

**11.01.2023**

## **Blick zurück auf 15 Jahre Verbrennungsmotor-Entwicklung: Folge 1 von 2**

### **Präambel:**

Die folgende Abhandlung des Autors stammt aus dem Jahre 2008. Sie steht hier unkorrigiert und unkommentiert. In einem der nächsten Beiträge gehen wir im Detail darauf ein, welche Prognosen sich in der Zwischenzeit bewahrheitet haben, und welche Irrtümer und Fehleinschätzungen darin vorkommen.

**10.05.2008**

### **Mythen und Legenden der Kraftstoffeinsparung im Antriebsstrang: Ein Versuch der Analyse ohne Denkblockaden**

Bei der Entwicklung von technischen Produkten ist ein häufig zu beobachtendes Phänomen, dass sich Entwicklungsrichtungen wie Modeerscheinungen verhalten. In solchen Fällen entwickeln ausnahmslos alle Ingenieure und Firmen in die gleiche Richtung, so als ob unsichtbare Grenzen dies vorschreiben würden. Die in den Projekten beschäftigten Ingenieure sind meistens nicht in der Lage, diese Fixierungen zu erkennen. Und falls doch einzelne die Zwanghaftigkeit sehen, können sie aufgrund ihrer hierarchischen Stellung nicht gegensteuern.

Die folgenden Analysen sollen zeigen, dass auch in der Entwicklung der Antriebstechnologie solche Moderichtungen existieren, und wie sie aus energetischer Sicht zu bewerten sind.

#### **1.) Offene Ansaugquerschnitte und Schichtladung beim Benzinmotor:**

Eine auch in Technikerkreisen sehr verbreitete Fehleinschätzung betrifft den Verbrauchsvorteil des Dieselpinzips gegenüber dem Benzinmotor. Es wird größtenteils auf den offenen Ansaugkanal zurückgeführt und die damit verbundene Entdrosselung. Das ist falsch. Vielmehr wird durch einen offenen Ansaugquerschnitt im Teillastbereich wesentlich mehr Luft angesaugt als zur Verbrennung benötigt wird. Und diese muss erwärmt durch die Abgasanlage wieder entsorgt werden. In Summe entstehen höhere Drosselverluste als bei homogenem Gemisch.

Wie kommt trotzdem der Verbrauchsvorteil von ca. 30% zustande? Einmal durch die um 10% höhere Energiedichte des Dieselpinzips. Des Weiteren durch die höhere Verdichtung. Schließlich vor allem dadurch, dass jedes Kraftstoffmolekül durch das Überangebot an reaktionsfähigen Partnern ideale Bedingungen vorfindet und dass alle Moleküle gleichzeitig reagieren können. Der Nachteil der höheren Drosselverluste wird dadurch deutlich überkompensiert.

Der Versuch, den Verbrauchsvorteil des Dieselpinzips beim Benzinmotor nachzubilden, führt zu den bekannten Technologien Direkteinspritzung und Schichtladung. Das Nachahmen der Dieselpinzips konnte bisher nicht annähernd die hochgespannten Erwartungen erfüllen. In der gesamten Automobilindustrie ist deshalb eine erhebliche Unruhe festzustellen, was die Anwendung von homogenem und inhomogenem Brennverfahren anbetrifft.

Bei DI mit homogenem Brennverfahren wird nur so viel Luft angesaugt, wie zur vollständigen Verbrennung benötigt wird. Gegenüber der Saugrohreinspritzung entstehen geringere Wandverluste, Gemischbildung und Verteilung sind etwas günstiger. Die Verbrauchsvorteile sind allerdings nur gering.

Den eigentlichen Quantensprung an Verbrauchsreduzierung erhofft man sich deshalb von der inhomogenen Verbrennung oder Schichtladung. Mit einem offenen Ansaugkanal wird wie beim Dieselmotor mehr Luft angesaugt, als zur Verbrennung benötigt wird. Um die Verbrennung in Gang zu setzen, muss allerdings in der Nähe der Zündkerze ein Bereich mit homogenem Gemisch gebildet werden, in dem sich die Flammenfront sehr schnell ausbreiten kann. Von dort aus greift die Flammenfront auf die Bereiche mit Luftüberschuss über.

In der Literatur schreibt man den Verbrauchsvorteil den nicht gedrosselten Ansaugbedingungen zu. In Wahrheit ist der Vorteil auf die geringeren thermischen Verluste zurückzuführen, die durch die Isolationswirkung des Luftüberschusses zustande kommen. Der offene Ansaugquerschnitt ist sogar kontraproduktiv, weil der Durchsatz an nicht benötigter Luft einen gewissen Leistungsverlust bedeutet. Der Vorteil des Dieselpinzips ist nur stark eingeschränkt vorhanden, da nur ein kleiner Anteil der Kraftstoffmoleküle die idealen Bedingungen wie beim Dieselmotor vorfindet. Dafür hat dieses Motorprinzip sowohl mit den Nachteilen des Diesels zu kämpfen, als auch mit einigen ganz spezifischen Nachteilen des Ottoprinzips. Zu den dieselspezifischen Nachteilen gehören ein rauher Motorlauf und eine aufwändige Abgasnachbehandlung. Letztere ist erforderlich wegen der bei Luftüberschuss entstehenden Stickoxide. Typisch für einen Benzinmotor ist die niedrige Verdichtung, die einen nicht unerheblichen Teil der Verbrauchsvorteile egalisiert.

## **2.) Schubabschaltung und Verbrauch sparende Fahrweise.**

In allen bisher eingesehenen Anleitungen zu einer verbrauchsgünstigen Fahrweise wird empfohlen, nicht den Motor durch Betätigung der Kupplung abzukoppeln, sondern nur vom Gas zu gehen und die Schubabschaltung zu nutzen. Dabei wird übersehen, dass der Motor durch seine Bremswirkung meistens eine stärkere Verzögerung bewirkt als der Fahrer haben möchte. Bei 50 km/h ergeben sich auf diese Weise Verzögerungen von ca.  $0,5 \text{ m/s}^2$ , während ohne Motorschleppmoment eine vergleichsweise niedrige Verzögerung von  $0,2 \text{ m/s}^2$  entsteht. Bei einem Fahrzeug einem Gewicht von 1.500 kg bedeutet das eine Verzögerungsleistung von 10 kW mit Motorschleppmoment zu 4 kW ohne. Bei einigermaßen vorausschauender Fahrweise kann man ohne nennenswerte Einbußen an Dynamik sehr häufig dieses Rollen ohne Motorschleppmoment zur Kraftstoffeinsparung nutzen.

Eine optimale Nutzung dieser Methode setzt allerdings eine extrem angepasste und vorausschauende Fahrweise voraus. Der Nutzen dabei ist ein riesiges Einsparpotential, das anderweitig nicht erschließbar ist. Dabei ist ein zusätzliches Abschalten des Verbrennungsmotors in den Rollphasen von untergeordneter Bedeutung. Moderne Motoren verbrauchen im Leerlauf ca. 1 Liter pro Stunde. Dieser Anteil ist deshalb vernachlässigbar.

Extrem verbrauchsorientierte Fahrzeuge wie der 3 Liter-Lupo nutzen diesen Zusammenhang, um den Praxisverbrauch an den Verbrauch im Zyklus anzunähern. Sie öffnen dazu die automatische Kupplung und lassen das Fahrzeug rollen, wobei sie zusätzlich den Verbrennungsmotor abschalten. Diese Fahrweise ist sehr gewöhnungsbedürftig und anstrengend, weil das fehlende Motorschleppmoment ein häufiges Betätigen der Bremse erfordert. Besser wäre es, die Kupplung bereits kurz vor der Nullstellung des Gaspedals zu öffnen, und am Ende des Gaspedalweges wieder zu schließen. Der Fahrer

kann dann wie gewohnt das Schleppmoment des Motors nutzen, um die Geschwindigkeitsunterschiede bei Kolonnenfahrt bequem mit dem Motorbremsmoment auszugleichen.

### 3.) Bremsenergierückgewinnung

Beim Stichwort Rekuperation ist meistens von Bremsenergierückgewinnung die Rede. Damit ist aber nur ein kleiner Teil der kinetischen Energie angesprochen. Der weitaus größere Teil wird nicht durch die Bremse sondern durch den Verbrennungsmotor vernichtet, nämlich durch das Motorschleppmoment. Eine sinnvolle Rekuperation muss diesen Zusammenhang berücksichtigen und den Verbrennungsmotor in der Schubphase abkoppeln oder das Motorschleppmoment signifikant reduzieren.

Außerdem sollten sich die Fahrzeughersteller dringend Gedanken über den Wirkungsgrad bei Rekuperation machen. Die Kette sieht folgendermaßen aus, wobei bei jedem Übergang ein Wirkungsgrad  $W$  anzusetzen ist:

**Kinetische Energie –  $W$  – Getriebe –  $W$  – E-Maschine –  $W$  – Elektronik –  $W$  – Speicher –  $W$  – Elektronik –  $W$  – E-Motor –  $W$  – Getriebe –  $W$  – kinetische Energie.**

In Summe bleiben mindestens zwei Drittel bis drei Viertel der Energie auf der Strecke. Vorausgesetzt, der Speicher ist noch aufnahmefähig. Deshalb besteht die beste Form der Energieeinsparung in der Energieerhaltung, d. h. die Energie eben nicht im Verbrennungsmotor als Schleppmoment in warme Luft umzuwandeln. Sondern möglichst lange zu segeln.

### 4.) Downsizing

Downsizing ist in der Motorenbranche das allgemein anerkannte Allheilmittel für den Ottomotor, um dessen Verbräuche in den Griff zu kriegen, ohne seine Leistungsfähigkeit einzuschränken. Tatsächlich lassen sich die Verbräuche eines aufgeladenen, kleinen Ottomotors gegenüber einem gleich leistungsfähigen aber deutlich größeren Sauger signifikant reduzieren. Auch herrscht weitgehend Einigkeit darüber, worauf der Einspareffekt beruht, nämlich auf den geringeren Verlusten und dem deutlich besseren Wirkungsgrad des kleinen Motors im Teillastbereich. Wie dieser Vorteil zustande kommt, darüber gibt es jedoch unterschiedliche Interpretationen.

Sicher ist, dass der kleinere Motor geringere Schleppverluste verursacht, was den Kraftstoffverbrauch positiv beeinflusst. Die Verluste setzen sich zusammen aus den Reibungsverlusten und den Gasdurchsatzverlusten. Letztere werden jedoch von den offenen Ansaugquerschnitten eines Magerkonzeptes zum großen Teil wieder aufgehoben. Die geringere Verdichtung und der kleinere Hubraum sind beim Schiebetrieb insofern von Vorteil, weil durch das niedrigere Schleppmoment die vernichtete Energie geringer ist. Das niedrige Verdichtungsverhältnis ist jedoch ungünstig für den Wirkungsgrad im gesamten Lastbereich.

In Summe bleibt festzustellen, dass das Potential noch deutlich größer wäre, wenn es gelänge, die Gasdurchsatzverluste zu reduzieren und die Verdichtung auf dem für Benzinmotoren optimalen Niveau zu halten. In Kapitel 10 wird gezeigt, mit welchen Ansätzen in Aufladung und Ventilsteuerung dieses Bestreben umgesetzt werden kann.

## **5.) Valvetronic**

Die sogenannte Valvetronic wurde bei BMW als geeignete Methode zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs entwickelt und dementsprechend in den Medien platziert. Leider haben sich bei realistischer Einschätzung die erhofften Potentiale nicht bestätigt. Der geringe Einspareffekt rechtfertigt nicht die Investitionen und den Aufwand. Die Effizienz der BMW Triebwerke ist zwar unbestritten und in der Öffentlichkeit auch hinlänglich bekannt. Leider ist diese Effizienz durch viele Veröffentlichungen untrennbar mit der Valvetronic verknüpft. Eine Abschaffung wäre gleichbedeutend mit dem Eingeständnis einer Fehlentwicklung und würde sicherlich dem Außenbild von BMW Schaden zufügen. Der einzige Ausweg aus dieser Zwickmühle ist der Ersatz der Valvetronic durch ein innovatives, technisch mindestens ebenso anspruchsvolles und effizientes Ersatzsystem, z. B. eine Einzelzylinderabschaltung.

## **6.) Abgasturboaufladung**

Der Abgasturbolader schickt sich an, neben den Dieselfahrzeugen auch die Benzinmotoren zu erobern. Der Grund liegt in der Verbrauchseinsparung eines aufgeladenen Motors gegenüber einem gleich leistungsfähigen, aber deutlich größeren Saugmotor. Die Aufladung mit Hilfe eines ATL hat aber auch eine ganze Reihe von Nachteilen, die man bei einem fairen Vergleich nicht vernachlässigen darf. Die wichtigsten in ungeordneter Reihenfolge sind: hohe Motorraumtemperaturen, niedriges Verdichtungsverhältnis, Behinderung des Abgasstromes, schlechte Response, wenig inspirierender Klang, Aufwand für Ladeluftkühlung, hohe Kosten. Die Notwendigkeit, den ATL sowohl für niedrige als auch für hohe Momente und Drehzahlen auslegen zu müssen, führt immer häufiger zu einer Kombination von zwei ATLs oder von ATL mit mechanischem Lader. Der Aufwand zur Verminderung der Nachteile steigt extrem an.

Obwohl eine ganze Reihe von negativen Begleiterscheinungen des ATL den Wirkungsgrad deutlich verschlechtert, bleibt doch unter dem Strich ein merkbarer Verbrauchsvorteil übrig. Er ist allerdings im ECE-Verbrauchszyklus am größten, in der täglichen Praxis je nach Fahrweise nur wenig oder gar nicht vorhanden. In Kapitel 10 wird gezeigt, wie die Vorteile von Aufladung ohne Nachteile nutzbar sind.

## **7.) Automatikgetriebe**

Automatikgetriebe (nicht DKG) verfügen mittlerweile über 6, 7 oder sogar 8 Gänge. Rein theoretisch sollten sie eigentlich einen deutlichen Minderverbrauch gegenüber Handschaltgetrieben bewirken. Bereinigt durch die Wandlerverluste trifft dies auch zu. Das AT schaltet immer in den höchstmöglichen Gang, der Motor arbeitet in der Regel in einem günstigen Wirkungsgrad, das Schleppmoment ist extrem niedrig, d. h. der Fahrer kann frühzeitig vom Gas gehen und in die Schubabschaltung, ohne dass das Fahrzeug zu stark verzögert.

Der Grund, warum die Automatikgetriebe gegenüber einem verbrauchsgünstig gefahrenen Schaltgetriebe immer noch negativ abschneiden, ist nach wie vor im Wandler zu suchen. Eine obligatorische Wandlerüberbrückungskupplung verringert zwar die Verluste. Sie kann aber nur bei Konstantfahrt und mäßiger Beschleunigung eingesetzt werden. Bei jedem Gangwechsel muss der Wandler den Schaltruck verschleifen. Deshalb zeitigt auch die inflationäre Zunahme der Gangzahlen nur eine mäßige Wirkung. Im Stadtverkehr sind die vielen Schaltvorgänge sogar kontraproduktiv. Ein zusätzlicher

Energiefresser ist die permanent laufende Hydraulikpumpe. Ein Beweis für den schlechten Wirkungsgrad ist die starke Erwärmung von Automatikgetrieben, die sogar eigene Ölkühler bedingen. Zudem verschlechtert das Mehrgewicht von 30 bis 40 kg die Fahrleistungen und müsste bei einem fairen Vergleich durch einen leistungsfähigeren Verbrennungsmotor kompensiert werden, der dann wiederum einen Mehrverbrauch produziert.

Auswege aus dieser Sackgasse zeigen die automatisierten Schaltgetriebe SMG und DKG. Das sequentielle Schaltgetriebe SMG konnte sich wegen der unangenehmen Zugkraftunterbrechungen nicht durchsetzen. Sämtliche Hersteller arbeiten mittlerweile am Doppelkupplungsgetriebe DKG, das den Gangwechsel ohne Zugkraftunterbrechung bewerkstelligt. Wie die Verbrauchsmessungen mit DKG zeigen, lässt sich mit einem optimal angesteuerten DKG sogar ein niedrigerer Verbrauch erzielen als per Handschaltung. Dies bestätigt die Behauptung, dass der Mehrverbrauch von Automatikgetrieben auf dem schlechten Wirkungsgrad des Drehmomentwandlers beruht.

## **8.) Hybridantrieb**

In der öffentlichen Wahrnehmung spielte bis vor kurzem der Hybridantrieb die Rolle des Retters vor der Klimakatastrophe. Das Potential wurde und wird dabei weit überschätzt. Prinzipiell sind zwei unterschiedliche Zielrichtungen des Hybridantriebs auszumachen.

Der Ansatz des Toyota Prius soll zeigen, wie mit einem benzingetriebenen Fahrzeug die Verbrauchswerte eines gleich leistungsfähigen Dieselfahrzeuges erreicht werden können. Allerdings greift Toyota sehr tief in die Trickkiste und verbessert auch das Getriebe, den Luft- und den Rollwiderstand. Das Endergebnis ist ein Fahrzeug, das in den Fahreigenschaften, den Fahrleistungen, der Optik und der Innenraumanmutung nur eine verschwindend geringe Bevölkerungsschicht anspricht. Ohne massive Subventionen seitens des japanischen Staates wäre dieses Fahrzeug nicht in Serie gegangen und hätte auch von den Kosten her auf dem Markt keine Chance.

Der weitaus interessantere Ansatz ist die Hybridisierung von großen, schweren SUVs und Limousinen. Der Einspareffekt beruht hier nur zu einem Bruchteil auf der Rekuperation, sondern zum größten Teil auf der Boostfunktion des Elektroantriebs. Die zusätzliche Leistung der Elektromaschine in Verbindung mit einem relativ kleinen Benzinmotor bewerkstelligt Fahrleistungen wie sie nur mit einem deutlich größeren Verbrennungsmotor zu realisieren wären. Der Verbrauchsvorteil kommt also zustande durch den Minderverbrauch eines kleinen Verbrennungsmotors gegenüber einem großen Motor.

Für die CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz wirkt sich der Voll-Hybridansatz negativ aus. Ist er doch für die Freunde von SUVs eine willkommene Rechtfertigung, um weiterhin diese extrem umweltschädlichen Fahrzeuge fahren zu können. Wesentlich effizienter wäre eine Strafsteuer für Allradantrieb. 100 kg Mehrgewicht und ein permanent höheres Reibmoment in den Getrieben führen zu einem deutlichen Mehrverbrauch. Fahrleistungsbereinigt beträgt dieser mindestens 1, 5 Liter/100 km. Gleichzeitig erübrigt sich der Energieaufwand für die Herstellung der Allradantriebsteile.

## **9.) Elektroantrieb**

Bei jeder Energiekrise erlebt der Elektroantrieb regelmäßig eine Renaissance. Wobei die Hoffnungen auf der Lithium-Ionen-Technologie beruhen, um einigermaßen praxisrelevante Fahrleistungen und Reichweiten zu erreichen. Mittlerweile scheint jedoch in den Köpfen der politischen Entscheidungs-

träger die Emissionsfreiheit im Fahrbetrieb die wichtigste Rolle zu spielen. Die Umweltschädigung bei der Stromerzeugung interessiert die „Stadtväter“ nicht mehr. Ebenso wenig die Herstellung der vom Umweltgedanken her nicht unumstrittenen Batterien und Elektronikbauteile.

Bei dem Aufwand, der in den meisten Elektrofahrzeugen steckt, muss man unterscheiden zwischen dem Aufwand für den reinen Elektroantrieb und dem Aufwand in der Peripherie. Der Elektroantrieb selbst, bestehend aus Batterie, Steuergerät und Elektromaschine, muss in seinen Komponenten sorgfältig aufeinander abgestimmt sein. Auch hier gilt, ähnlich wie beim Verbrennungsmotor, dass Moment und Leistung auf die höchsten Anforderungen ausgelegt sein müssen.

In aller Regel wird der Wirkungsgrad eines Elektroantriebs meistens erheblich überschätzt. Sicherlich kann eine Elektromaschine im Bestpunkt auf einen Wirkungsgrad von 85 bis 90 % kommen. Dabei sind jedoch **nicht** der Entnahmewirkungsgrad aus der Batterie, der Leitungsverlust und der Verlust im Steuergerät berücksichtigt. In Summe gelingt die Umsetzung von gespeicherter elektrischer Energie in kinetische Energie günstigstenfalls mit einem Wirkungsgrad von 50 %.

Beim Vergleich mit dem Kraftstoffverbrauch eines Verbrennungsmotors muss fairerweise der Primärenergieeinsatz im Kraftwerk als Vergleichsgröße herangezogen werden. Bis die elektrische Energie in der Batterie gespeichert ist, müssen die Wirkungsgrade der Verbrennung, des Generators, des Transports und der Batterieladung eingerechnet werden. In Summe bleiben ca. 50 % als elektrische Energie in der Batterie übrig. In der energetischen Gesamtbilanz stehen also 25 % beim Elektrofahrzeug etwa 35 % bei einem modernen Dieselfahrzeug gegenüber.

Selbst diese Betrachtung unterschlägt noch einige entscheidende Aspekte. Die prognostizierten Fahrleistungen und Reichweiten kommen in aller Regel nur mit extremem Leichtbau und mit Hilfe von niedrigsten Luft- und Rollwiderständen zustande. Die entsprechenden Werte sind nur mit Einschränkungen in Komfort und der Fahrdynamik erreichbar, ähnlich dem bereits bekannten 3L-Lupo. Trotzdem muss im täglichen Gebrauch das Elektrofahrzeug häufig an seiner Leistungsgrenze bewegt werden, so hoch oder niedrig diese auch sein mag. Dabei gehen die Wirkungsgrade von Batterie und Elektromaschine extrem in den Keller. Ein unter gleichen Randbedingungen eingesetzter moderner Dieselmotor kann bei gleichen Fahrleistungen mit einem Verbrauch von 2 -3 L/100 km bewegt werden, verfügt über eine deutlich größere Reichweite (1000 km), und kann auch von der Geräuschemission jederzeit mit einem Elektroantrieb konkurrieren. In Summe ergibt sich eine deutlich günstigere Umweltbilanz sowohl beim Betrieb, als auch in der Herstellung.

In unseren Breitengraden ist mindestens ein halbes Jahr lang die Heizung in Betrieb. Konventionelle Fahrzeuge nutzen die kostenlose Abwärme der Verbrennungsmaschine. Elektrofahrzeuge müssen dafür ihre kostbare elektrische Energie einsetzen, die ihnen natürlich für den Antrieb fehlt.

## **10.) Alternative Konzepte für Verbrennungsmotoren**

Eine Verbesserung der Verbrauchssituation von Verbrennungsmotoren ist nur möglich wenn es gelingt, die genannten Nachteile zu vermeiden. Bei der Nutzung von verbrauchsgünstigen Elementen ist strikt darauf zu achten, dass die erhofften Effekte nicht durch negative Begleiterscheinungen ganz oder teilweise aufgehoben werden.

### **Benzinmotor:**

Beim Benzinmotor wird auf ATL, VVT und Schichtladung verzichtet. Statt reinem Downsizing wird ein sog. Up-and-Down-Sizing realisiert.

Ein Auslegungsbeispiel:

- Basismotor 3,0 Liter 6-Zylinder, 150 kW
- Upsizing mit **PoD** (Power on Demand) mittels elektrischem Lader; virtuell 6 Liter Hubraum; 300 kW
- Downsizing mittels Einzelventilabschaltung und 12-Taktbetrieb, virtuell 1 Liter Hubraum; 30 kW

Der Kraftstoffverbrauch in der Praxis liegt in der Größenordnung von 8 Litern auf 100 km.

#### **Dieselmotor:**

Um beim Dieselmotor signifikante Verbrauchsvorteile zu erzielen, sind folgende Schritte erforderlich:

1. Der hohe Frischgasdurchsatz, hervorgerufen durch die offenen Ansaugkanäle ist zu reduzieren. Dies geschieht am besten durch eine Zylinderabschaltung mittels Ventilabschaltung.
2. Durch diese Maßnahme steigt der Wirkungsgrad der arbeitenden Zylinder.
3. Gleichzeitig ist das hohe Schleppmoment zu reduzieren, was durch die gleiche Maßnahme wie bei 1. erreicht wird.

Durch diese Eingriffe wird der ATL nicht mehr ausreichend angetrieben. Der Tritt auf das Gaspedal zur Beschleunigung ist deshalb mit einer nicht akzeptablen Gedenksekunde verbunden. Deshalb muss der ATL elektrisch unterstützt werden. In Summe ist damit ein Verbrauchsvorteil von ca. 20 % im Praxisverbrauch verbunden.

**Jacob Jacobson**

[www.der-autokritiker.de](http://www.der-autokritiker.de)