

## Segeln macht Spaß, sogar beim Autofahren.

Egal ob Segelboot oder Segelflugzeug, Segeln fasziniert. Es ist die Fortbewegung ohne eigenen Energieaufwand, lautlos und ohne Abgase, was die Menschen schon immer in ihren Bann zog.



Auch Fortbewegungsmittel mit Rädern können Segeln.



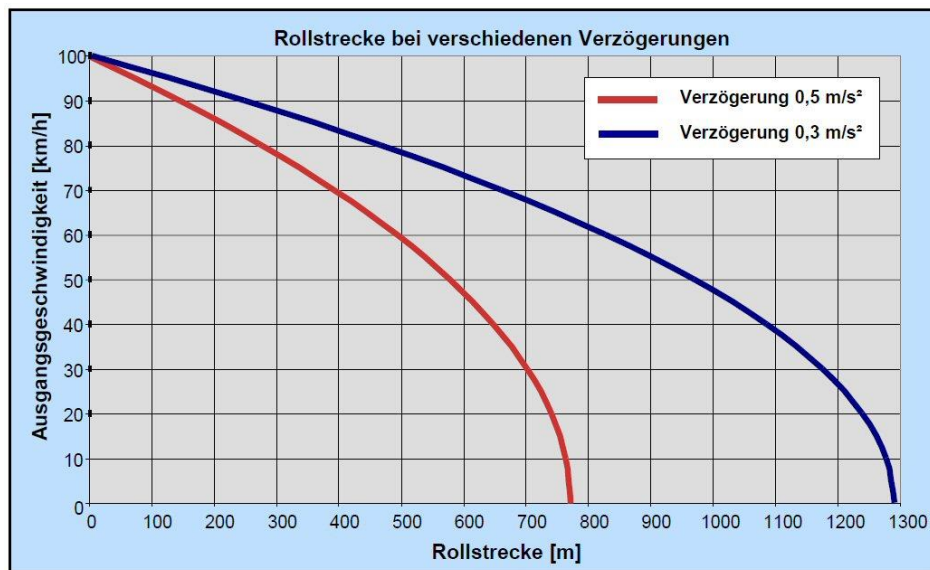
Das müssen nicht unbedingt Strandsegler sein. Auch Radfahrer wissen Bescheid. Die beste Erfindung am Fahrrad ist - neben der Kette - der Freilauf. Hört der Rad fahrende Mensch auf zu treten, segelt er. Man stelle sich vor, man müsse ständig mitretten, auch bergab und um die Kurven. Das wäre ganz schön anstrengend und würde das Vorankommen behindern. Auf einen Freilauf zu verzichten, das können nur Bahnradfahrer und Lebensmüde auf ihren Fixies. Sie verzichten sogar auf Schaltung und Bremsen, und verlangsamen das Gefährt, indem sie mit den Beinmuskeln dagegenhalten. Auf öffentlichen Straßen ein lebensgefährlicher Unfug.

Im Automobil hat man Schaltungen und Bremsen, aber keinen Freilauf. Warum eigentlich nicht? Frage:

**„Womit wird mehr kinetische Energie vernichtet, mit dem Gaspedal oder dem Bremspedal?“**

Aus der Fragestellung ist unschwer zu erkennen, dass das Gaspedal gemeint ist. Nimmt man dem Motor Leistung weg, die er zum Vortrieb benötigt, dann bremst er. Wer einmal die Bremswirkung des Verbrennungsmotors erleben möchte, muss nur die Kupplung treten oder den Gang herausnehmen. Dann segelt das Fahrzeug, nur gebremst von Luft und Rollwiderstand. Ziemlich überrascht wird

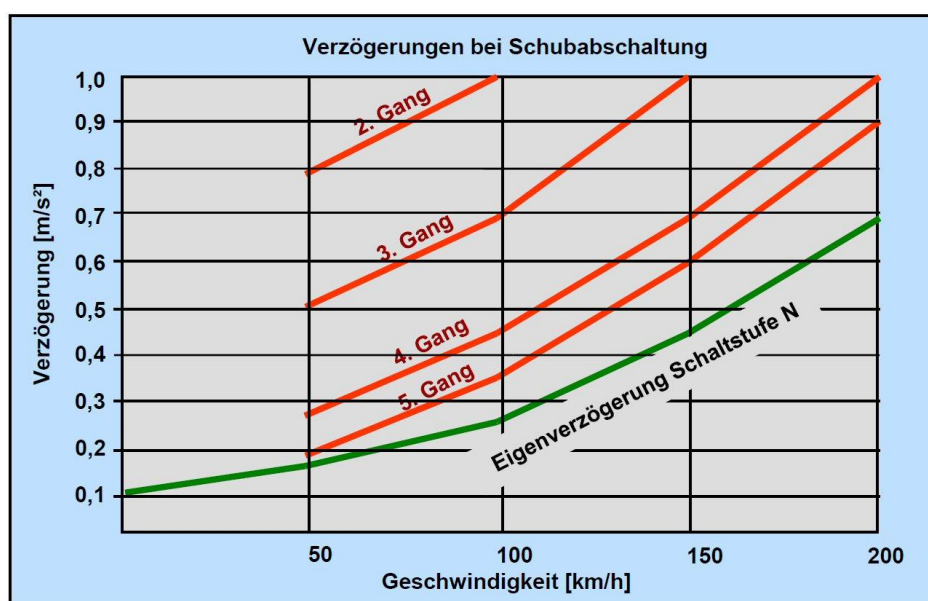
man feststellen, wie langsam sich die Geschwindigkeit abbaut und wie weit der Wagen rollt, wenn der Verbrennungsmotor nicht an der Bremswirkung beteiligt ist.



Das Diagramm soll verdeutlichen, wie stark sich kleinste, kaum spürbare Unterschiede in der Verzögerung auf die Rollstrecke auswirken. Wenn das rote Fahrzeug bereits steht, bewegt sich das blaue Fahrzeug immer noch mit einer Geschwindigkeit von mehr als 60 km/h. Der Unterschied in der Verzögerung beträgt lediglich 0,2 m/s².

### Der Viertaktmotor, eine Luftpumpe

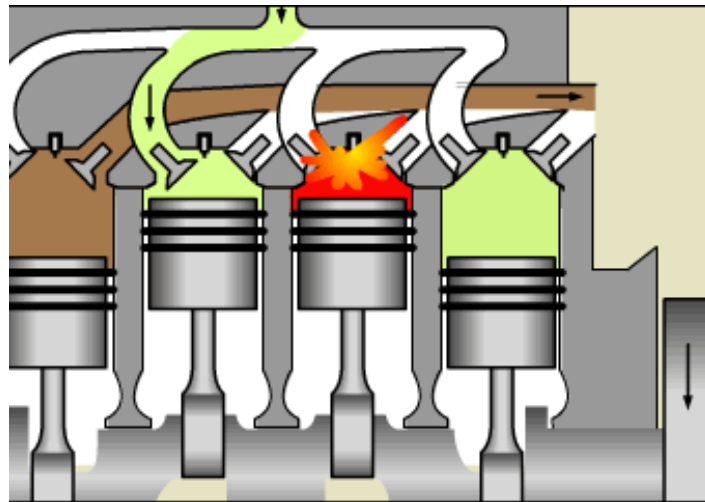
Wieviel Bremswirkung der Motor im Schleppebetrieb erzeugt, hängt von verschiedenen Faktoren ab: Motorprinzip, Hubraum, Steuerzeiten, Nebenaggregate, innere Reibung usw. Natürlich auch vom eingelegten Gang.



Das Diagramm erhebt keinen Anspruch auf allgemeine Gültigkeit, es soll nur das Prinzip verdeutlichen. Es zeigt exemplarisch die Eigenverzögerung in Schaltstufe N und die Verzögerungen mit Motorschleppmoment in den verschiedenen Gängen. Grün ist gleichbedeutend mit Segeln, Rot ist die Verzögerung bei Fahrpedalstellung Null im jeweiligen Gang.

Worauf beruht eigentlich die Bremswirkung im Schleppbetrieb? Das Motorbremsmoment setzt sich zusammen aus Luftdurchsatz und innerer Reibung. An der Reibung von Kolben und Kurbelwelle wird seit jeher heftig gearbeitet, mit großem Erfolg. Die Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch sind enorm. Dagegen war der Luftdurchsatz im passiven Betrieb bisher nur in Einzelfällen Gegenstand von Entwicklungen.

Im Schleppbetrieb wird aus dem Verbrennungsmotor eine Luftpumpe.

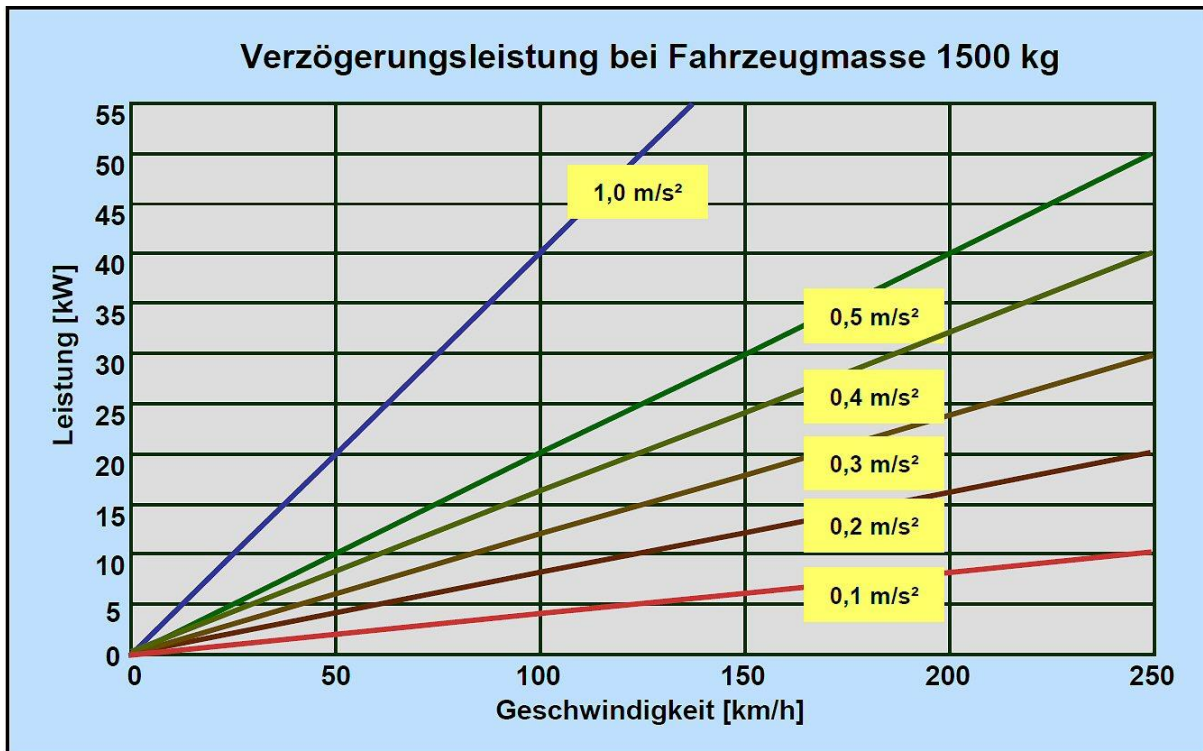


Die Abbildung zeigt den Normalbetrieb, der bis auf die Zündung dem Schleppbetrieb entspricht. Der Motor saugt Luft an, verdichtet sie, entspannt sie und stößt sie wieder aus. Verdichtung und Entspannung sind energieneutral. Die im Zylinder vorhandene Luft wirkt wie eine Feder, lediglich ein geringer Teil an Energie geht durch Wärmeübertragung verloren. Ansaugen und Ausstoßen kosten Leistung und Energie. Je größer der Durchsatz, desto mehr Energie geht verloren. Die Energie steckt dann in der ausgestoßenen Luft als Wärmeenergie.

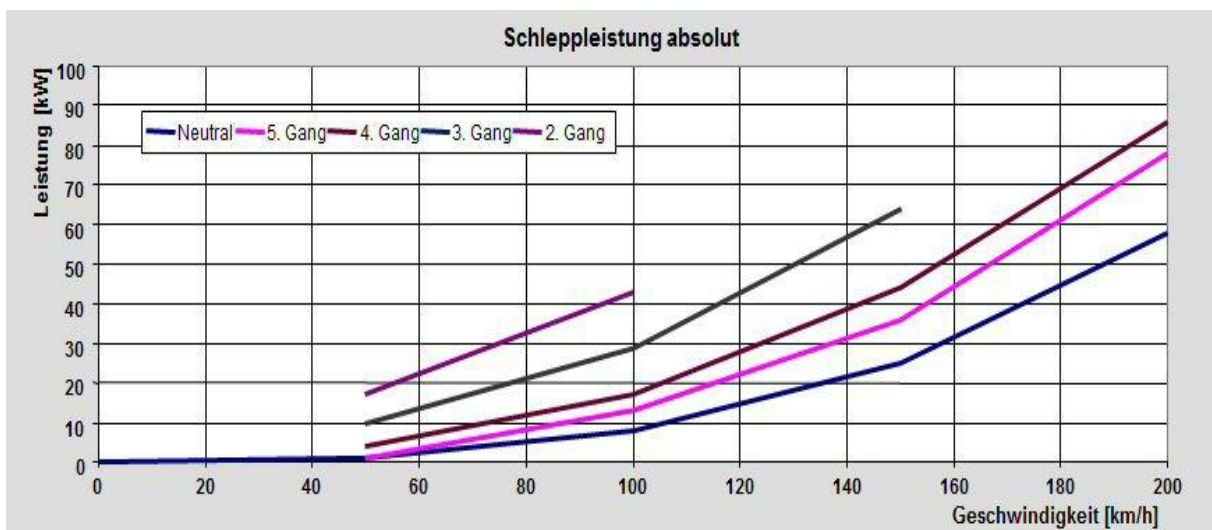
Je größer die Luftmenge, desto höher der Energieverlust und desto höher das Bremsmoment. Dies ist auch der Grund dafür, warum der Dieselmotor stärker bremst als der Benzinmotor. Es ist nicht die sehr oft fälschlich als Grund angegebene höhere Verdichtung. Der Luftdurchsatz ohne Drosselklappe ist deutlich größer als beim Benzinmotor mit geschlossener Drosselklappe.

### **Leistung und Arbeit im Schleppbetrieb**

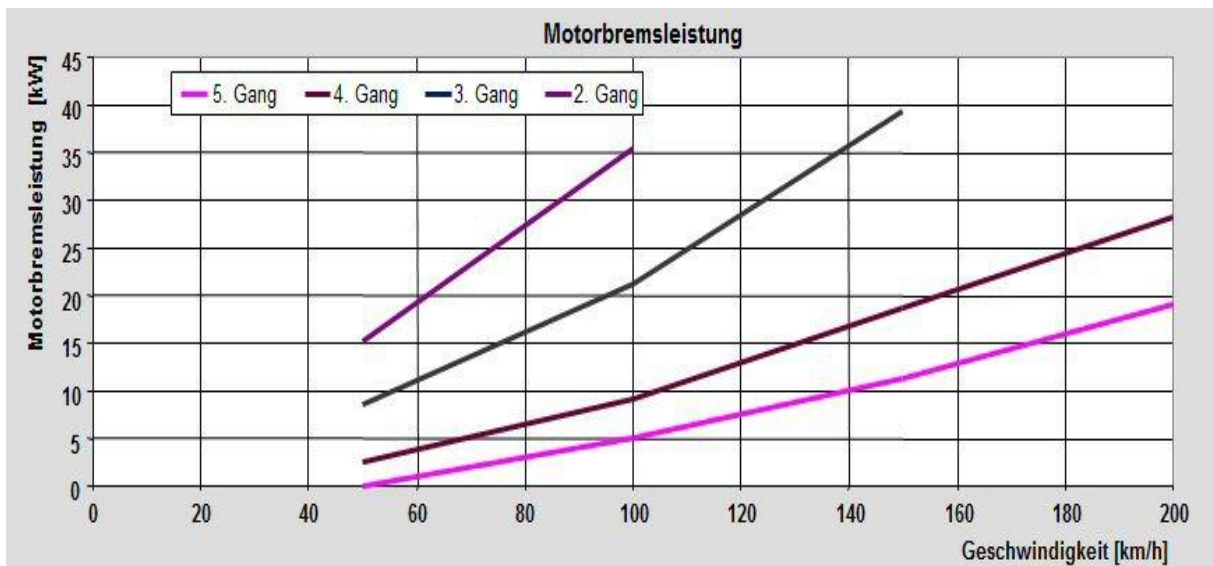
Nicht nur zur Erzeugung von kinetischer Energie sondern auch zur Vernichtung ist Leistung erforderlich. Erstaunlich viel auch bei den niedrigen Verzögerungen des Schleppbetriebs, wie das folgende Diagramm beweist.



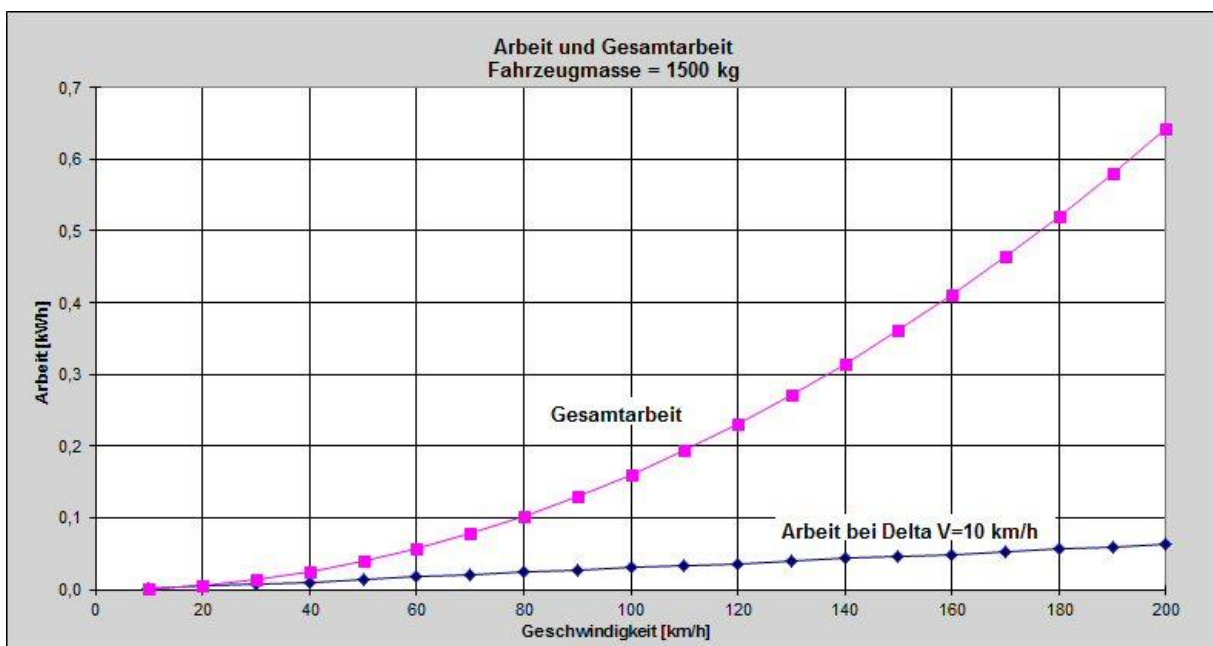
Die Schleppleistung kann man auch bei den verschiedenen Gängen und in der Neutralstellung berechnen. Das ergibt das folgende Bild.



Für die weitere Betrachtung aufschlussreicher ist die alleinige Schleppleistung des Motors ohne die Eigenverzögerung durch Luft- und Rollwiderstand. Man bekommt sie, indem man die Bremsleistung in der Neutralstellung von den Leistungen in den einzelnen Gängen abzieht.



Für die vernichtete kinetische Energie ist es unerheblich, ob eine hohe oder eine niedrige Verzögerung wirkt. Entscheidend ist nur, wie lange sie wirkt und welche Geschwindigkeitsdifferenz damit erzeugt wird.

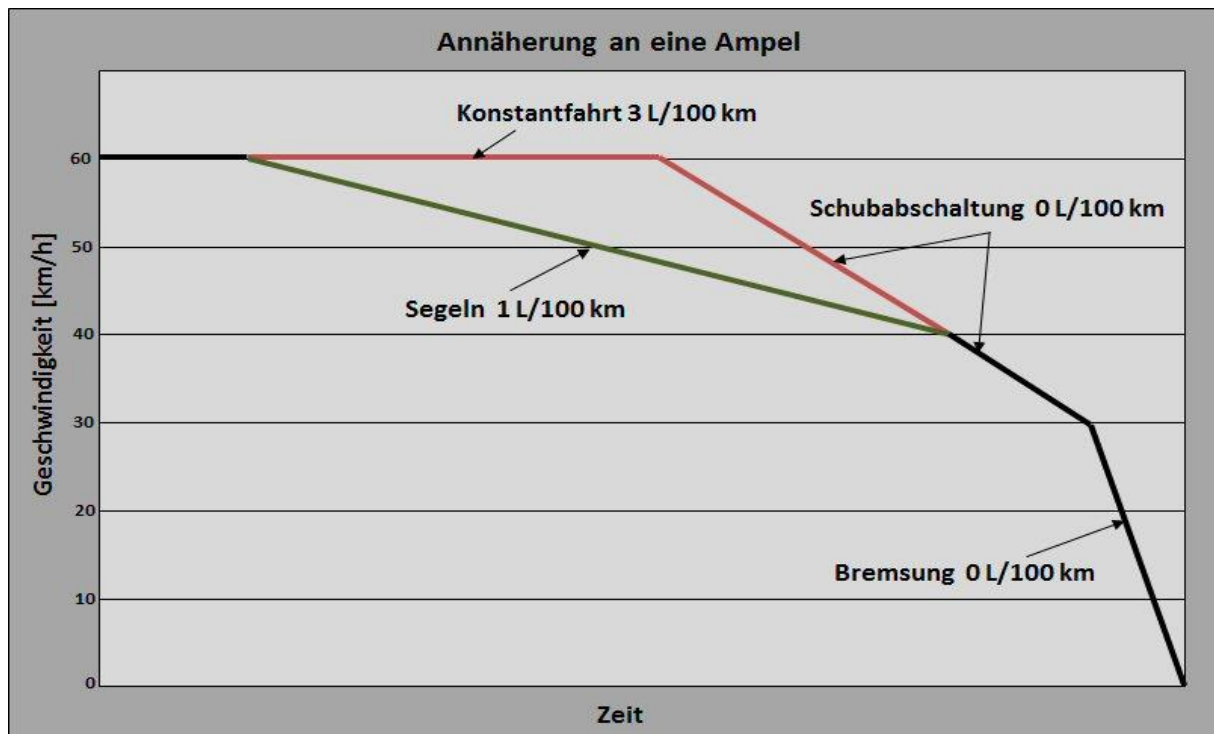


Bei den alltäglichen Fahrten in der Kolonne wirkt das Motorschleppmoment mit seinen niedrigen Verzögerungen und Bremsleistungen sehr oft und sehr lange. Bevor der Fahrer auf das Bremspedal steigt, nimmt er zuerst den Fuß vom Gaspedal und wartet, ob die Eigenverzögerung des Fahrzeugs incl. Motorbremsmoment ausreicht, die gewünschte Geschwindigkeit herzustellen. Das bedeutet, dass mit dem Motor sehr viel Energie abgebaut wird. Nur wenn die Eigenverzögerung des Fahrzeugs nicht ausreicht, betätigt der Fahrer die Bremse. Die Verzögerungen beim Tritt auf das Bremspedal sind zwar deutlich höher als das Motorbremsmoment, wirken aber nur kurzzeitig. Das bedeutet unter Strich: Der Motor vernichtet mehr kinetische Energie als die Bremse.

## Der Spareffekt

Vom Motor und seinem Schleppmoment wird sehr viel Energie vernichtet. Hindert man den Motor daran, in der Fahrpedalstellung Null Energie zu vernichten, kann sehr viel Kraftstoff eingespart werden. Die Betonung liegt auf „kann“, denn die Höhe der Einsparung hängt sehr stark von der Fahrweise ab. Zumindest ist das bei den bisher bekannten Systemen der Fall. Ein paar Fahrsituationen sollten wir uns auf den Spareffekt hin näher anschauen.

### Situation 1: Annäherung an eine Ampel

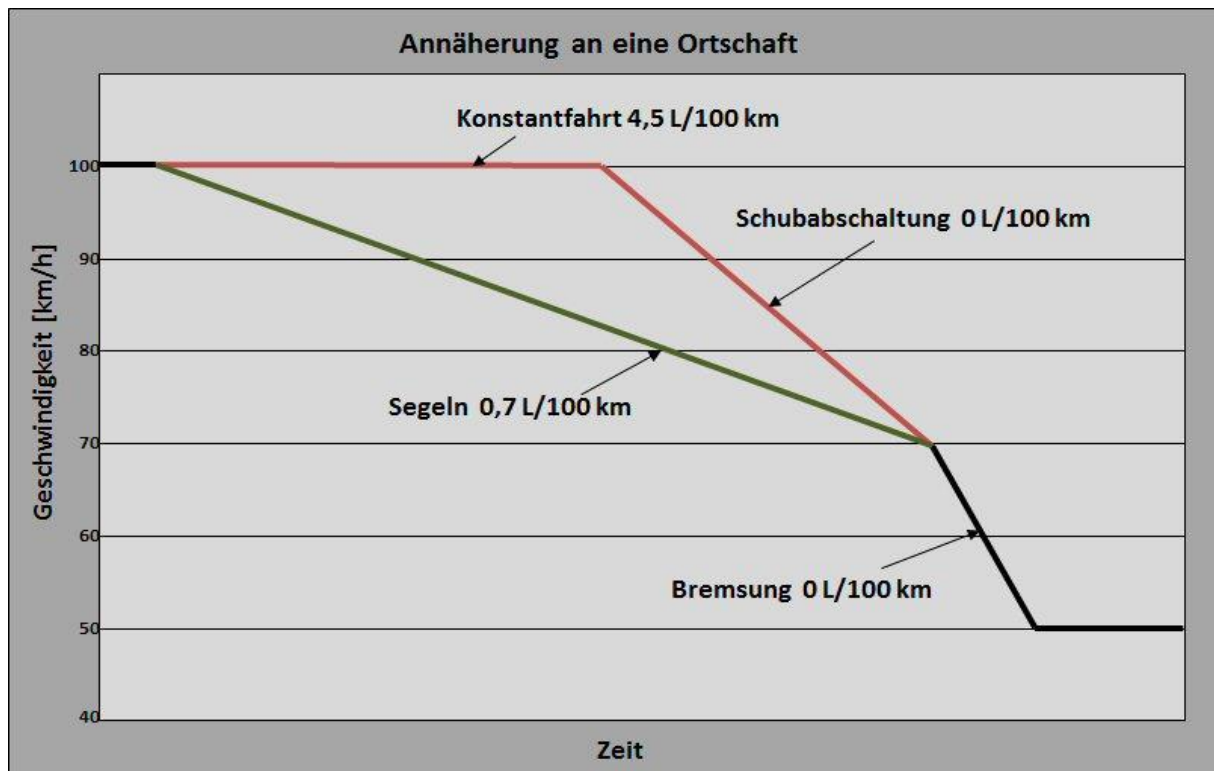


Ein typische Annäherung an eine Ampel läuft z.B. nach folgendem Schema ab: Der Fahrer fährt in der Ortschaft mit einer konstanten Geschwindigkeit von 60 km/h auf die Ampel zu => rote Linie. Der Verbrauch bei dieser niedrigen Geschwindigkeit betrage 3 L/100 km. Er geht frühzeitig vom Gas und lässt den Wagen in Schubabschaltung rollen. Die letzten Meter bremst er von 30 km/h bis zum Stillstand ab. Bei Schubabschaltung geht der Verbrauch auf Null zurück. Bei annähernd identischer Zeitdauer von Konstantfahrt und Schubschaltung ergibt das für den roten Bereich einen Verbrauch von **1,5 L/100 km**.

Der „Segler“ geht noch früher vom Gas und segelt bis 40 km/h => grüne Linie. Von hier bis zum Stillstand sind die Verbräuche identisch. Während des Segelns befindet sich der Motor im Leerlauf. Der Verbrauch im Leerlauf betrage 0,5 Liter pro Stunde, bei 50 km/h also **1 L/100 km**.

### Situation 2: Annäherung auf der Landstraße an ein Ortschaftsschild

Noch wesentlich beeindruckender fällt der Verbrauchunterschied auf der Landstraße aus. Als typisches Beispiel wählen wir eine Fahrt mit 100 km/h und die Annäherung an eine Ortschaft.



Bei der Konstantfahrt mit 100 km/h betrage der Verbrauch 4,5 L/100 km. Die Zeitdauer von Konstantfahrt und Schubabschaltung (rote Linie) sei identisch. Der Durchschnittsverbrauch der beiden Fahrzustände errechnet sich auf **2,25 L/100 km**.

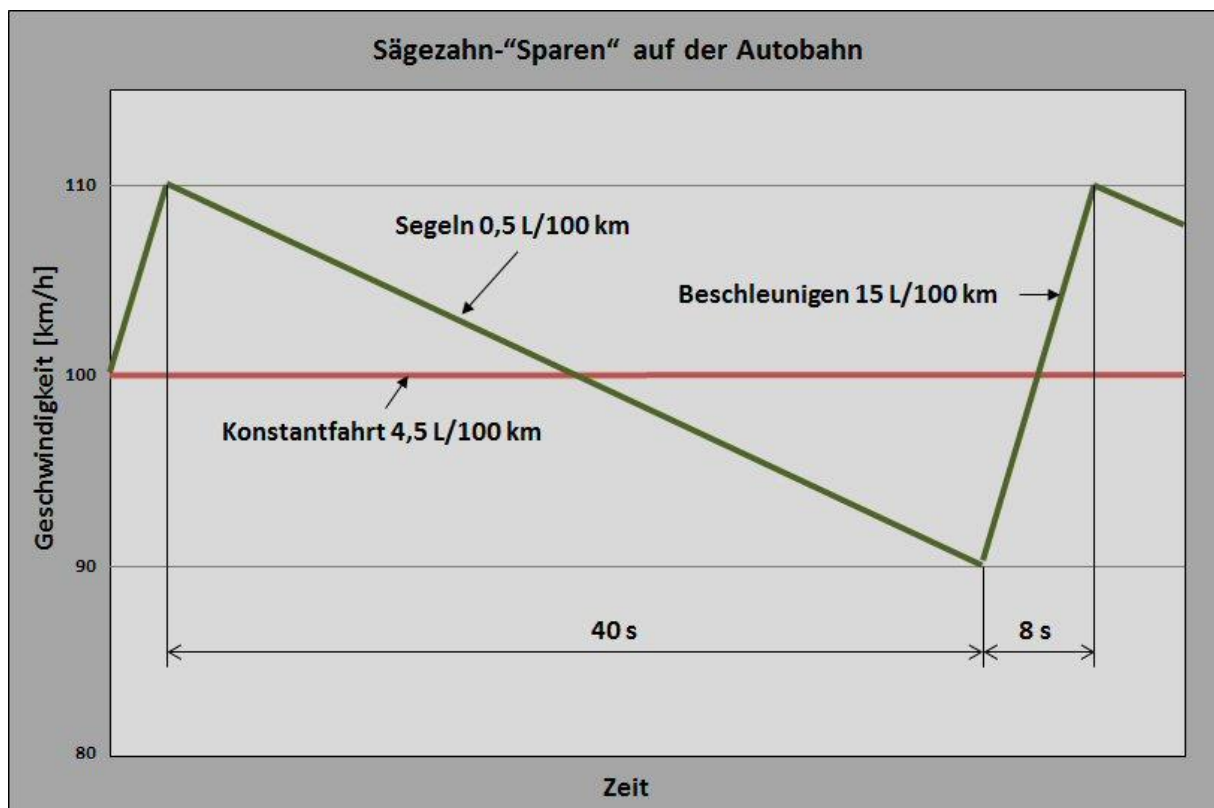
Die Segelphase von 100 bis 70 km/h (grüne Linie) ist wieder exakt so lang wie die Summe aus Konstantfahrt plus Schubabschaltung (rote Linie). Der Leerlaufverbrauch von 0,5 L/h bedeutet bei der Durchschnittsgeschwindigkeit von 85 km/h einen Verbrauch von ca. **0,7 L/100 km**.

### Angewandtes Segeln

So sieht sie aus, die segeltechnisch ideale Fahrweise: Mit wenig Drehzahl, aber kräftigem Gasgeben bis etwas über Wunschgeschwindigkeit beschleunigen, dann Kupplung treten bzw. N einlegen und Segeln. Sinkt die Geschwindigkeit zu weit ab, vorsichtig einkuppeln bzw. auf D schalten und wieder nach derselben Methode beschleunigen. Mit dieser Sägezahn-Fahrweise erzielt man annähernd den größtmöglichen Einspareffekt, denn bei dieser Art von Beschleunigung bewegt man sich in der Nähe des optimalen Wirkungsgrades eines Verbrennungsmotors.

Wer diese Fahrweise eine gewisse Zeit durchhält wird überrascht sein, wie stark man damit den Kraftstoffverbrauch senken kann. Allerdings ist die Fahrweise anstrengend und will geübt sein. Außerdem ist sie sicherheitstechnisch nicht ganz unproblematisch, denn im Eifer des Einspar-Gefechts lässt man sich schon einmal näher an den Vordermann heranrollen, als es der Sicherheit zuträglich ist. Auch so manche Kurve wird mit quietschenden Rädern genommen, weil man den Energie-fressenden Tritt aufs Bremspedal unbedingt vermeiden möchte. Schließlich stört man auch noch empfindlich den Verkehrsfluss der übrigen Verkehrsteilnehmer, was denen vermutlich nicht sonderlich gut gefällt.

Zum Schluss noch eine Methode, wie man auf der Autobahn Verbrauchsrekorde erzielen kann (und gleichzeitig die übrigen Verkehrsteilnehmer maximal ärgern). Es handelt sich um eine optimierte Sägezahnfahrweise.



Die Durchschnittsgeschwindigkeit sei 100 km/h, der Verbrauch bei Konstantfahrt 4,5 Liter/100 km. Die Gebrauchsanleitung lautet: Beschleunige verbrauchsgünstig auf 110 km/h, segle anschließend bis 90 km/h, beschleunige wieder auf 110 km/h usw. Das drückt den Durchschnittsverbrauch auf ziemlich genau **3 L/100km**.

Andere Fahrzeuge, andere Verbräuche, andere Geschwindigkeiten, andere Deltas - kein Problem. Für ein beeindruckendes Sparerlebnis spielt das (fast) keine Rolle. Wer's nicht glaubt: Ausprobieren! Aber bitte nur auf der leeren Autobahn und ohne sich und andere Verkehrsteilnehmer zu gefährden.

Will man das Sparen auf die Spitze treiben, muss man den Motor während des Segelns abstellen. Dann kann man weitere 0,5 L/100 km einsparen. Vom manuellen Abschalten ist aber dringend abzuraten. Womöglich rastet noch das Zündschloss ein, und die Katastrophe ist da. Der 3-Liter-Lupo schaltete den Motor automatisch ab, um das Letzte an Einsparung herauszuholen. Nur mit diesem und ähnlichen Tricks war es möglich, den Verbrauch auf 3 Liter pro 100 Kilometer auch in der Praxis zu drücken, nicht nur beim ECE-Testzyklus.

### Die Fahrbarkeit

Beim 3-L-Lupo konnte man wunderbar die Schattenseiten der Segelfahrweise studieren. Normalerweise macht man sich über die Bremswirkung des Verbrennungsmotors keine Gedanken. Man nutzt sie intuitiv, um die Geschwindigkeit, z.B. in der Kolonne, an den Vordermann anzupassen. Fehlt diese Bremswirkung, muss man seine Fahrweise darauf abstimmen. Es erfordert eine extrem vorausschau-



ende Fahrweise, und trotzdem steht man viel häufiger auf der Bremse als mit Motorschleppmoment. Das kann man keinem Kunden zumuten. Aber was wäre die Alternative?

Man müsste theoretisch zur gleichen Methode greifen, wie sie beim Elektrofahrzeug prinzipbedingt automatisch zur Anwendung kommt. Das Segeln ist dort in die Fahrpedalkennlinie einprogrammiert. Kurz vor der Fahrpedal-Nullstellung befindet sich ein Bereich, in dem die Elektromaschine weder antreibt noch bremst – die Segelposition. Geht der Fahrer weiter mit dem Fahrpedal zurück, wirkt der Elektromotor als Generator und bremst. Er simuliert sozusagen das Schleppmoment eines Verbrennungsmotors. Den Strom, den er dabei erzeugt, schickt der E-Motor in die Batterie. Man schlägt zwei Fliegen mit einer Klappe: Bremsen und Rekuperieren.

Im Normalfall steht einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor keine Elektromaschine zur Verfügung, außer es handelt sich um ein Hybridfahrzeug. Wobei wir beim idealen Konzept angelangt sind, der Kombination von Verbrennungsmotor mit einer leistungsfähigen Elektromaschine. Dieses Konzept wurde bereits verschiedentlich angesprochen, z. beim Hybrid-Panda

<http://der-autokritiker.de/technik/panda.html>

oder beim BMW 225xe Active Tourer.

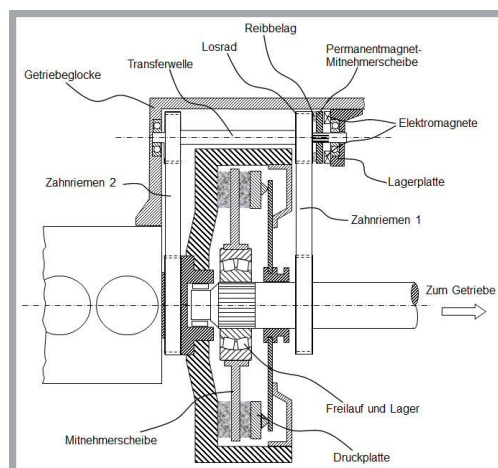
<http://der-autokritiker.de/Mediennachlese%20pdf/BMW%20Hybrid%20225xe%20Active%20Tourer.pdf>

Eine ausführliche Analyse folgt demnächst auf diesen Seiten.

## Methoden der Schleppmomentregelung

Im Moment beschäftigt uns die Frage, wie man bei Normalfahrzeugen das Bremsmoment nach Belieben ein- und ausschalten kann.

- Mit einer automatischen Kupplung kann man den Kraftfluss unterbrechen, aber auch bei Bedarf wieder herstellen. Leider ist das ruckfreie Öffnen und Schließen eine extrem heikle Angelegenheit.
- Man kann im Falle eines Freilaufs eine Überbrückungskupplung einsetzen, die den Kraftfluss rückwärts von den Rädern zum Motor ermöglicht. Eine aufwendige Technik, die tief in die Getriebekonstruktion eingreift.



- Man kann den bremsenden Luftdurchsatz durch die Zylinder unterbinden. Dieser Luftdurchsatz ist zu etwa  $\frac{3}{4}$  für das Bremsmoment verantwortlich, lediglich  $\frac{1}{4}$  geht zu Lasten der Reibung. Verhindert man den Luftdurchsatz, kommt das Ergebnis einem Freilauf oder eine geöffneten Kupplung schon sehr nahe. Realisieren lässt sich das Prinzip durch eine Blockade des Luftstroms auf der Einlass- und auf der Auslassseite.

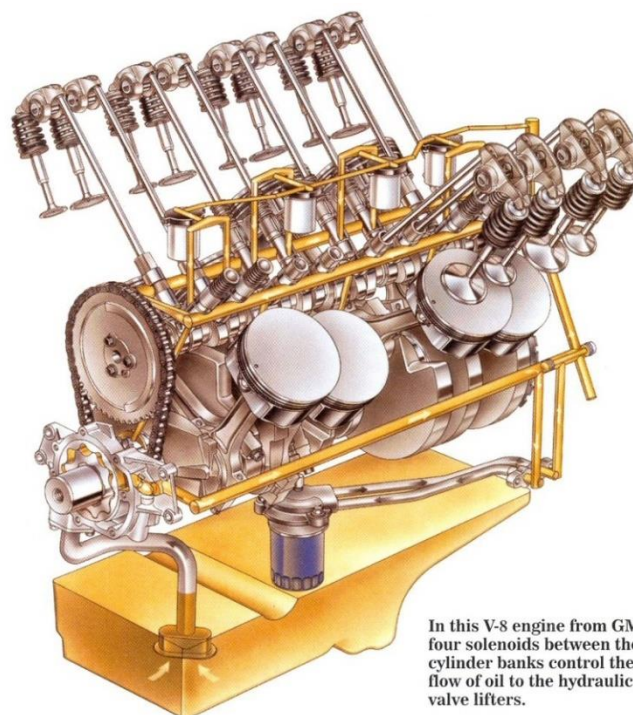
### Zylinderabschaltung

In jüngster Zeit mehren sich die Anwendungen von Zylinderabschaltung. Dabei ist allerdings nicht das Segeln im Fokus, weshalb immer nur einzelne Zylinder passiv geschaltet werden. Zum Segeln müsste man sämtliche Zylinder gleichzeitig abschalten. Theoretisch ist das möglich, erfordert aber einen großen Aufwand und ist deshalb noch nirgends zu finden.

Die bekannten Zylinderabschaltungen beruhen immer auf einer Ventilabschaltung. Beim passiv geschalteten Zylinder verharren Ein- und Auslassventile in geschlossener Position. Das eingeschlossene Luftvolumen wirkt wie eine Feder. Eigentlich ideale Voraussetzungen für das Segeln, denn das Motorschleppmoment kann jederzeit ruckfrei wieder aktiviert werden, indem man einfach die Ventile wieder aktiv schaltet.

Physikalischer Hintergrund der Zylinderabschaltung ist die Tatsache, dass Motoren mit hoher Leistung im niedrigen Teillastbereich mit einem schlechten Wirkungsgrad arbeiten. Schaltet man einige Zylinder ab, müssen die übrigen die Leistung kompensieren, und rutschen automatisch in einen Bereich höheren Wirkungsgrades.

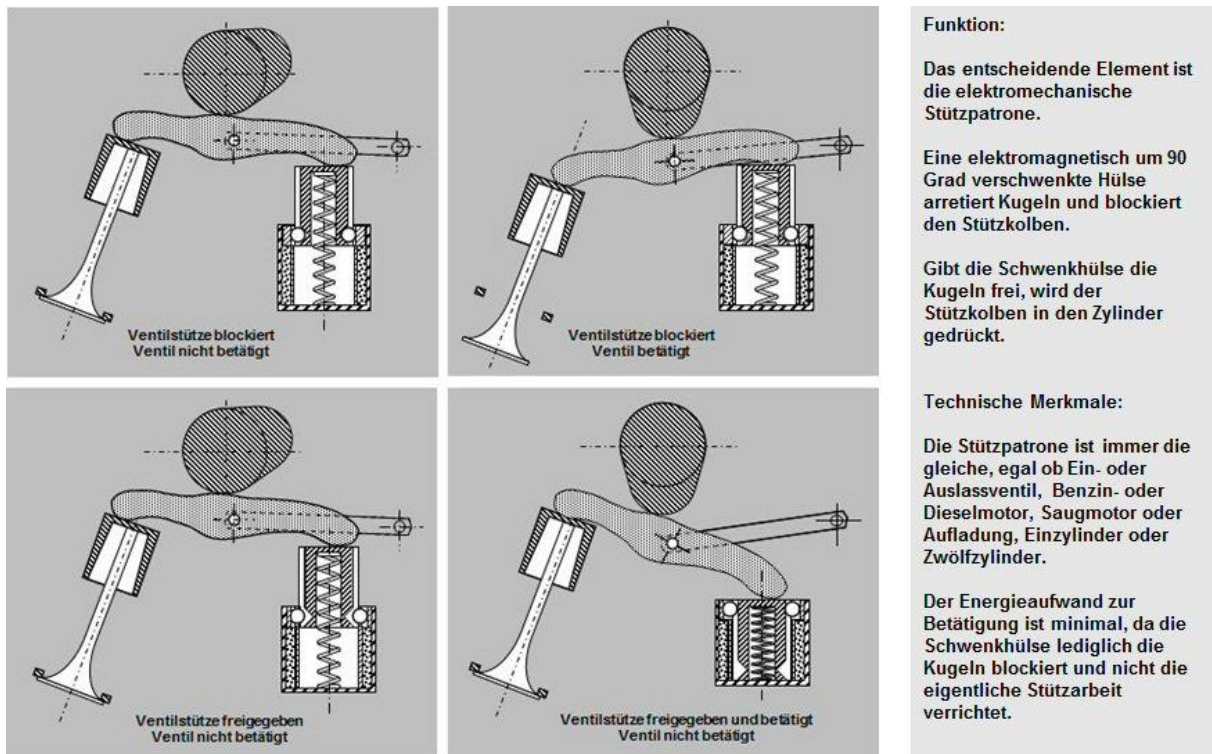
Ein Beispiel für eine Zylinderabschaltung findet man beim Motor des Chevrolet Camaro 6.2 V8. Die neueste Generation dieses Motors verfügt immer noch über eine untenliegende Nockenwelle und hydraulische Ventilstößel. Die Besonderheit dabei ist, diese Stößel sind abschaltbar. Im Teillastbereich schaltet der Camaro eine ganze Zylinderbank des V8-Motors ab.



In this V-8 engine from GM, four solenoids between the cylinder banks control the flow of oil to the hydraulic valve lifters.

Zum Segeln müsste er lediglich die zweite Zylinderbank auch abschalten.

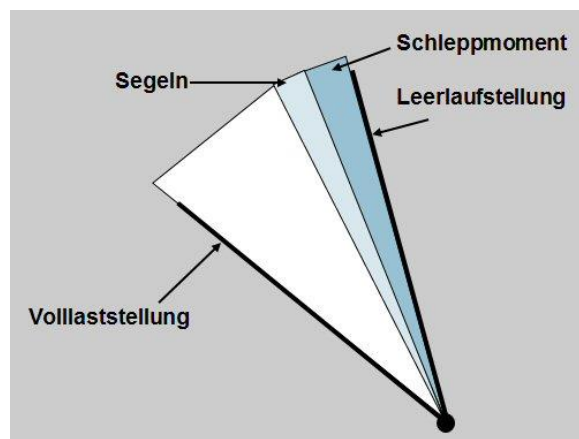
Die hydraulischen Stößel lieferten die Inspiration für eine elektromechanische Ventilabschaltung.



Stattet man sämtliche Ventile mit dieser Technik aus, kann man flexibel einzelne Zylinder oder alle zusammen abschalten, und für das Schleppmoment einzeln der Reihe nach wieder zuschalten. Eine perfekte Schleppmomentregelung. Der technische Sachverhalt der Zylinderabschaltung und die genaue Funktion der elektromechanischen Ventilabschaltung werden in einem späteren Artikel ausführlich erläutert.

### Segeln und die Fahrpedalkennlinie

Bei Elektrofahrzeugen ist das Segeln wie selbstverständlich in die Fahrpedalkennlinie integriert. Bei den bisherigen Ansätzen zum Segeln ist dies nicht der Fall. Damit aber auch der Normalfahrer in den Genuss des Segelns kommt, ohne seine Fahrweise darauf abstimmen zu müssen, ist eine Integration in die Kennlinie erforderlich. Das Segeln erst bei Fahrpedalstellung Null zu aktivieren ist für den Normalfahrer unzumutbar.



Bei den heute ausnahmslos verwendeten elektronischen Fahrpedalen ist eine derartige Auslegung problemlos per Software darstellbar. Der Fahrer wird nicht bevormundet. Er nutzt das Segeln unbemerkt, ohne einen Unterschied zum normalen Verhalten festzustellen. Der Nutzen richtet sich danach, wie vorausschauend der Fahrer zu Werke geht, also wie geschickt er das Segeln in seiner Fahrweise berücksichtigt. Der ungeübte Fahrer ohne bewusstes Nutzen des Segelns erreicht eine Verbrauchsreduzierung von mindestens 10 Prozent. Geübte Fahrer, die den virtuosen Umgang mit dem Segeln beherrschen, können bis zu 30 Prozent Einsparung erreichen.

#### **Schlussbemerkung:**

Wenn sich das Segeln derart positiv auf den Verbrauch auswirkt, bleibt zum Schluss eigentlich nur die Frage:

#### **Warum konnte es sich bisher nicht durchsetzen?**

Die einfache Antwort:

#### **Weil es im ECE-Zyklus keine Rolle spielt, nur im Praxisverbrauch.**

Wieder ein Beweis dafür, dass die Fahrzeuge verbrauchsseitig nur für den ECE-Zyklus optimiert werden und nicht für den Kunden. Und zwar weltweit, nicht nur deutsche Fabrikate. Auch wenn die Prüfzyklen demnächst geändert werden, das reale Verhalten auf der Straße werden sie trotzdem nur unvollkommen abbilden. Denn das meiste Verkehrsgeschehen spielt sich im Kolonnenverkehr ab. Und hier bewegt man sich nicht Geschwindigkeits-orientiert wie am Prüfstand, sondern Abstandsorientiert. Letzteres beinhaltet viele Segelphasen, das Geschwindigkeitsprofil eines Prüfstandstest keine. Denkbare schlechte Aussichten für das Segeln.

**08.11.2016 Jacob Jacobson**