabelle 3.21: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Überland für den Linienbus

	Einsparpotential %	Verbrauch normal [l/100km]	Verbrauch vorausschauendes Fahren [l/100km]	Tiefpass Zeitkonstante [s]
<b>Autobahn</b>				
Eco-Drive Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.2	20.8	20.7	3.0
'normale' Schaltstrategie leeres Fahrzeug	0.2	20.8	20.7	3.0
Eco-Drive Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	0.2	22.7	22.7	2.4
'normale' Schaltstrategie beladenes Fahrzeug	0.2	22.7	22.7	2.4

Tabelle 3.22: Einsparpotential durch Vorausschauendes Fahren Autobahn für den Linienbus

### 3.2.5 Sensibilitätsanalysen Vorausschauendes Fahren NEFZ - Stadtteil

Es wurden Sensibilitätsanalysen bezüglich der Beladung dem Luftwiderstandsbeiwert gemacht. Die Sensibilitätsanalysen werden mit dem 18t Lastwagen und der Eco-Drive Schaltstrategie durchgeführt.

#### Beladung

Die Beladung wird von 0t (leer) bis 10t (voll beladen) variiert. Um die Anpassung des NEFZ zu automatisieren, werden die Beschleunigungen im zweiten und dritten Intervall linear angepasst. D.h. anstatt die Beschleunigung erst ab einer bestimmten Geschwindigkeit der maximalen Motorleistung anzupassen, wird in allen Intervallen konstant beschleunigt. Diese Beschleunigung wird soweit verringert, bis das Fahrzeug dem Zyklus folgen kann. Im Vergleich zur Anpassung wie sie in Abschnitt 3.2.1 definiert ist, wird erwartet, dass die Verbrauchseinsparung kleiner ist.

In Abbildung 3.21 ist das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse abgebildet. Die Einsparung von 10.6 % beim leeren Lastwagen stimmt mit den bisherigen Ergebnissen überein. Das Ergebnis für das voll beladene Fahrzeug liegt mit 4.8 % deutliche unter dem vorgängigen Wert von 6.0 %. Die Differenz ist auf die unterschiedlichen Anpassungen des NEFZ Stadtteils zurückzuführen.

Die Sprünge im Ergebnis (z.B. zwischen einer Beladung von 4t und 4.5t) sind darauf zurückzuführen, dass die Zeitauflösung 1 Sekunde beträgt. Dadurch kann die Beschleunigung nicht kontinuierlich angepasst werden, und es entstehen Unstetigkeiten im Ergebnis.

Dennoch zeigt die Sensibilitätsanalyse, dass mit stärker beladenem Fahrzeug weniger Treibstoff eingespart werden kann, als mit leerem.

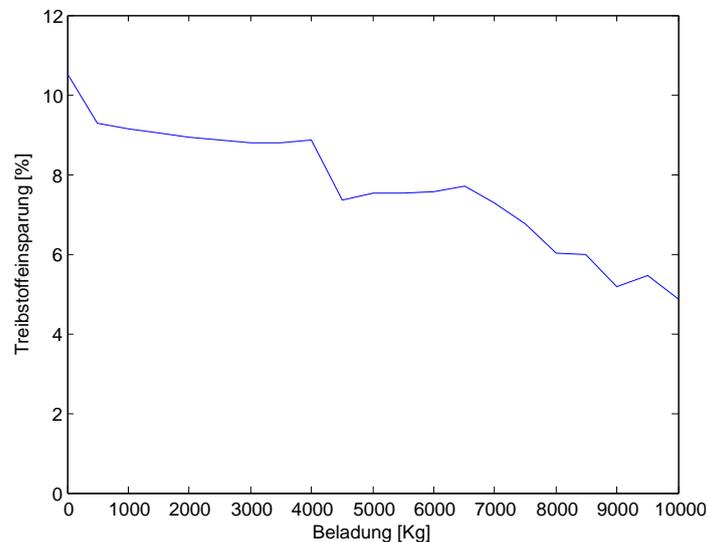


Abbildung 3.21: Sensibilitätsanalyse bezüglich der Beladung des Fahrzeuges

#### Luftwiderstandsbeiwert

Der Luftwiderstandsbeiwert wird zwischen 0.4 und 1 variiert. Der Luftwiderstandsbeiwert hat keinen oder wenig Einfluss auf das Einsparpotential. (siehe Abbildung 3.22)

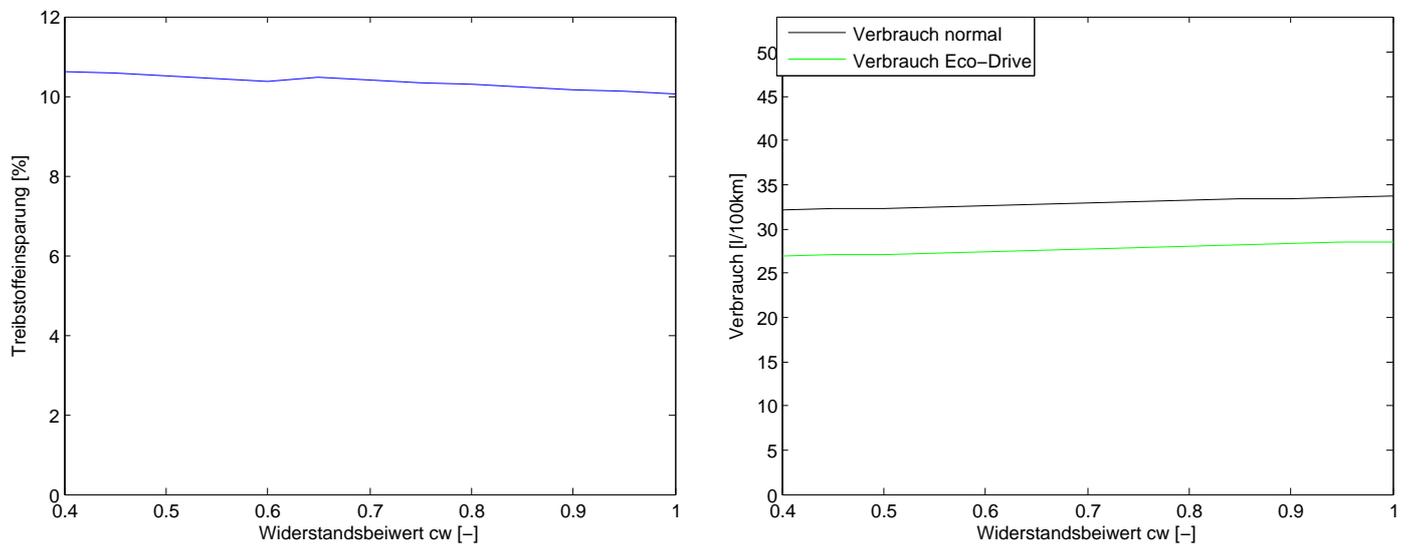
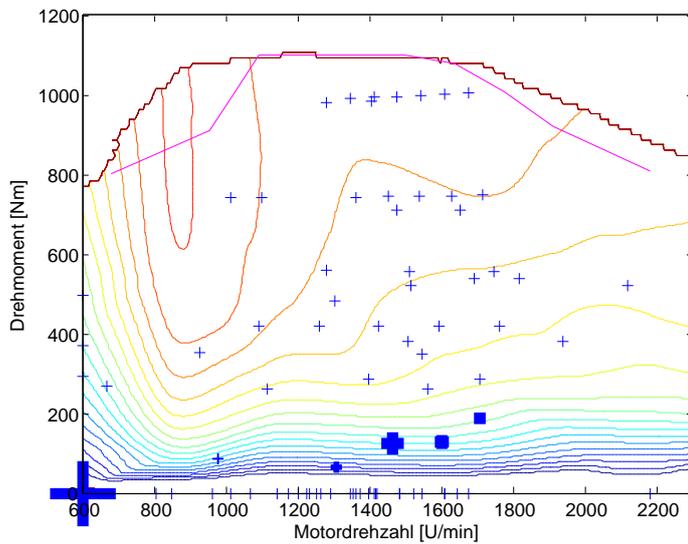
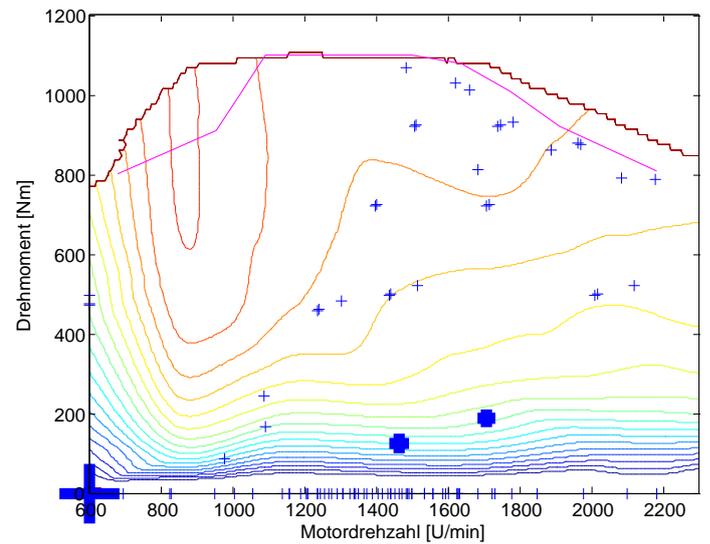


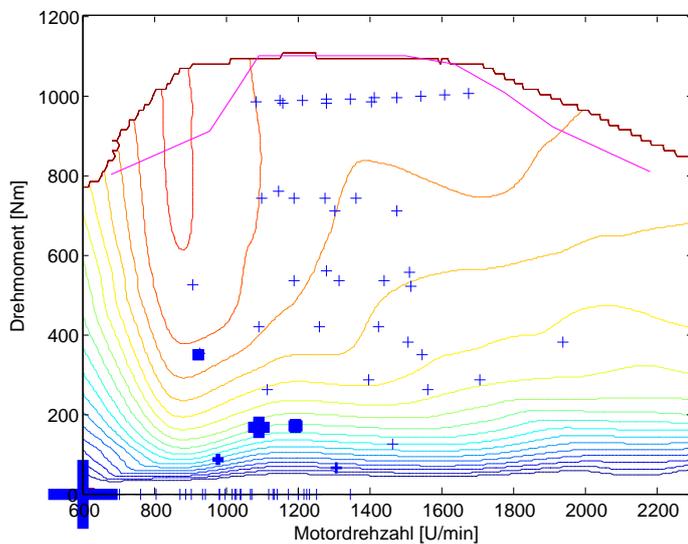
Abbildung 3.22: Sensibilitätsanalyse bezüglich des Luftwiderstandsbeiwerts cw



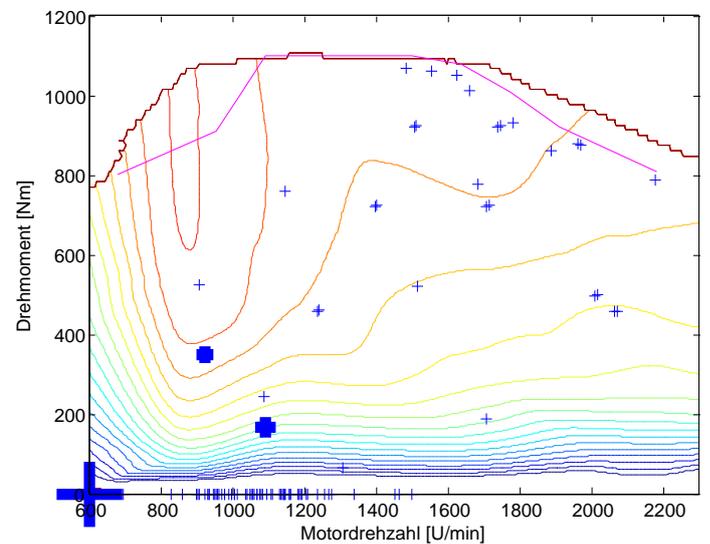
(a) Schaltstrategie 'normal', beladen, NEFZ-Stadt original



(b) Schaltstrategie 'normal', beladen, NEFZ-Stadt angepasst

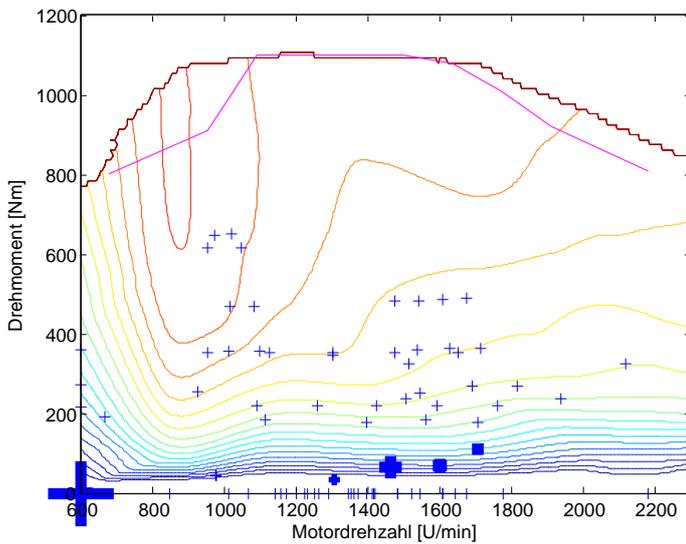


(c) Schaltstrategie Eco, beladen, NEFZ-Stadt original

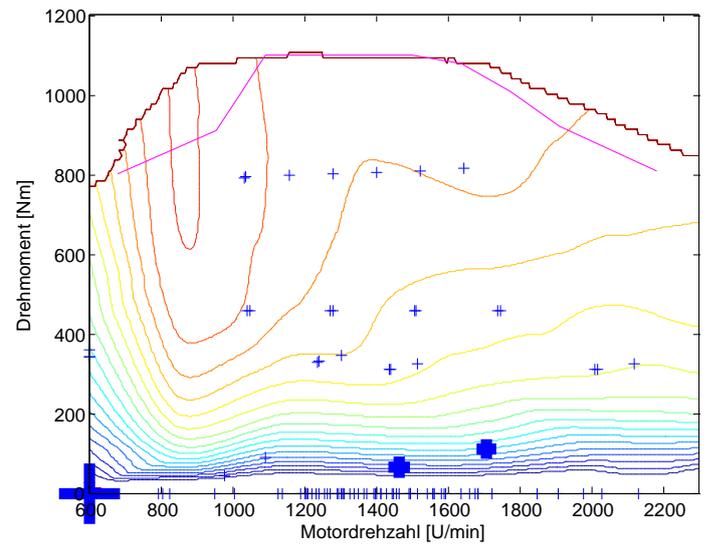


(d) Schaltstrategie Eco, beladen, NEFZ-Stadt angepasst

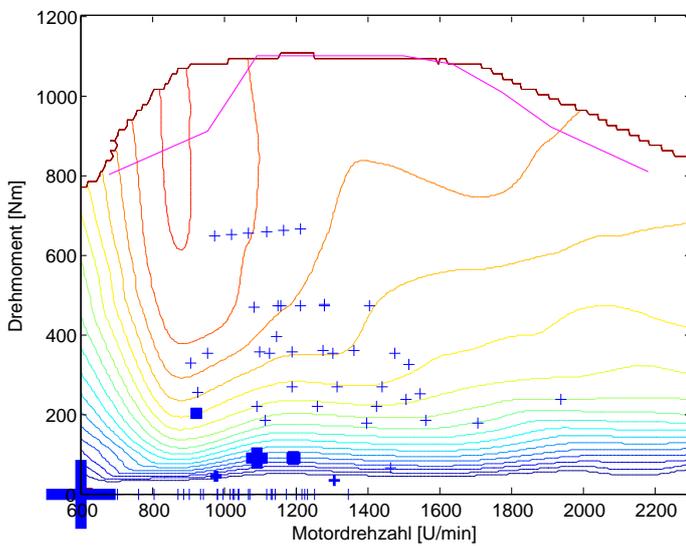
Abbildung 3.23: Verbrauchskennfelder des 18t Euro 3 Lastwagens. Vorausschauendes Fahren



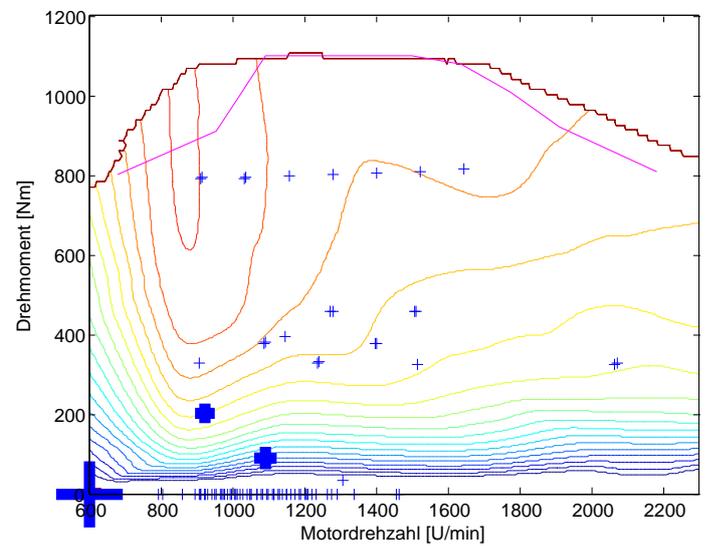
(a) Schaltstrategie 'normal', leer, NEFZ-Stadt original



(b) Schaltstrategie 'normal', leer, NEFZ-Stadt angepasst

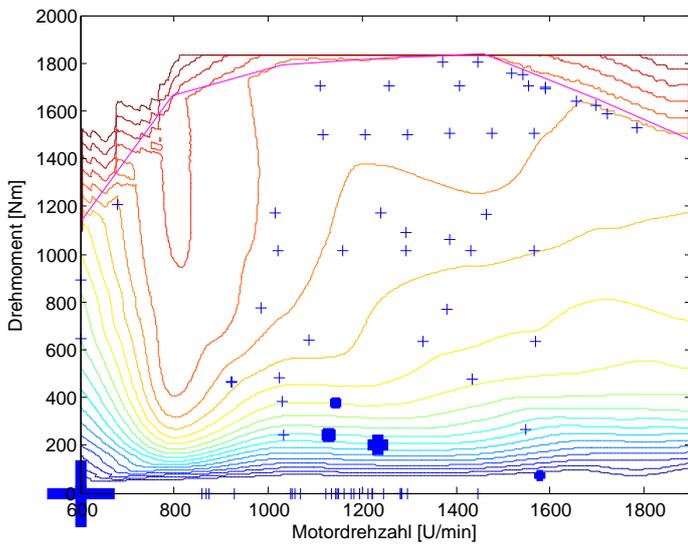


(c) Schaltstrategie Eco, leer, NEFZ-Stadt original

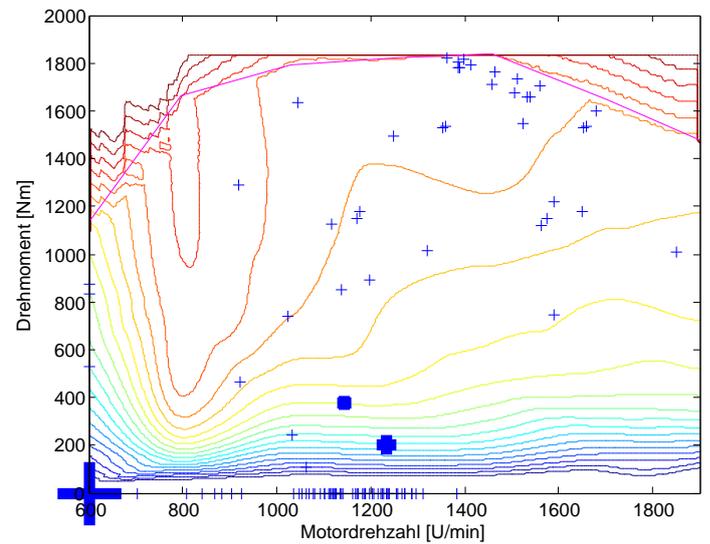


(d) Schaltstrategie Eco, leer, NEFZ-Stadt angepasst

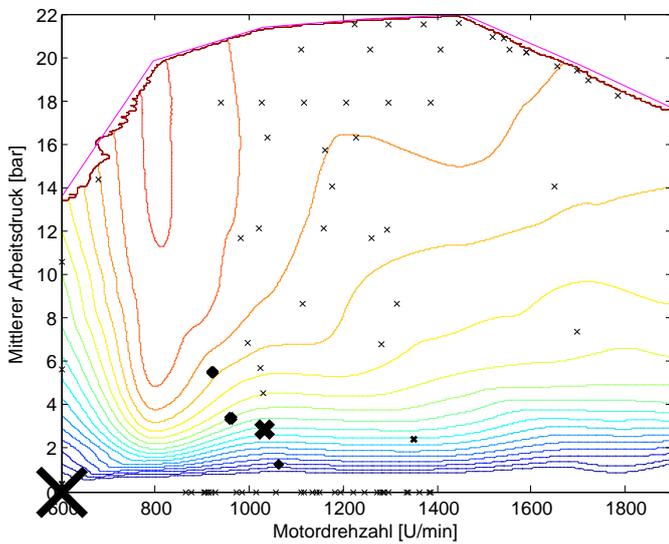
Abbildung 3.24: Verbrauchskennfelder des 18t Euro 3 Lastwagens. Vorausschauendes Fahren forts.



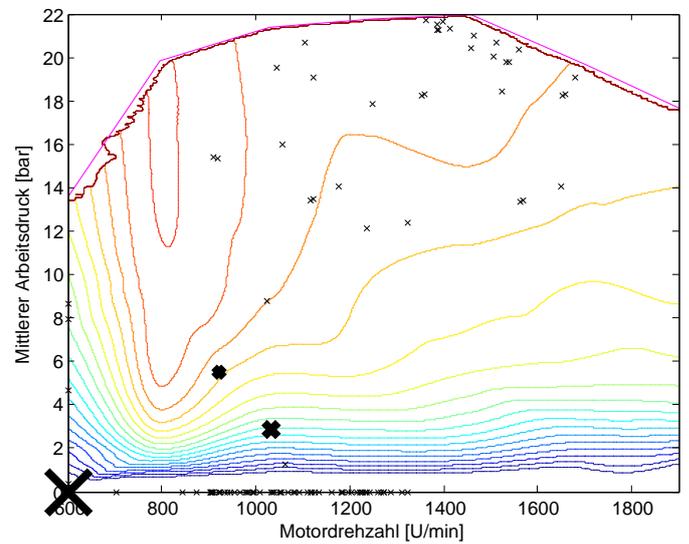
(a) Schaltstrategie 'normal', beladen, NEFZ-Stadt original



(b) Schaltstrategie 'normal', beladen, NEFZ-Stadt angepasst

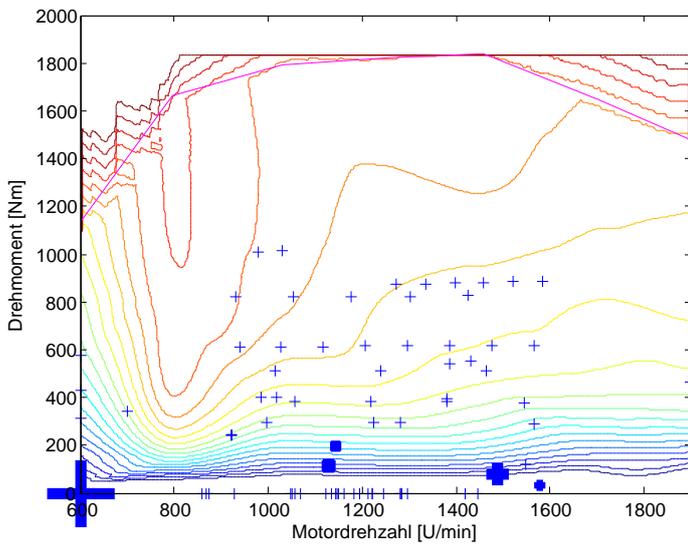


(c) Schaltstrategie Eco, beladen, NEFZ-Stadt original

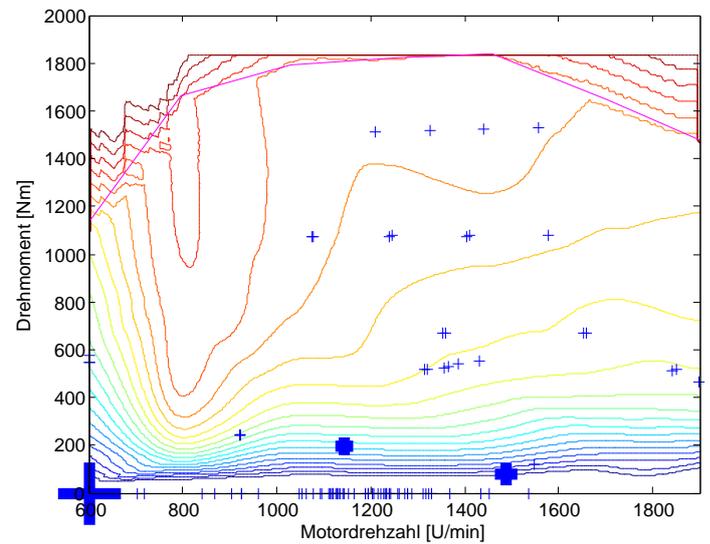


(d) Schaltstrategie Eco, beladen, NEFZ-Stadt angepasst

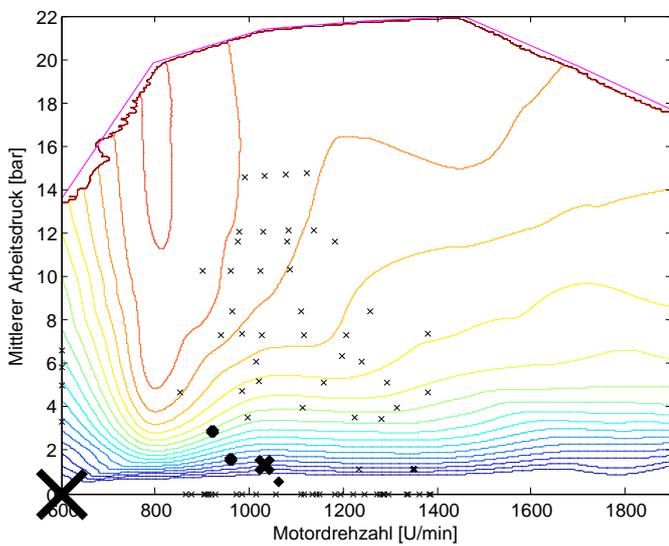
Abbildung 3.25: Verbrauchskennfelder des 40t Euro 3 Lastwagens. Vorausschauendes Fahren



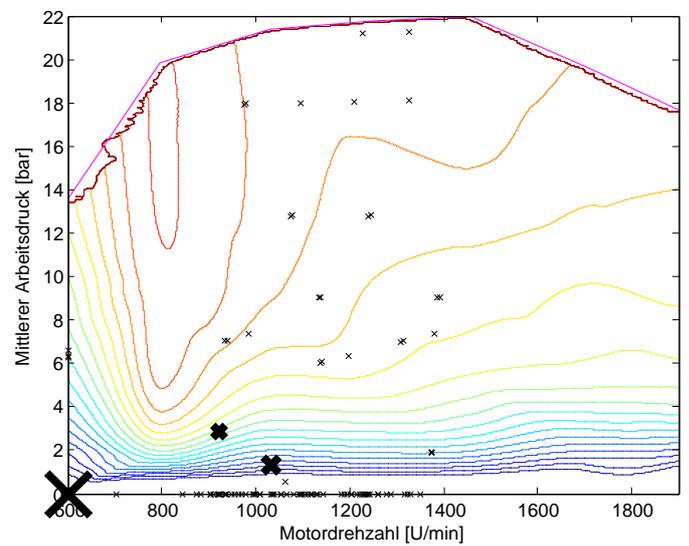
(a) Schaltstrategie 'normal', leer, NEFZ-Stadt original



(b) Schaltstrategie 'normal', leer, NEFZ-Stadt angepasst

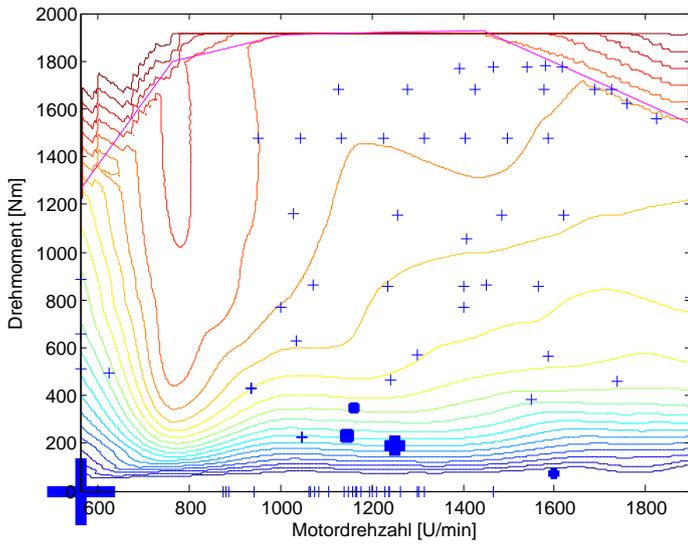


(c) Schaltstrategie Eco, leer, NEFZ-Stadt original

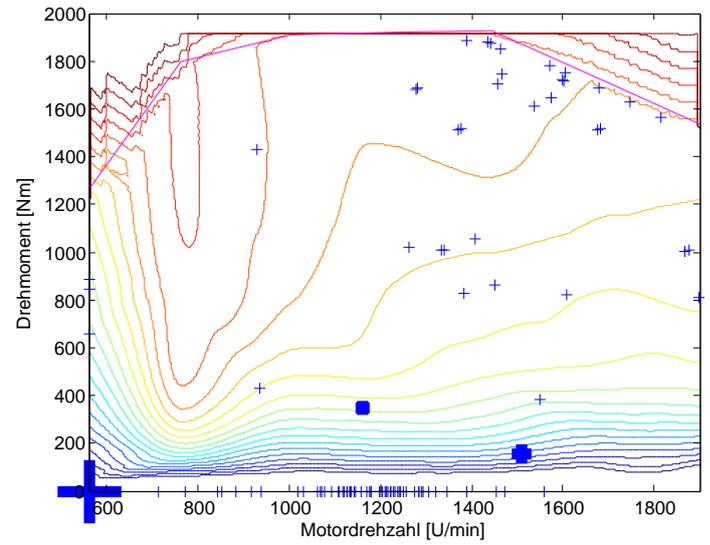


(d) Schaltstrategie Eco, leer, NEFZ-Stadt angepasst

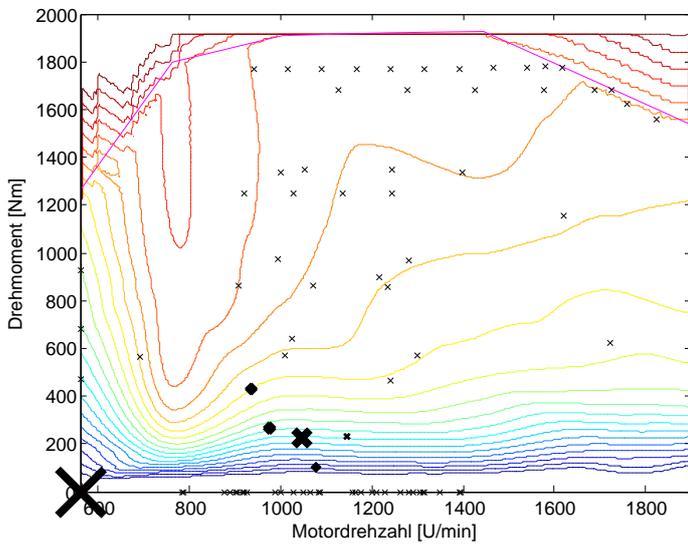
Abbildung 3.26: Verbrauchskennfelder des 40t Euro 3 Lastwagens. Vorausschauendes Fahren forts.



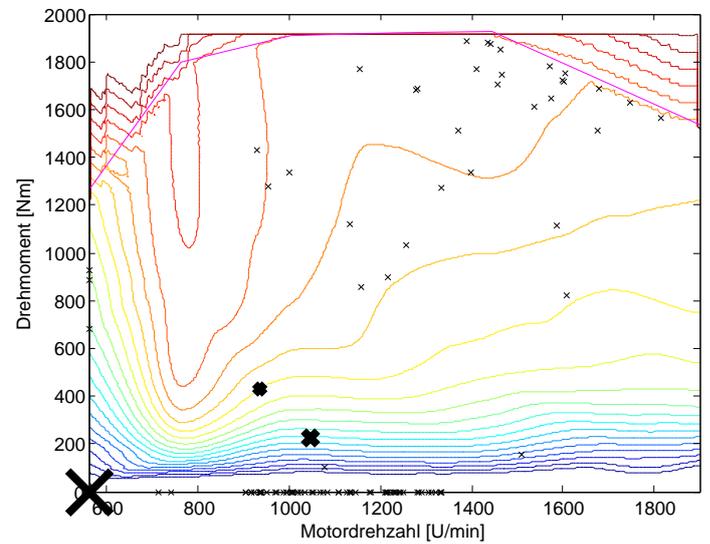
(a) Schaltstrategie 'normal', beladen, NEFZ-Stadt original



(b) Schaltstrategie 'normal', beladen, NEFZ-Stadt angepasst

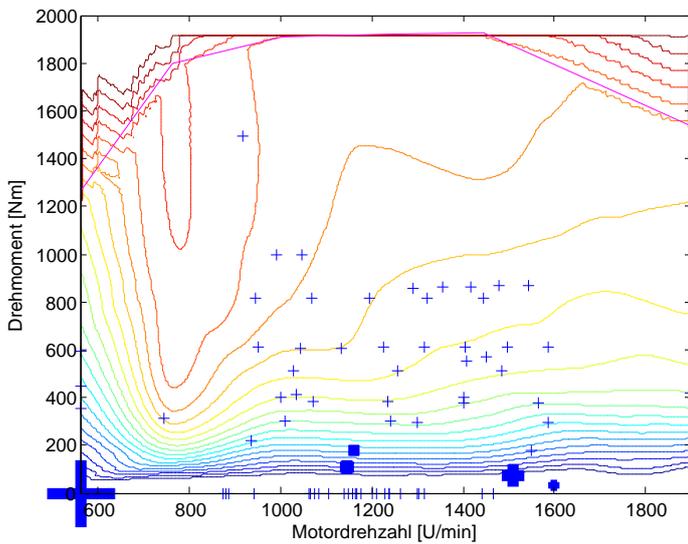


(c) Schaltstrategie Eco, beladen, NEFZ-Stadt original

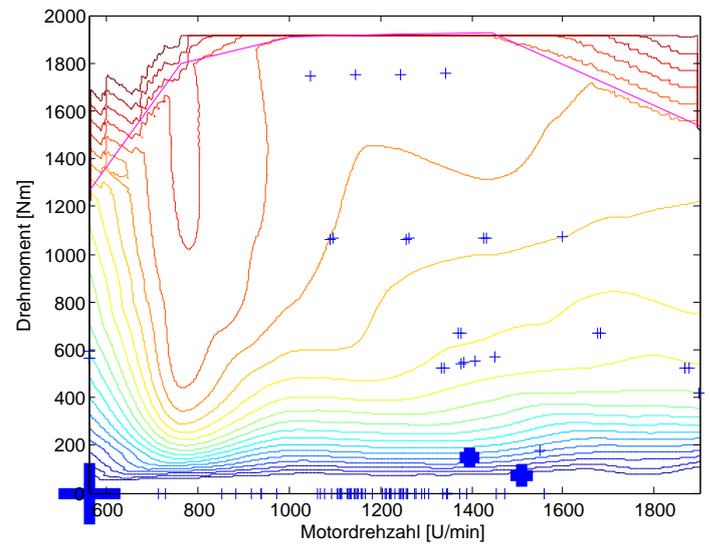


(d) Schaltstrategie Eco, beladen, NEFZ-Stadt angepasst

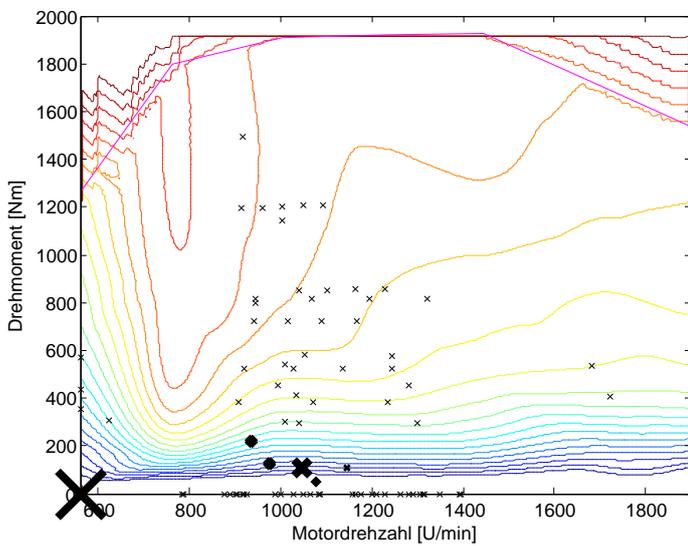
Abbildung 3.27: Verbrauchskennfelder des Euro 3 Sattelschleppers. Vorausschauendes Fahren



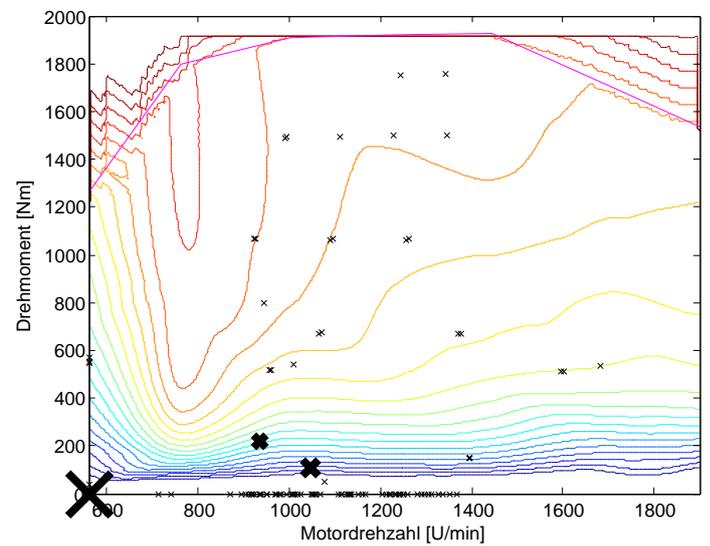
(a) Schaltstrategie 'normal', leer, NEFZ-Stadt original



(b) Schaltstrategie 'normal', leer, NEFZ-Stadt angepasst

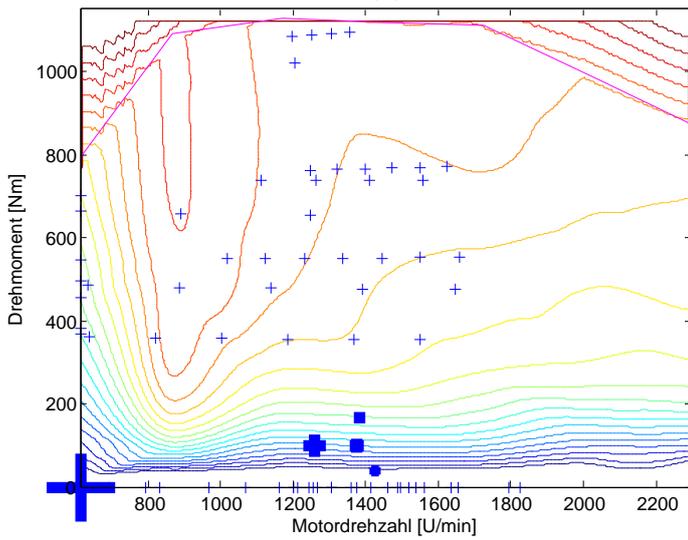


(c) Schaltstrategie Eco, leer, NEFZ-Stadt original

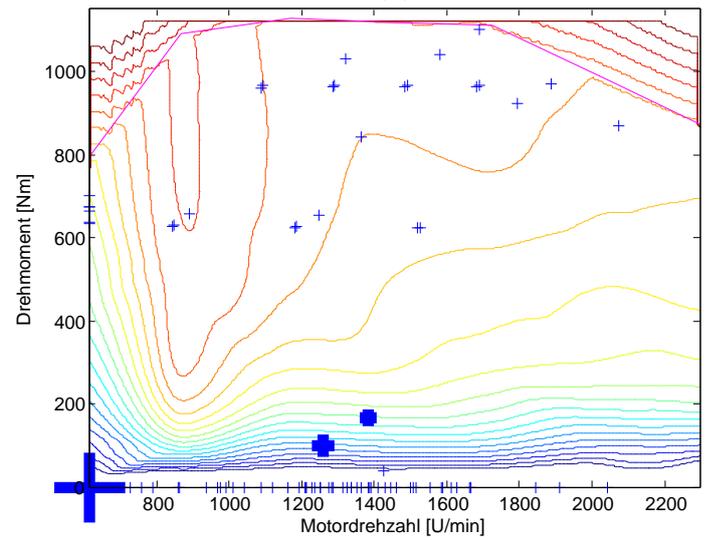


(d) Schaltstrategie Eco, leer, NEFZ-Stadt angepasst

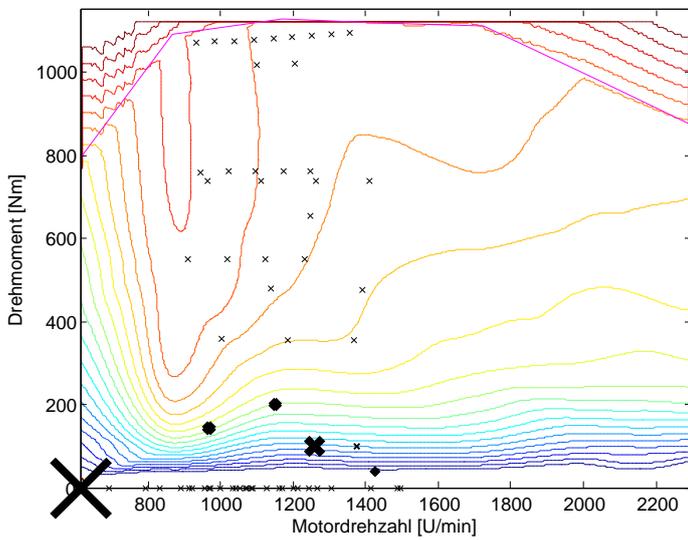
Abbildung 3.28: Verbrauchskennfelder des Euro 3 Sattelschleppers. Vorausschauendes Fahren forts.



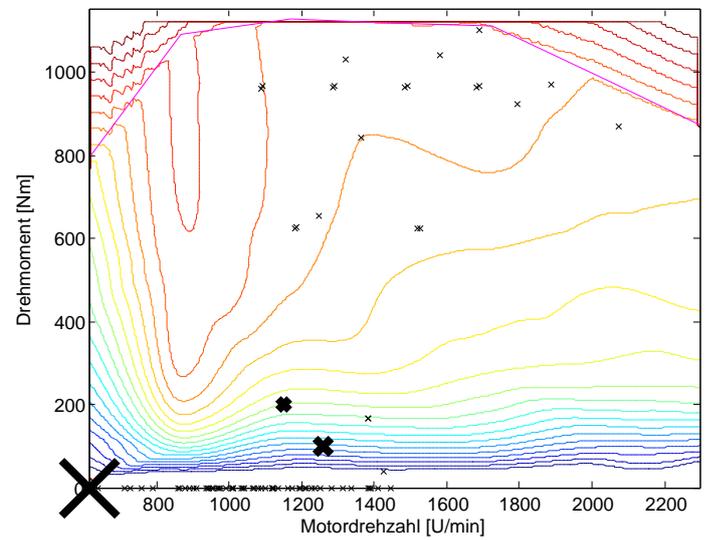
(a) Schaltstrategie 'normal', beladen, NEFZ-Stadt original



(b) Schaltstrategie 'normal', beladen, NEFZ-Stadt angepasst

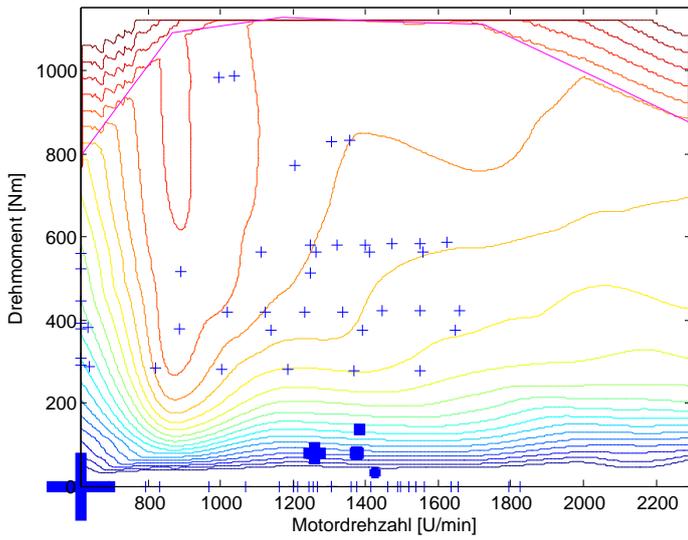


(c) Schaltstrategie Eco, beladen, NEFZ-Stadt original

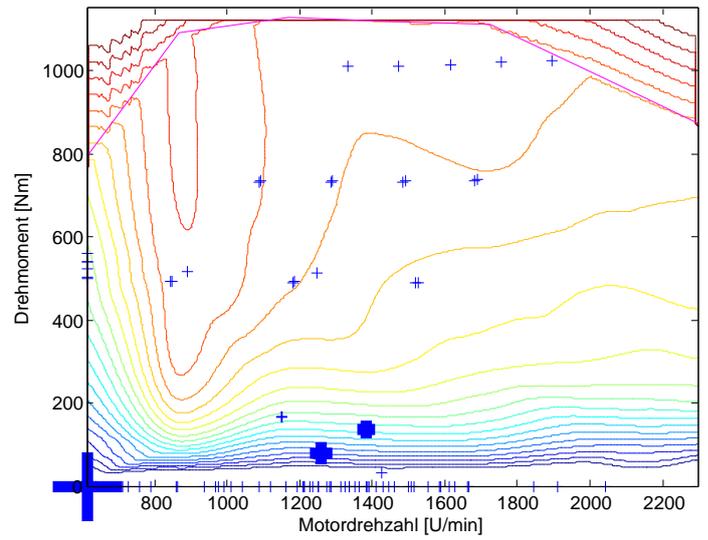


(d) Schaltstrategie Eco, beladen, NEFZ-Stadt angepasst

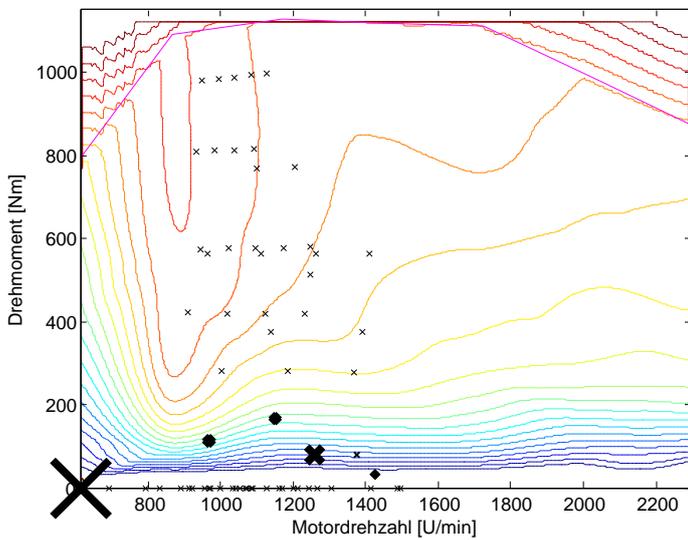
Abbildung 3.29: Verbrauchskennfelder des Euro 3 Buses. Vorausschauendes Fahren



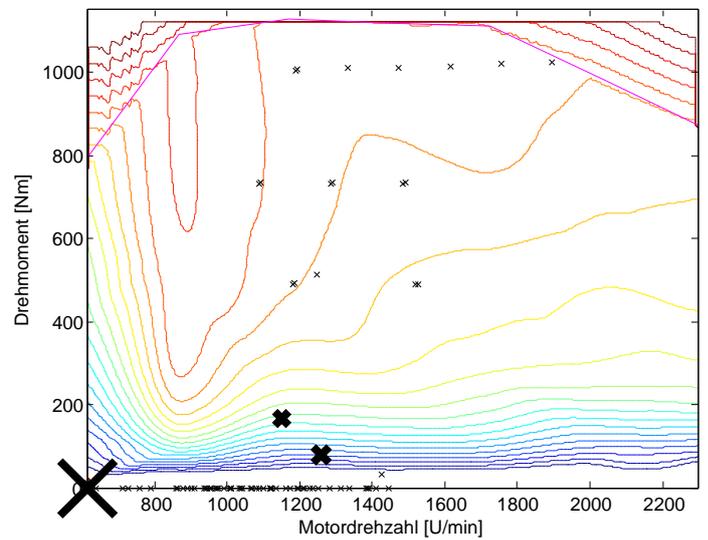
(a) Schaltstrategie 'normal', leer, NEFZ-Stadt original



(b) Schaltstrategie 'normal', leer, NEFZ-Stadt angepasst



(c) Schaltstrategie Eco, leer, NEFZ-Stadt original



(d) Schaltstrategie Eco, leer, NEFZ-Stadt angepasst

Abbildung 3.30: Verbrauchskennfelder des Euro 3 Buses. Vorausschauendes Fahren  
forts.

### 3.3 Kombination Schaltverhalten und vorausschauendes Fahren

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie gross die Einsparungen sind, wenn man ein vorausschauendes Fahrverhalten und ein Eco-Drive Schaltverhalten kombiniert. Zuerst werden die Einsparungen durch das Schaltverhalten an dem NEFZ - Stadtteil betrachtet. Danach die Kombination der beiden Massnahmen.

#### 3.3.1 Einsparungen durch Eco-Drive Schaltverhalten beim NEFZ - Stadtteil

Einsparung [%]			18t Lastwagen	40t Lastwagen	Sattelschlepper	Bus
NEFZ - Stadtteil	original	beladen	8.4	3.1	3.7	14.6
NEFZ - Stadtteil	original	leer	11.7	11.1	9.8	14.2
NEFZ - Stadtteil	angepasst	beladen	6.7	1.4	4.7	9.8
NEFZ - Stadtteil	angepasst	leer	12.3	11.4	11.2	10.2

Tabelle 3.23: Einsparungen durch Eco-Drive Schaltverhalten beim NEFZ - Stadtteil

Verglichen mit den Werten aus Kapitel 3.1 (Einsparungen durch das Schaltverhalten) sind die möglichen Einsparungen mit dem Schaltverhalten hier eher gross.

#### 3.3.2 Kombination beider Massnahmen

##### NEFZ Stadt

Einsparung [%]	beladen	leer
Lastwagen 18t	14.0	21.1
Lastwagen 40t	8.4	19.0
Sattelschlepper	8.2	17.7
Bus	18.3	17.9

Tabelle 3.24: Kombination Schaltverhalten mit vorausschauendem Fahren beim NEFZ - Stadtteil

## Überland

Einsparung [%]	beladen	leer
Lastwagen 18t	10.8	12.5
Lastwagen 40t	8.9	15.2
Sattelschlepper	8.8	14.7
Linienbus	9.8	11.3

Tabelle 3.25: Kombination Schaltverhalten mit vorausschauendem Fahren Überland

## Autobahn

Auf der Autobahn besteht weder für ein vorausschauendes Fahren noch für ein Eco-Drive Schaltverhalten ein Treibstoffeinsparpotential.

## 3.4 Entfernung von unnötigem Ballast

Mit dem Modell des 18t Lastwagens wurde untersucht, wie hoch die Treibstoffeinsparung ist, wenn die Beladung von 10 t (voll beladen) um 5 % auf 9.5 t verringert wird. Verbrauch Autobahn mit Ballast: 30.0 l/100km Verbrauch Autobahn ohne Ballast: 29.6 l/100km Das entspricht einer Verbrauchseinsparung von 1.3 % auf der Autobahn. Verbrauch Stadt mit Ballast: 51.5 l/100km Verbrauch Stadt ohne Ballast: 50.7 l/100km Das entspricht einer Verbrauchseinsparung von 1.4 % in der Stadt.

## 3.5 Pneudruck

Der Kraftstoffverbrauch eines Lastwagens wird mit einem korrekten Pneudruck (nach Hersteller) simuliert und einmal mit einem Druck der 10% darunter liegt. Die Daten über die Rollwiderstandsbeiwerte wurden aus dem Datenmaterial der Firma Goodyear entnommen. Auf einen Vergleich mit anderen Herstellern wird verzichtet.

Aus den Daten von Goodyear wurde entnommen, dass ein Minderdruck im Pneu von 10 % den Rollwiderstand um 4 % erhöht.

**Autobahn** Der Verbrauch auf der Autobahn mit idealem Pneudruck beträgt 21.4 l/100km. Mit einem Minderdruck von 10 % 21.7 l/100km. Dies entspricht einem Treibstoffmehrverbrauch von 1.1 %.

**Stadt** In der Stadt beträgt der Treibstoffverbrauch mit idealem Pneudruck 25.4l/100km. Mit 10 % Minderdruck 25.6 l/100km. Dies entspricht einem Treibstoffmehrverbrauch von 0.8 %.

# Kapitel 4

## Diskussion

Das Einsparpotential durch Eco-Drive Massnahmen variiert stark je nach Einsatzgebiet des Fahrzeuges.

Die grössten Einsparungen resultieren in der Stadt. Das Potential durch Eco-Drive Schaltverhalten beträgt 6 % (beladenes Fahrzeug) bis 10.8 % (leeres Fahrzeug). Durch vorausschauendes Fahren 5 % (beladenes Fahrzeug) bis 10 % (leeres Fahrzeug). Das vorausschauende Fahren wurde durch Anpassungen des NEFZ Stadtteils modelliert. Die Ergebnisse werden als oberes Limit des technisch Möglichen angesehen. In der Stadt wurde die Kombination der beiden Massnahmen, Schaltverhalten und vorausschauendes Fahren, durch Simulationen mit dem NEFZ - Stadtteil untersucht. Das erhaltene Ergebnis ist hoch. Es liegt zwischen 8.2 % (beladenes Fahrzeug) und 21.1 % (leeres Fahrzeug, gut Motorisiert). Auch dieses Ergebnis kann als oberes Limit des technisch Möglichen angesehen werden.

Auf Überlandstrecken beträgt das Einsparpotential durch ein Eco-Drive Schaltverhalten etwa gleich viel wie in der Stadt. Es beträgt zwischen 5.8 % und 9.1 % für Lastwagen. Durch das Glätten von Überlandzyklen wurde das Einsparpotential, von den Stadtzyklen, auf Überlandzyklen übertragen. Das Einsparpotential für Lastwagen liegt zwischen 2.3 % und 6.5 %. In der Kombination ergibt sich ein Einsparpotential zwischen 8.8 % (beladen) und 15.2 % (leer).

Auf der Autobahn ist weder durch ein Eco-Drive Schaltverhalten noch durch vorausschauendes Fahren ein Einsparpotential festzustellen.

Auf Bergfahrten wurde ein Einsparpotential durch Eco-Drive Schaltverhalten, zwischen 0.6 % (beladenes Fahrzeug) und 2.9 % (leeres Fahrzeug) verzeichnet.

Für den Linienbus liegt das Einsparpotential durch Eco-Drive Schaltverhalten zwischen 7 % (Überland) und 17 % (Stadt). Für Vorausschauendes Fahren wurde ein Einsparpotential zwischen 4.3 % und 8.5 % in der Stadt gefunden, und 4 % Überland. In der Kombination ergibt sich für den Linienbus ein Einsparpotential von 10 % auf Überlandstrecken und 18 % in der Stadt. Auf der Autobahn ist für den Bus kein Einsparpotential zu verzeichnen.

Es wurde untersucht, wie sich das Mitführen von unnötigem Ballast auf den Treibstoffverbrauch auswirkt. Durch das Entfernen von 5 % der vollen Beladung kann ca 1.4 % Treibstoff gespart werden.

Es wurde untersucht, wie sich ein suboptimaler Pneudruck auf den Treibstoffverbrauch auswirkt. Durch einen Minderdruck, von 10 % des Idealdruckes, ergibt sich ein Treibstoffmeherverbrauch von 1 %.

Die Simulationsstudie hat gezeigt, dass ein technisches Einsparpotential für Verbrauch durch Eco-Drive Massnahmen vorhanden ist. Die Simulation hat auch gezeigt, dass das Einsparpotential sehr stark vom Einsatzgebiet des Fahrzeuges abhängt. Auf der Autobahn ist kein Einsparpotential vorhanden, wohingegen das Einsparpotential mit leerem Fahrzeug in der Stadt dem eines Personenwagens entspricht.

Die Simulationen stecken einen breiten Einsatzbereich von Nutzfahrzeugen ab. Um auf ein durchschnittliches Einsparpotential hochzurechnen, muss abgeschätzt werden, welche Einsatzbereiche wie stark vertreten sind.

## Kapitel 5

# Danksagung

Ich möchte mich bei Markus Dettwyler von Goodyear Dunlop Tires Suisse SA und Martin Probst von MAN Nutzfahrzeuge Schweiz für die erhaltenen Daten bedanken. Bedanken möchte ich mich auch bei Martin Weilemann für interessante Gespräche. Ein ganz besonderer Dank gilt Martin Rexeis von der Technischen Universität Graz für den bereitwilligen und freundlichen Datenaustausch.

# Anhang A

## Fahrzeugdaten

### A.1 Lastwagen 18t

```
% Daten für den 18t Lastwagen

% Combustion Engine (Consumption Map)
% -----
scale_CE = 1; % Engine scaling factor [-] - by default
P_nenn = 206; % [kW] Nennleistung - MAN
theta_CE = 0.012*P_nenn; % [kg*m^2/kW * kW] - COST 346 WG A p102
n_nenn_rpm = 2300; % [rpm] Nenndrehzahl - MAN
n_idle_rpm = 600; % [rpm] Engine speed at idle - MAN
V_h = 6.871e-3; % [m^3] Displacement - MAN: Prüfungsbericht

P_aux = 0.025 * P_nenn * 1000; % Power required by auxiliaries [W]
% - von DACH/HBEFA Endbericht übernommen

% Drehmomentkennlinie
w_CE_max = [ 750 1050 1125 1200 1500 ...
1650 1800 1950 2100 2400]; % w_CE_max [rad/s] von MAN
T_CE_max = [ 800 910 1000 1100 1100 ...
1100 1080 1010 920 810]; % T_CE_max [Nm] - MAN

w_CE_min_max_P = w_CE_max(4);

% Vehicle
% -----
m_zul = 18000; % zulässiges Gesamtgewicht [kg] MAN
% Leergewicht: 8000kg Beladung 10000Kg
m_leer = 8000; % [kg] MAN
m_bel = 10000; % [kg] MAN
A_f = (.99+2.51)*2.48; % Vehicle cross section [m^2] MAN
d_wheel = 1.064; % Wheel diameter [m] MAN
cw = 0.5; % Drag coefficient [-] - DACH/HBEFA Endbericht
mu = 0.01; % Rolling friction coefficient [-]
% - DACH/HBEFA Endbericht S.35

% Manual Gear Box
% -----
gamma = [12.57 ...
8.75 ...
4.73 ...
3.53 ...
2.48 ...
1.85 ...
1.34 ...
1]; % Gear Ratios 1 to n [-] (row vector) - MAN
```

```

i_diff = 3.7; % Differential gear [-] - MAN
e_GT = 0.954; % Efficiency [-] - Aus COST 346 WG A p 49
% Figure 29 herausgelesen
P_GT0 = 0.004*P_nenn*1000; % idling losses (friction) [W]
% - Aus COST 346 WG A p 49 Figure 29
% herausgelesen

% HD Eco Driver
% -----
w_eco_max_rpm = 1500; % Engine speed gear up [rpm] von der QAED Broschüre
w_eco_min_rpm = 900; % Engine speed gear down [rpm]

% HD normal Driver
% -----
w_normal_max_rpm = 1800; % Engine speed gear up [rpm] -> MANEX Codekatalog.
% Motordrehzahl mit grösstem Drehmoment
w_normal_min_rpm = 1200; % Engine speed gear down [rpm]

```

## A.2 Lastwagen 40t

```
% Daten für den Lastwagen 40t
```

```

% Combustion Engine (Consumption Map)
% -----
scale_CE = 1; % Engine scaling factor [-] - by default
P_nenn = 294; % [kW] Nennleistung
theta_CE = 0.012 * P_nenn; % [kg*m^2/kW * kW] Engine inertia
% - COST 346 WG A p 102
n_nenn_rpm = 1900; % [rpm] Nenn Drehzahl - MAN
n_idle_rpm = 600; % [rpm] Engine speed at idle - MAN
V_h = 10.52e-3; % [m^3] Displacement - MAN
w_CE_idle = n_idle_rpm * 2 * pi / 60; % [rpm] --> [rad/s]
P_aux = 0.015 * P_nenn * 1000; % Power required by auxiliaries [W]
% - COST 346 p.105

% Vehicle
% -----
m_zul = 40000; % [kg] zul gesamt Gewicht
m_leer = 15000; % [kg] Leergewicht
% -> COST 346WG A p101
m_bel = 25000; % [kg] Beladung
A_f = 8; % Vehicle cross section [m^2]
% -> COST 346WG A p103
d_wheel = 1.064; % Wheel diameter [m] 22.5" Reifen
cw = 0.66; % Drag coefficient [-]
% -> COST 346 WG A p103
mu = 0.00607; % Rolling friction coefficient [-]
% -> COST 346 WG A p105
m_wheel = 20.9 * m_zul / 1000; % [kg] -> COST 346 WG A p102 table 28
m_gearbox = 0.001 * P_nenn / r_wheel^2; % [kg] -> COST 346 WG A p102 table 28
mt2m_f = (m_wheel + m_gearbox)/m_f; % Rotating mass [-]

```

```
% Manual Gear Box
```

```

% -----
gamma = [13.8...
         11.55...
         9.59...
         8.02...
         6.81...
         5.7...
         4.58...
         3.84...
         3.01...

```

```

2.52...
2.09...
1.75...
1.49...
1.24...
1 ...
0.84];          % Gear Ratios 1 to n [-] (row vector) 16 gang Getriebe
                % für 400PS Fahrzeug DACH_SNF_Endbericht_2
                % p 16
i_diff = 3.7;   % Differential gear [-]
                % - DACH_SNF_Endbericht_2 p 16
e_GT = 0.954;   % Efficiency [-] - Aus COST 346 WG A p 49
                % Figure 29 herausgelesen
P_GTO = 0.005*P_nenn*1000; % idling losses (friction) [W] - Rexeis (P0: Zeile 27)
w_wheel_min = 1; % Minimum wheel speed beyond losses
                % are generated [rpm] geraten

% HD Eco Driver
% -----
w_eco_max_rpm = 1400; % Engine speed gear up [rpm] von der QAED Broschüre
                    % abgeändert, da maximales Drehmoment bis
                    % zu einer Drehzahl von 1400 rpm verfügbar
                    % ist.
w_eco_min_rpm = 900; % Engine speed gear down [rpm]

% HD normal Driver
% -----
w_normal_max_rpm = 1600; % Engine speed gear up [rpm] eigene Schätzung
                        % das maximale Drehmoment hätte der Motor
                        % bis zu einer Drehzahl von 1400rpm. Die
                        % Leistung bleibt ca. const. bis 1900rpm
w_normal_min_rpm = 1100; % Engine speed gear down [rpm]

```

## A.3 Sattelschlepper

```
% Daten für den Sattelschlepper
```

```

% Combustion Engine (Consumption Map)
% -----
scale_CE = 1; % Engine scaling factor [-] - by default
P_nenn = 305; % [kW] Nennleistung - von der TUG
theta_CE = 0.012*P_nenn; % [kg*m^2/kW * kW] - COST 346 WG A p102
n_nenn_rpm = 1900; % [rpm] Nenndrehzahl - von der TUG
n_idle_rpm = 560; % [rpm] Engine speed at idle - von der TUG
P_aux = 0.025 * P_nenn * 1000; % Power required by auxiliaries [W]

% Vehicle
% -----
m_zul = 40000; % zulässiges Gesamtgewicht [kg]
            % Leergewicht: 15100kg Beladung 24900kg
m_leer = 15100; % [kg] - von der TUG
m_bel = 24900; % [kg]
A_f = 9; % Vehicle cross section [m^2] - von der TUG
d_wheel = 1.035; % Wheel diameter [m]
cw = 0.5; % Drag coefficient [-] - DACH/HBEFA Endbericht
mu = 0.00581; % Rolling friction coefficient [-]
            % - von der TUG

% Manual Gear Box
% -----
gamma = [13.8...
        11.55...
        9.59...

```

```

8.02...
6.81...
5.7...
4.58...
3.84...
3.01...
2.52...
2.09...
1.75...
1.49...
1.24...
1 ...
0.84];
i_diff = 3.65; % Gear Ratios 1 to n [-] (row vector) - von der TUG
e_GT = 0.954; % Differential gear [-] - von der TUG
% Efficiency [-] - Aus COST 346 WG A p 49
% Figure 29 herausgelesen
P_GTO = 0.005*P_nenn*1000; % idling losses (friction) [W] - von der TUG (PO: Zeile 27)

```

```

% HD Eco Driver
% -----
w_eco_max_rpm = 1400; % Engine speed gear up [rpm] von der QAED Broschüre
w_eco_min_rpm = 900; % Engine speed gear down [rpm]

```

```

% HD normal Driver
% -----
w_normal_max_rpm = 1600; % Engine speed gear up [rpm]
% Motordrehzahl mit grösstem Drehmoment
w_normal_min_rpm = 1100; % Engine speed gear down [rpm]

```

## A.4 Bus

```
% Daten für den Stadtbus ca. 50 Personen
```

```

% Combustion Engine (Consumption Map)
% -----
scale_CE = 1; % Engine scaling factor [-] - by default
P_nenn = 210; % [kW] Nennleistung - Rexeis
theta_CE = 0.012*P_nenn; % [kg*m^2/kW * kW] - COST 346 WG A p102
n_nenn_rpm = 2297; % [rpm] Nenndrehzahl - Rexeis
n_idle_rpm = 612; % [rpm] Engine speed at idle - Rexeis
% V_h = ; % [m^3] Displacement - : Prüfungsbericht
w_CE_idle = n_idle_rpm * 2 * pi / 60; % [rpm] --> [rad/s]
% P_CE_idle = X; % Engine power at idle [W]
% - siehe Kennfeld_euro3_f_TGM18_280
P_aux = 0.04 * P_nenn * 1000; % Power required by auxiliaries [W]
% - von Rexeis Zeile 27

```

```

% Vehicle
% -----
m_zul = 18000; % zulässiges Gesamtgewicht [kg]
% Leergewicht: 15100kg Beladung 24900kg
m_leer = 10400; % [kg] - Rexeis
m_bel = 3700; % [kg]
A_f = 6.5; % Vehicle cross section [m^2] - Rexeis
d_wheel = 1; % Wheel diameter [m]
cw = 0.58; % Drag coefficient [-] - DACH/HBEFA Endbericht
mu = 0.006521; % Rolling friction coefficient [-]
% - Rexeis

```

```

% Manual Gear Box
% -----
gamma = [ 3.43...
2.01...
1.42...
1.00...

```

```
        0.83];           % Gear Ratios 1 to n [-] (row vector) - Rexeis
i_diff = 5.216;        % Differential gear [-] - Rexeis
e_GT = 0.93 / 1.15;    % Efficiency [-] - Aus COST 346 WG A p 49
                        % Figure 29 herausgelesen
P_GTO = 0.004*P_nenn*1000; % idling losses (friction) [W]
                        % - Aus COST 346 WG A p 49 Figure 29

% HD Eco Driver
% -----
w_eco_max_rpm =1500;   % Engine speed gear up [rpm] von der QAED Broschüre
w_eco_min_rpm = 900;   % Engine speed gear down [rpm]

% HD normal Driver
% -----
w_normal_max_rpm =1700; % 1842;   % Engine speed gear up [rpm]
w_normal_min_rpm =1300; %1471;   % ngine speed gear down [rpm]
```

# Literaturverzeichnis

- [1] P. J. STURM, S. HAUSBERGER: *Energy and Fuel Consumption From Heavy Duty Vehicles, COST 346 - Final Report*. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology, 2005.
- [2] D. AMBÜHL, A. SCHLITER: *Auswirkungen von Eco-Drive bei Fahrzeugen im Jahr 2010*. Institut für Mess- und Regeltechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich, 2003.
- [3] L. GUZZELLA, A. AMSTUTZ: *The QSS Toolbox Manual*. Institut für Mess- und Regeltechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich, 2005.
- [4] F. VARONE, Y. FLÜCKIGER: *Expertise 'Wirkungsberechnung Eco-Drive'*. Faculté des sciences économiques et sociales, Université de Genève, 2007.
- [5] L. GUZZELLA, CH. ONDER: *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer Verlag, Berlin, Germany, 2004.
- [6] L. GUZZELLA, A. SCIARRETTA: *Vehicle Propulsion Systems - Introduction to Modeling and Optimization*. Springer Verlag, Berlin, Germany, 2007.
- [7] P. SOLTIC: *On Road Measurements, Test Bench Measurements and Emission Simulations for a Tractor-Semitrailer in Trans-Alpine Operation*. EMPA Research Report No.200103. Dübendorf, 2004.
- [8] Broschüre: *Geben Sie richtig Gas*. Quality Alliance Eco-Drive