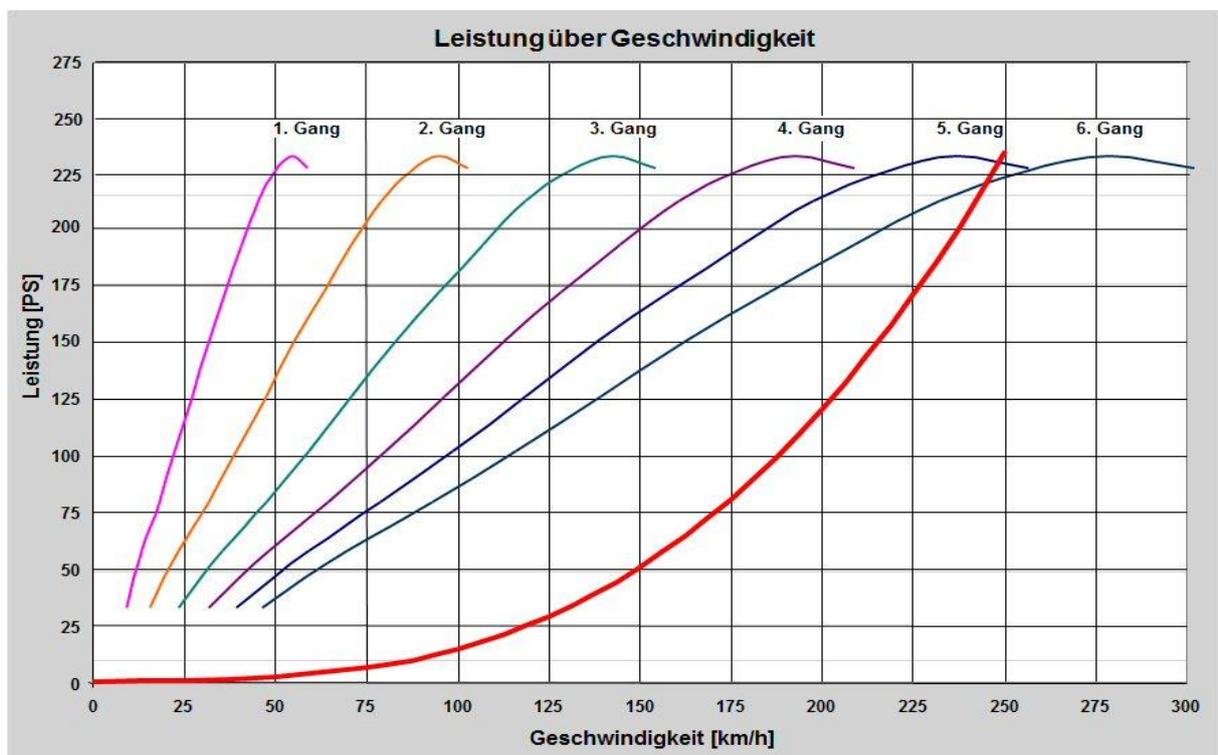


## 15.11.2016 Zylinderabschaltung – Hubraum nach Bedarf

Eigentlich bräuchte man in modernen Automobilen drei Motoren, je einen für Stadt, Landstraße und Autobahn.

1. In der **Stadt** reicht ein kleines, sparsames Motörchen mit wenig PS und wenig Verbrauch.
2. Auf der **Landstraße** darf es etwas mehr sein, um in der Kolonne mitschwimmen zu können.
3. Für die linke Spur der **Autobahn** braucht man am meisten Power, sonst wird man dort zum Verkehrshindernis.

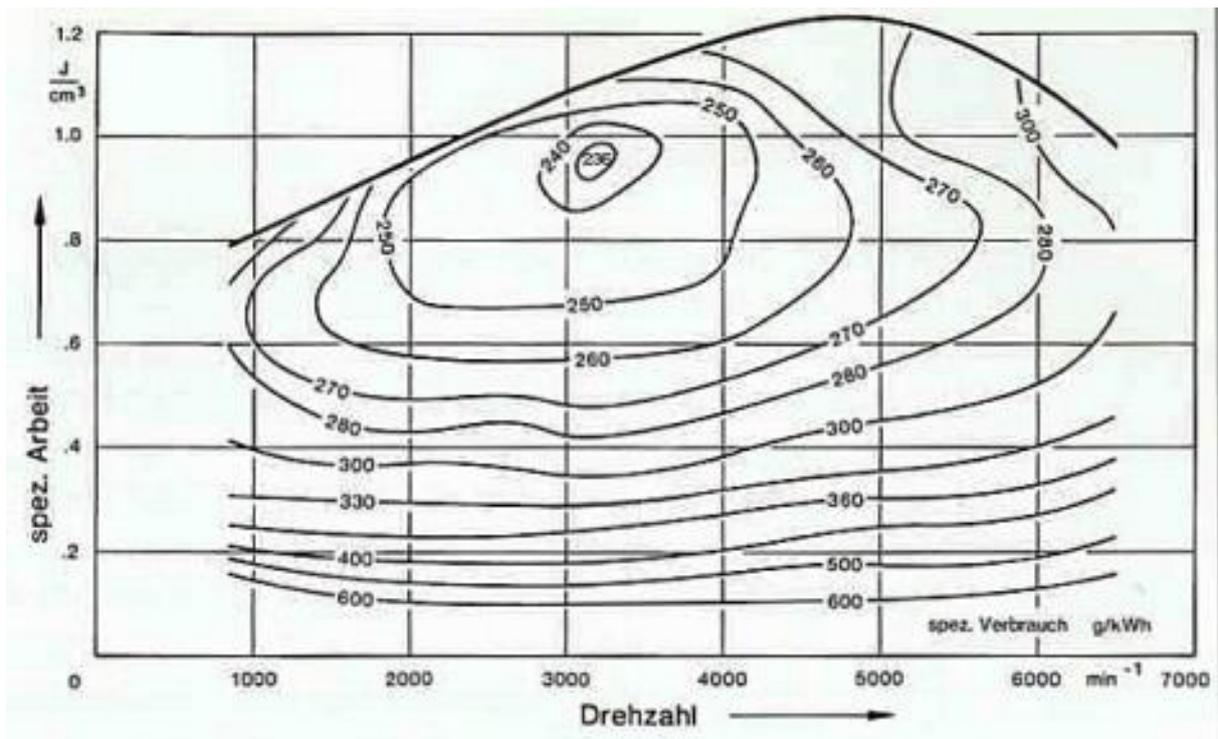
Welche dieser drei Anforderungen bestimmt die Motorauslegung? Ganz klar, Anforderung drei, die Autobahn. Von kurzen Beschleunigungsphasen abgesehen ist dieser Motor bei allen anderen Gelegenheiten heillos überdimensioniert, abgesehen von der Beschleunigung.



Das Diagramm eines beliebigen PKW zeigt, wie viel oder wie wenig Leistung man für eine bestimmte Geschwindigkeit benötigt. In der Stadt und selbst auf der Landstraße ist man mit 50 PS noch mehr als ausreichend motorisiert. Die installierten 250 PS werden in den meisten Fahrzeugen kaum ausgenutzt, lediglich bei einigen seltenen Beschleunigungen und bei noch selteneren Fahrten mit 250 km/h auf der Autobahn kommen sie zum Einsatz.

### Das Wirkungsgrad-Kennfeld

Jeder Motor hat ein typisches Kennfeld für den Wirkungsgrad. Beim Verbrennungsmotor heißt es aufgrund seines Aussehens Muscheldiagramm.



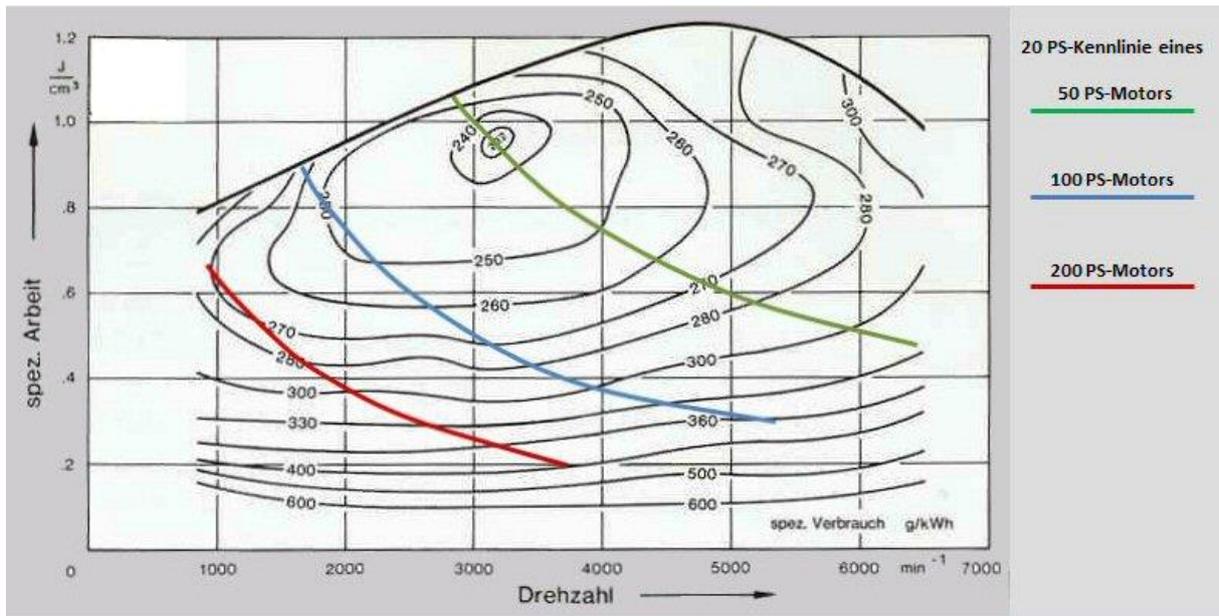
Von welchem Motor obiges Diagramm stammt ist unerheblich. Im prinzipiellen Verlauf sind alle Verbrennungsmotoren gleich, egal ob Diesel oder Benzin, großer oder kleiner Hubraum, hohe oder niedrige Leistung, aufgeladen oder Saugmotor. Anders als man vielleicht vermuten könnte, befindet sich der Bestpunkt, in diesem Fall mit 235  $g/kWh$ , nicht im Teillastbereich, sondern in der Nähe der Vollastkennlinie bei einer relativ niedrigen Drehzahl.

Beim Design eines neuen Verbrennungsmotors versucht man, den Bestpunkt dorthin zu legen, wo sich das Fahrzeug die meiste Zeit aufhält. Die Durchschnittsgeschwindigkeit eines PKW beträgt heutzutage etwa 55  $km/h$ , mit fallender Tendenz. Sie ist weitgehend unabhängig vom Fahrzeugmodell und von der Leistung. Sie ergibt sich vielmehr aus der Verkehrsdichte und der Zusammensetzung aus Stadt-, Landstraßen- und Autobahnanteilen.

Daraus kann man schon erahnen, dass heutige Motoren mit ihrer Auslegung auf die linke Autobahnspur die meiste Zeit nicht annähernd ausgelastet sind. 150 PS beträgt der Leistungsdurchschnitt der Neufahrzeuge im Jahre 2015, mit steigender Tendenz. Diese Pferdchen sind notorisch unterbeschäftigt und langweilen sich die meiste Zeit. Deswegen stellen sie aber noch lange nicht das Fressen ein. Ganz im Gegenteil, gerade bei Unterbeschäftigung brauchen sie im Verhältnis zur Leistung mehr Futter als bei Anstrengung.

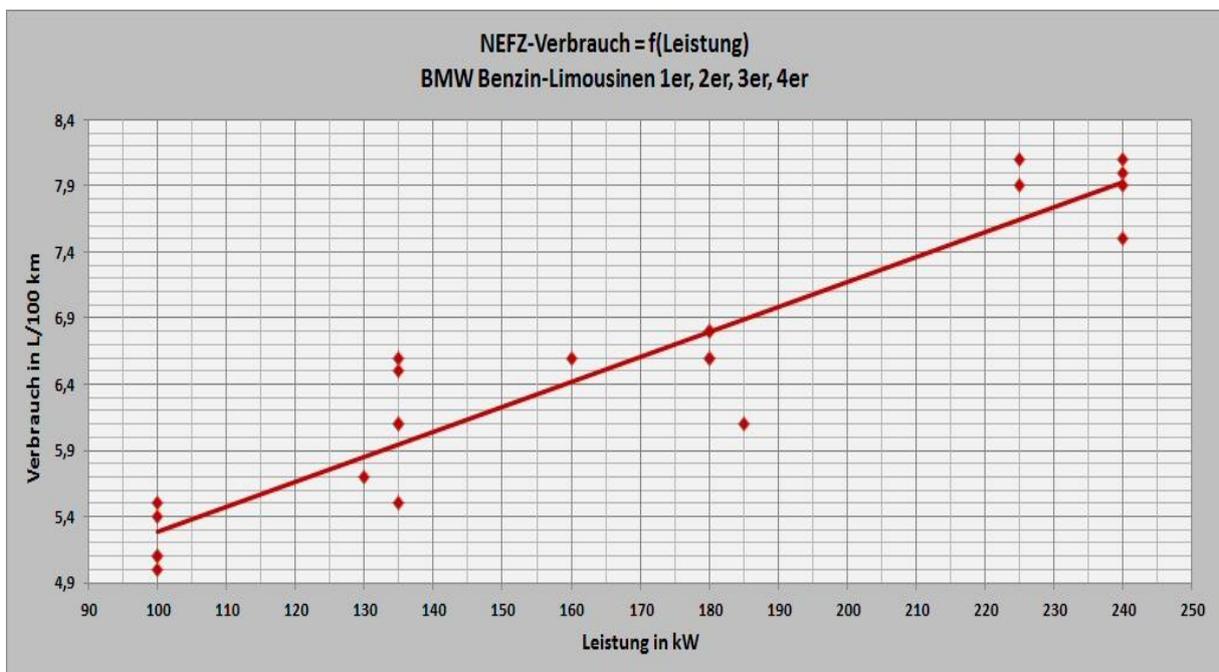
### Der unökonomische Teillastbereich

Diese Tatsache wollen wir mit Hilfe des obigen Muscheldiagramms visualisieren. Angenommen, das Wirkungsgradkennfeld stammt aus drei unterschiedlichen Motoren. Einer der Motoren besitzt eine Maximalleistung von 50 PS, einer anderer von 100 PS, und ein dritter von 200 PS. Wir nehmen weiter an, alle drei fahren in der Stadt in der Kolonne und brauchen dazu 20 PS. Im folgenden Diagramm ist diese Leistungsanforderung durch die drei farbigen Kurven dargestellt.



- Die 20 PS-Kurve des 50 PS-Motors schneidet den Bereich des besten Wirkungsgrades. Fährt man mit diesem Motor mit etwas über 3.000 U/min und einem hohen Drehmoment, wird man von allen drei Motoren den niedrigsten Verbrauch erzielen.
- Der 100 PS-Motor ist ca. 10 Prozent von der grünen Kurve entfernt. Bei etwa 2.000 U/min und hohem Drehmoment arbeitet er am ökonomischsten.
- Das 200 PS-Aggregat liegt sogar 20 Prozent über der 50 PS-Maschine. 1.000 U/min und  $\frac{1}{4}$  maximales Drehmoment sind nötig, um in den Bereich der größtmöglichen Effizienz zu kommen.

In der Praxis fällt der Unterschied sogar noch wesentlich größer aus, wie das folgende Diagramm verdeutlicht.



Zwischen 100 kW und 200 kW liegt bei weitgehend identischen Fahrzeugen ein Verbrauchsdelta von über 30 Prozent.

## **Verbrauchssenkende Maßnahmen**

Diesem Umstand rücken die Motorbauer mit einem Bündel von Maßnahmen zu Leibe. Zum einen natürlich mit Getrieben mit möglichst vielen Gängen, um bei der Wahl der Drehzahl das jeweilige Verbrauchoptimum zu erwischen. Stand der Technik sind acht, vereinzelt sogar neun Gänge. Weitere Maßnahmen sind Ventil- und Nockenverstellungssysteme, Direkteinspritzung, Reibungsoptimierung, bedarfsorientierter Antrieb von Nebenaggregaten usw. Dumm daran ist nur, diese Maßnahmen kann man bei jedem Motor einsetzen, auch bei denen mit niedriger Leistung, womit der alte Verbrauchsabstand wieder hergestellt ist.

Der ultimative Trick der Motordesigner ist das sog. Downsizing. Ausgehend vom Dieselmotor schwappte dieser Trend vor einigen Jahren auf den Benzinmotor über. Das große Plus des Downsizing: Hohe Drehmomente und niedrige Drehzahlen verbessern den Wirkungsgrad im Teillastbereich. Der Bestwert des Wirkungsgrads verbessert sich dagegen nicht. Ein perfekt auf den Bestpunkt ausgelegter Saugmotor ist in diesem Punkt dem aufgeladenen Motor überlegen, allerdings nur da. Im Teillastbereich ist das aufgeladene Pendant besser. Außerdem ermöglicht die Aufladung höhere Leistungen. Dazu braucht es aber aufwendige Ladeverfahren. Zur Anwendung kommen kaskadierte Lader, mehrere Lader parallel, verstellbare Schaufelgeometrie oder Kombination mit elektromechanischen Kompressoren.

## **Die Zylinderabschaltung**

Wie gesagt, die meisten dieser Maßnahmen zielen darauf ab, den Wirkungsgrad im Teillastbereich zu verbessern. Die Zylinderabschaltung verfolgt ein anderes Ziel. Mit ihrer Hilfe will man den Motor möglichst häufig im Bereich des günstigsten Wirkungsgrads laufen lassen. Angenommen, der Motor mit 50 PS hätte zwei Zylinder, und der Motor mit 100 PS deren vier. Man müsste beim Vierzylinder lediglich zwei Zylinder stilllegen, um von der blauen Kurve auf die grüne zu kommen.

Nun kann man nicht ohne weiteres zwei Zylinder aus dem Antriebsstrang entfernen, obwohl dies unerschrockene Ingenieure schon seit Generationen versuchen - und regelmäßig am irrsinnig hohen Aufwand scheitern. Man muss einen anderen Ansatz wählen: man muss die passiven Zylinder daran hindern, wie eine Luftpumpe zu arbeiten. Das gelingt, indem man die Ventile der passiven Zylinder stilllegt. Aus der Zylinderabschaltung wird somit eine Ventilabschaltung.

Diesen Weg beschreitet z.B. VW/Audi. Auf YouTube findet man eine animierte Funktionsbeschreibung: <https://www.youtube.com/watch?v=kxs2fuCRmNI>



Das VW/Audi-Prinzip weist erhebliche Nachteile auf:

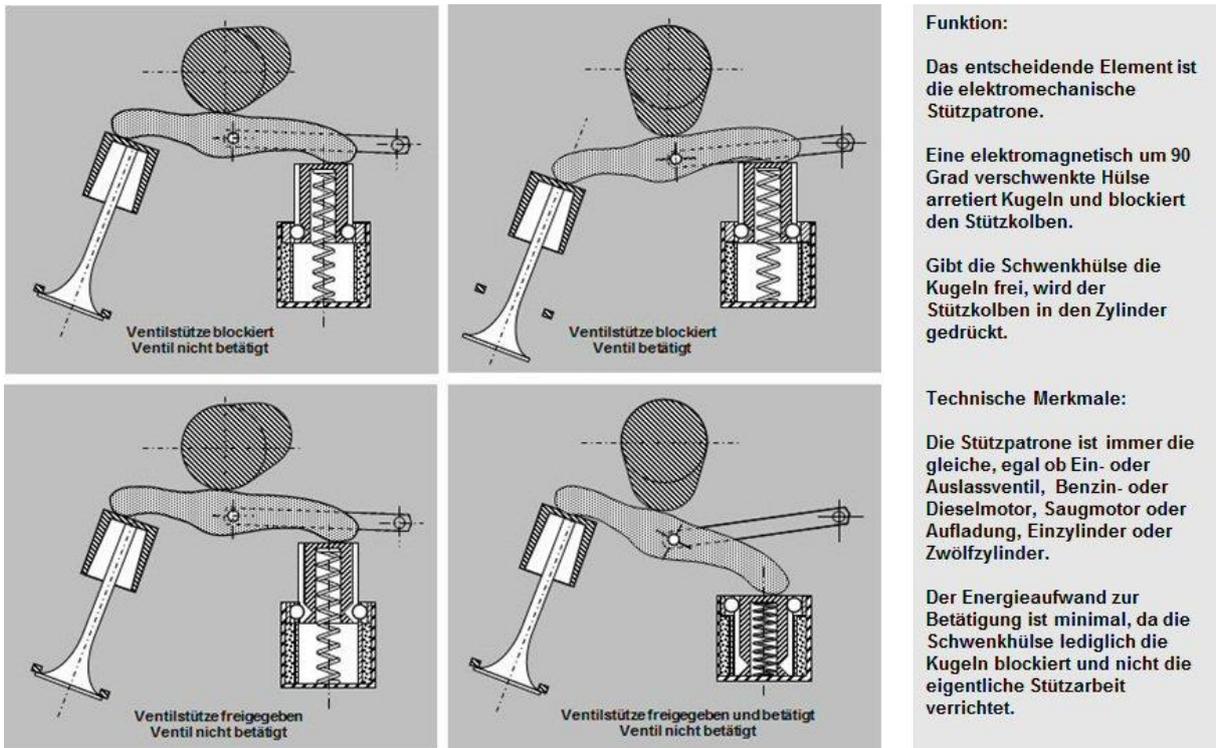
- Es sind nur zwei Zylinder abschaltbar. In vielen Fahrsituationen würde aber sogar ein einziger aktiver Zylinder ausreichen. Dazu müssten aber drei Zylinder abschaltbar sein. Zum Segeln wiederum müssten sämtliche Zylinder abschaltbar sein. Rein theoretisch könnte man bei diesem Verfahren einen einzelnen Zylinder abschalten. Der Verbrauchsvorteil dürfte vermutlich unter der Wahrnehmungsschwelle liegen.
- Es werden immer dieselben Zylinder abgeschaltet. Das bewirkt Temperaturspannungen zwischen aktiven und passiven Zylindern. Ein besserer Temperatenausgleich wäre regelmäßiges Umschalten zwischen aktiven und passiven Zylindern gegeben, z.B. alle 100 Umdrehungen.
- Das System ist aufwendig, unflexibel und nicht universell einsetzbar. Jeder Motor erfordert eigene Nockenwellen. Die Anwendbarkeit für V8-Motoren ist gegeben, bei V6-Motoren und Reihensechszylindern ist der Einsatz fraglich.
- Die Verstellelemente beanspruchen Bauraum. Sie vergrößern die Bauhöhe, weshalb sich das Prinzip für möglichst flach bauende Fahrzeuge eher nicht eignet.
- Die beiden Einlass- und Auslassventile eines Vierventilzylinders sind nur gemeinsam abschaltbar. Jedes einzelne Ventil abschaltbar zu machen würde den Aufwand weiter erhöhen.

Ähnliche Systeme sind auch bei Mercedes und verschiedenen Zulieferfirmen wie Schaeffler/Conti und Bosch in der Entwicklung. Für sie gelten ähnliche Nachteile.

### **Displacement on Demand**

Wenn man schon einen hohen Aufwand treibt, dann sollte er sich wenigstens lohnen. Das tut er nur, wenn man die obigen Nachteile vermeidet. Am einfachsten wäre ein Element, das jedem einzelnen Ventil zugeordnet ist, und nach Bedarf aktiviert werden kann. Außerdem sollte das Element elekt-

mechanisch funktionieren und nicht elektrohydraulisch, da Hydraulik bekanntermaßen aufwendig und teuer ist. Ein solches Element, genannt Stützpatrone, ist unten dargestellt.



Die wesentlichen Vorteile sind in der Beschreibung bereits genannt. Neben der Zylinderabschaltung eignet sich das Konzept auch zum Segeln. Die Ansteuerung erfolgt schwarz/weiß, eine aufwändige Regelung ist nicht erforderlich. Der niedrige Energiebedarf erlaubt eine Ansteuerung über das Motorsteuergerät ohne zusätzliche Leistungselektronik.

## Ausblick

Audi/VW nennen ihr Konzept „Cylinders on Demand“. Der Arbeitstitel der oben präsentierten Technik lautet „Displacement on Demand“. Nur damit lässt sich bei jedem Motortyp die optimale Zylinderabschaltung realisieren, Segeloption inklusive. Die Abschaltung sämtlicher Zylinder ist zudem eine günstige Voraussetzung für Energierückgewinnung bei Hybridfahrzeugen. Die Rekuperation ist Gegenstand des vierten Artikels in der Reihe: „Methoden des Kraftstoffsparens“.

Mit der Zylinderabschaltung können wir dem eingangs geäußerten Wunsch nach drei Motoren in ein und demselben Fahrzeug entsprechen – zumindest teilweise. Um die ganze Bandbreite der drei Motoren abzudecken, müsste man auch noch den Turbolader nach Belieben ein- und ausschalten können. Wie diese Aufgabe mit Hilfe der Einzelventilabschaltung zu lösen ist, erfahren Sie im fünften Teil des Verbrauchskompendiums mit dem Titel: „Aus 1 mach 2 – Aufladung nach Bedarf“.

15.11.2016 Jacob Jacobson