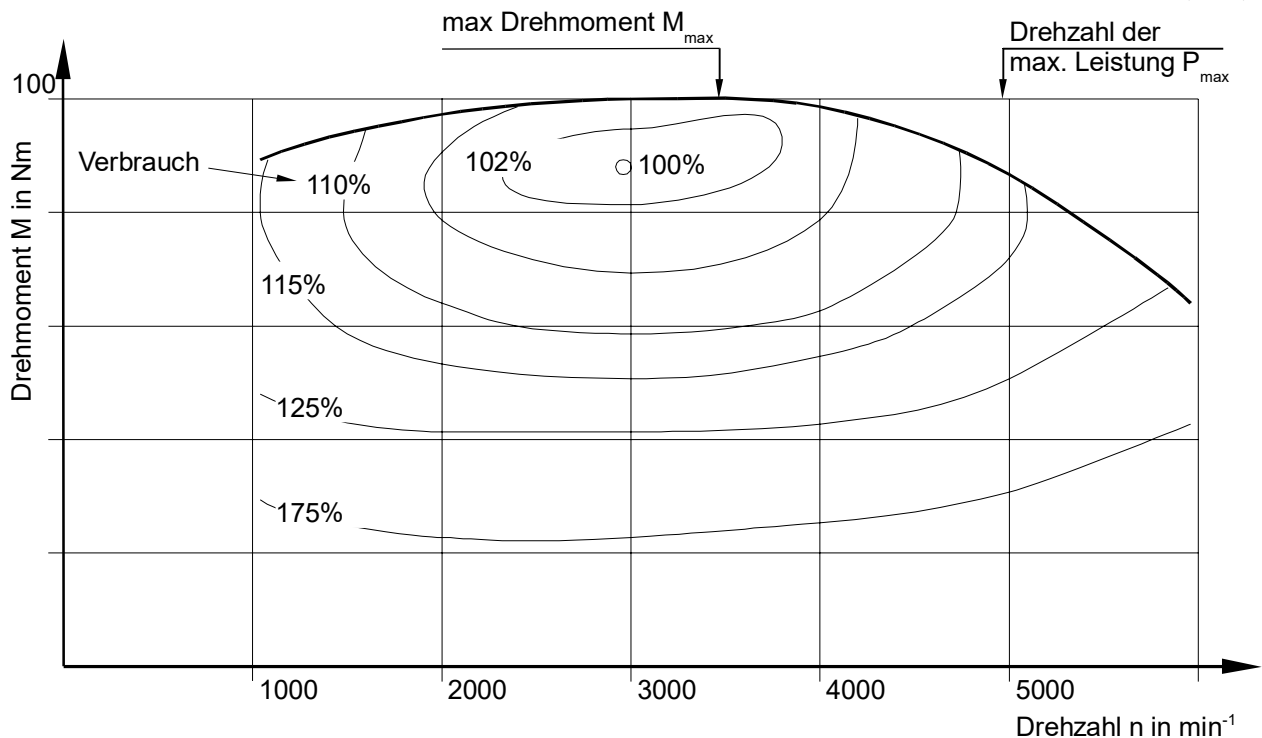




Motor-Verbrauchskennfeld eines Viertakt-Ottomotors

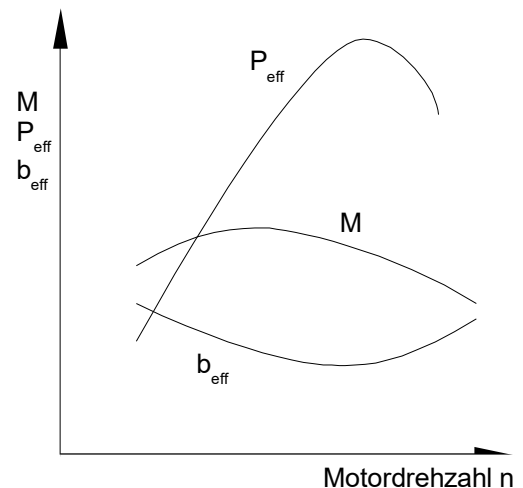
Daten aus: Kraftfahrtechnisches Handbuch, Bosch, 21. Auflage



- 1 Verbrennungsmotor
 - a Grundprinzip einer Wärmekraftmaschine: Wer arbeitet in einem Verbrennungsmotor und wie?¹
 - b Wovon hängt das Drehmoment vor allem ab?
 - c Erklären Sie das obige Diagramm.
 - d Ergänzen Sie den Drehmomentverlauf bei halb durchgetretenem Gaspedal.²
- 2 Verbrauch und Drehmoment
 - a Während des Ansaugtaktes füllt sich der Hubraum eines Saugmotors bei Vollgas höchstens zu 80% mit Frischgas³. Warum ist die Füllung so niedrig?
 - b Wie beeinflusst ein Fahrer die Füllung und damit das Drehmoment?
 - c Für Konstrukteure: Warum liegen höchstes Drehmoment und niedrigster Verbrauch bei ähnlichen Drehzahlen?
- 3 Ergänzungen im Diagramm
 - a Die Formel für die Leistung P bei Drehbewegung lautet $P = 2\pi \cdot M \cdot n$. Wie groß ist die Leistung, für die ein Rechteck im Verbrauchskennfeld steht?
 - b Markieren Sie den Punkt 1 bei $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ und $M = 80 \text{ Nm}$ und zusätzlich die Punkte für doppelte und vierfache Drehzahl bei gleicher Leistung. Verbinden Sie die Punkte sinnvoll mit einer Linie.⁴
 - c Wie wechselt ein Fahrer auf der Linie?
 - d Warum steigt die Leistung über 3500 min^{-1} noch, obwohl des Drehmoment bei Vollgas schon sinkt?
- 4 Ein Pkw-Fahrer schaltet bei $4500/\text{min}$ und halbem Gas den Fahrgeschwindigkeitsregler (Tempomat) ein. Das Getriebe wird nicht geschaltet.
 - a Zeichnen Sie die Veränderung im Verbrauchskennfeld, wenn die Strecke immer steiler bergauf führt.
 - b Wie kann der Fahrer bei $3500/\text{min}$ eingreifen, um die Geschwindigkeit wieder zu erhöhen? Zeichnen Sie die Veränderung ins Verbrauchskennfeld.
 - c Wie kann man schon bei $4500/\text{min}$ eingreifen?
- 5 Wie erreicht man den niedrigsten Verbrauch?
- 6 Sportliche Fahrweise?

Typische Kennlinien eines Viertakt-Ottomotors:

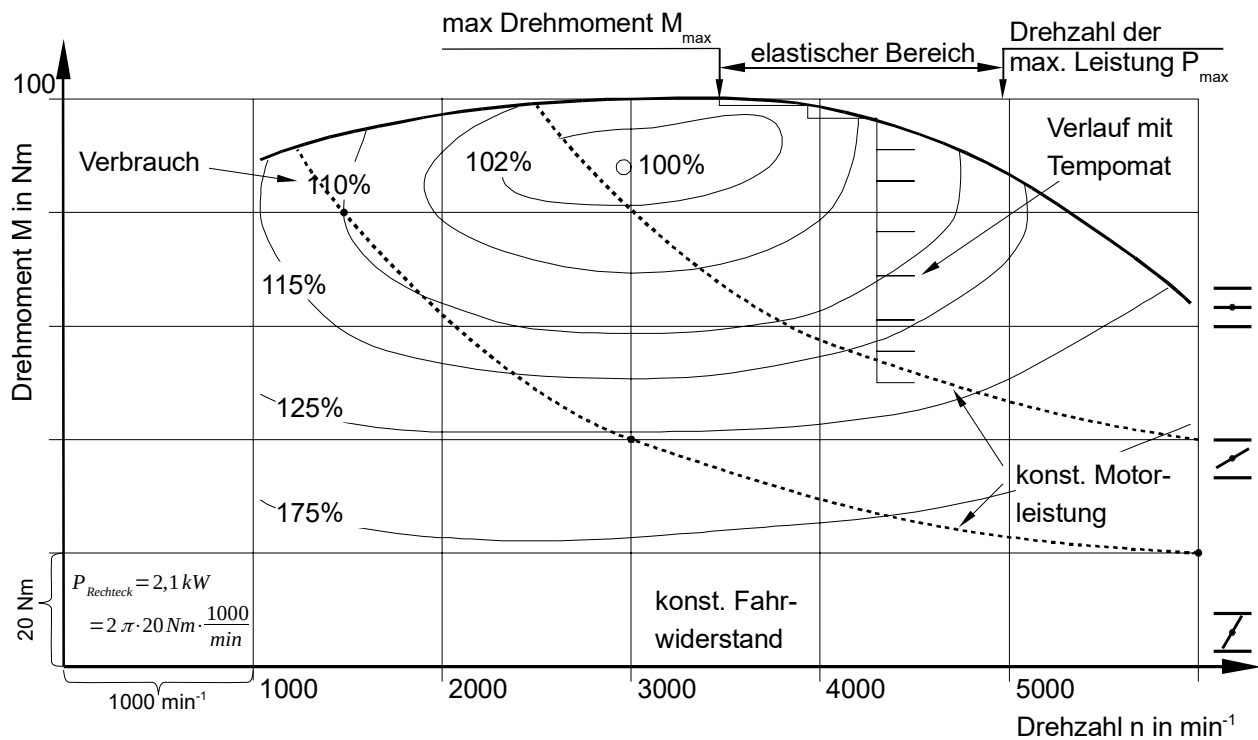
Drehmoment M – Leistung P_{eff} – Kraftstoffverbrauch b_{eff}



¹ Tipp: Es ist nicht der Kolben oder irgendein anderer Metallklumpen.
² Isolinien für das Drehmoment bei konstanter Teillast.
³ Man sagt, die Füllung oder der Liefergrad beträgt 80%.
⁴ Isolinie für konstante Motorleistung. Konstante Motorleistung erreicht man z.B. durch konstante Geschwindigkeit bei konstanter Steigung.



Lösungsvorschläge



- 1a In einem Verbrennungsmotor 'arbeitet' das Kraftstoff-Luft-Gemisch (KLG): Zündung → Verbrennung → Wärme entsteht → das erhitzte Gas 'will' sich ausdehnen (kann aber nicht, weil der Brennraum dicht ist) → es entsteht Druck → Druck bewegt den Kolben (mechanische Arbeit).
Andere Formulierung: Die chemische Energie des KLG wird in thermische Energie umgewandelt, diese mittels Wärmeausdehnung eines Gases teilweise (!) in mechanische Arbeit.²
- 1b Für die Verbrennung ist viel mehr Luft als Kraftstoff erforderlich, deshalb wird das Drehmoment durch die Luftmenge begrenzt, die man in den Brennraum bringen kann. Mehr Kraftstoff einzuspritzen wäre einfach.
Das stöchiometrisch ideale Luftverhältnis ($\lambda = 1$) beträgt ca. 14,8 Gramm Luft pro 1 Gramm Kraftstoff. In Volumen ausgedrückt sind das ca. 15 Liter Luft pro 1 cm³ Kraftstoff oder 1 Tropfen Sprit pro Arbeitstakt.
Die Luftmenge können erhöhen: Mehr Hubraum, Luftpumpen (Turbolader, Kompressor usw.), geringerer Strömungswiderstand (größere und kürzere Ansaugkanäle, mehr oder größere Ventile) und sonstiges (Nachladeeffekt ausnutzen, Resonanzen im Ansaugtrakt, Ladeluftkühlung, Laststeuerung ohne Drosselklappe ..). Wenn man den Luftdurchsatz erhöht, indem man öfter Luft ansaugt (höhere Drehzahl, Zweitakter), steigt nicht das Drehmoment eines einzelnen Arbeitstaktes, aber die Leistung durch mehr Arbeitstakte.
- 1c Im Diagramm ist der Kraftstoffverbrauch abhängig von Drehmoment (Gaspedalstellung) und Drehzahl eingetragen. Den niedrigsten Verbrauch (100%) hat man bei niedriger Drehzahl und fast Vollgas. Je weiter man vom 'idealen' Fahrzustand entfernt ist, desto höher steigt der Verbrauch (bis 175%). Man erkennt auch den Drehmomentverlauf, d.h. das maximale Drehmoment, das bei jeder Drehzahl verfügbar ist.
Natürlich sind die genauen Werte bei jedem Motor anders, auch das Höchstdrehmoment 100 Nm ist nur ein Beispiel, aber insgesamt ist das Diagramm typisch.
- 1d Die Isolinie für voll durchgetretenes Gaspedal (Volllast) heißt auch Drehmomentkennlinie. Im Verbrauchskennfeld ist es die oberste Linie, im unteren Diagramm die Linie M. Die Linie für halb durchgetretenes Gaspedal (Teillast) liegt 'parallel' auf ungefähr halber Höhe.
- 2a Ein Ansaugtakt dauert bei 3000/min nur ca. 0,01s. Wegen dieser kurzen Zeit und der Strömungswiderstände im Luftfilter, im Ansaugrohr, um die Drosselklappe, um die Ventile usw. kann der Hubraum nicht vollständig mit Frischgas gefüllt werden.³
Nebenrechnung: 3000 Umdrehungen pro Minute = 50 Umdrehungen pro Sekunde = 50 Hertz (wie Haushalts-Wechselstrom) = 1 Umdrehung pro 1/50 Sekunden = 1/2 Umdrehung (Ansaugtakt!) pro 1/100 Sekunde.
Frischgas besteht bei Ottomotoren⁴ aus Kraftstoff-Luft-Gemisch, bei Dieselmotoren aus reiner Luft.

¹ Mechanische Arbeit wird erst abgegeben, wenn sich der Kolben bewegt, denn Arbeit ist Kraft mal Weg.
² Jede Wärmekraftmaschine 'arbeitet' mit Wärmeausdehnung, während die Volumenänderung durch chemische Umwandlungen oder Verdampfen des Kraftstoffes kaum eine Rolle spielt. Ein Teil der Wärme muß nach Carnot durch Kühlung abgeführt werden (= Anergie), ein weiterer Teil geht durch technische Unzulänglichkeiten verloren (Reibung, Wärmeverluste ..).
³ Gas wird übrigens nie von Unterdruck angesaugt, sondern nur vom Überdruck auf der anderen Seite gedrückt. Bei einem 'Saugmotor' ist es der Atmosphärendruck, der das Frischgas in den Brennraum drückt. Feuerwehreute kennen den Effekt von Saugpumpen: Mit 1 bar Luftdruck kann man Wasser nicht höher als 10m 'saugen'. Darüber hinaus benötigt die Feuerwehr Druckpumpen und Motoren Luftpumpen (Turbolader, Kompressor..).
⁴ Eine Ausnahme sind neuere Ottomotoren mit Direkteinspritzung.



2b Der Fahrer drückt mit dem Fuß auf das Gaspedal, das bei einem Ottomotor die Drosselklappe (Dk) öffnet.

Im Normalfall dreht der Motor beim Gasgeben zwar schneller, aber das muss nicht so sein: An steilen Strecken kann man bergauf trotz Gasgeben langsamer werden und bergab trotz Leerlauf schneller.
Merke: Gasgeben erhöht das Drehmoment, und erst danach und vielleicht folgt die Drehzahl.

Bei Ottomotoren kann beim Öffnen der Drosselklappe durch das Gaspedal mehr Luft in den Brennraum strömen. Der Vergaser oder die Einspritzanlage mischt die dazu passenden Kraftstoffmenge automatisch zu. Durch die größere Menge an Kraftstoff-Luft-Gemisch erhöht sich das Drehmoment?

Dieselmotoren können mit ihrem Zündverfahren auch sehr magere Gemische zünden. Deshalb können sie immer mit voller Luftmenge laufen und benötigen keine Drosselklappe; das Gaspedal wirkt auf die Einspritzanlage und steuert die Kraftstoffmenge. Aber auch ein Dieselmotor darf nicht mehr Diesel einspritzen als Luft zum Verbrennen da ist; wenn er es trotzdem tut, verbrennt das Diesel nicht vollständig und das Abgas wird zur Rußwolke.

2c Niedriger Verbrauch und hohes Drehmoment treten ein, wenn günstige Verhältnisse beim Ansaugen und Verbrennen herrschen (Resonanz, Strömungsverhalten, Zündverzug, Steuerzeiten ...). Weil Verbrauch und Drehmoment ähnliche günstige Verhältnisse benötigen, liegen minimaler Verbrauch und maximales Drehmoment bei ähnlichen Drehzahlen. Diese Verhältnisse und damit die Drehzahl des maximalen Drehmomentes werden durch die Konstruktion des Motors festgelegt.

3a Leistung ist ein Produkt aus Drehmoment und Drehzahl, die Formel lautet $P = 2\pi \cdot M \cdot n$.

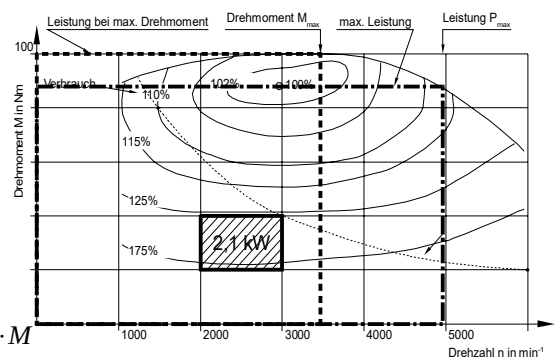
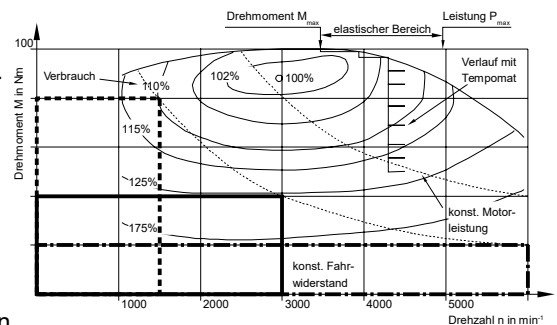
Anschaulicher ist es als Grafik. „M mal n“ sieht nämlich nicht nur aus wie die Formel für eine Rechteckfläche (der konstante Faktor 2π ändert daran nicht viel), man kann die Leistung sogar als Fläche im Verbrauchskennfeld darstellen. Jedes Feld im Diagramm steht für $P = 2\pi \cdot M \cdot n = 2\pi \times 1000/60s \times 20Nm = 2,1kW$.

3b Wenn die Leistungsabgabe $P = 2\pi \cdot M \cdot n$ konstant bleibt, gilt $M \cdot n = \text{const}$. D.h., bei doppelter (vierfacher) Drehzahl wird nur das halbe (viertel) Drehmoment benötigt. Die Flächen sind im Bild für jede Variante gleich groß.

Linien für etwas Konstantes nennt man Isolinien, diejenige für konstante Motorleistung verläuft als Hyperbel. Eine davon ist im Lösungsdiagramm eingetragen, die anderen verlaufen „parallel“.

3b Auf der Isolinie für konstante Motorleistung wechselt der Fahrer durch Schalten ohne Beschleunigen oder Bremsen, denn bei konstanter Geschwindigkeit und Steigung ändert sich der Leistungsbedarf nicht. Man erkennt, dass man mit niedriger Drehzahl im höheren Gang in verbrauchsgünstigere Bereiche gelangt und Kraftstoff spart.

3d Im Bild erkennt man auch ohne Rechnung, dass die Leistung (=Fläche) bei maximalem Drehmoment (Strichlinie) kleiner als die maximale Leistung (Strich-Punkt-Linie) ist. Das liegt daran, dass bis zur max. Leistung das Drehmoment langsamer sinkt als die Drehzahl. Bei höheren Drehzahlen sinkt das Drehmoment allerdings schneller, deshalb sinkt auch die Leistung.



Man kann es auch berechnen:

Drehzahl n	Moment M	Leistung P
3000 min ⁻¹	100 Nm	31,4 kW
4000 min ⁻¹	98 Nm	41,1 kW
4500 min ⁻¹	94 Nm	44,3 kW
5000 min ⁻¹	87 Nm	45,6 kW
5500 min ⁻¹	76 Nm	43,8 kW

Beispiel:

$$\begin{aligned}
 P &= 2\pi \cdot n \cdot M \\
 &= 2\pi \cdot 3000 \frac{1}{\text{min}} \cdot 100 \text{ Nm} \\
 &= 2\pi \cdot 3000 \frac{1}{60 \text{ s}} \cdot 100 \text{ Nm} \\
 &= 31416 \text{ W} \\
 &= 31,4 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

¹ Ohne Drosselklappe würde ein Ottomotor nur unter Volllast arbeiten. Ohne Gasfuß lässt die Drosselklappe gerade genügend Frischgas für den Leerlauf vorbeigehen; bei Vollgas ist die Drosselklappe maximal geöffnet, lässt die maximale Füllung von 80% ein und ermöglicht damit das maximale Drehmoment, das bei der aktuellen Drehzahl möglich ist.
² Da der Strömungswiderstand um die Dk ein Verlustfaktor ist, gibt es auch Ottomotoren ohne Dk. Sie steuern die Luftmenge z.B. durch den Hub oder die Öffnungsdauer der Einlassventile. Bei Otto-Motoren genügt es nicht, einfach nur die Kraftstoffmenge zu verändern ohne Rücksicht auf die Luft. Weil Kraftstoff-Luft-Gemische nur in einem ganz bestimmten Verhältnis zündfähig sind (ca. 1 kg Kraftstoff auf 15 kg Luft plus/minus ein paar Prozent), müssen Luft- und Kraftstoffmenge ziemlich genau aufeinander abgestimmt werden. In der Praxis steuert der Fahrer die Luftmenge per Gaspedal und Dk, während das Fahrzeug die Luftmenge misst und dann die passende Kraftstoffmenge durch Vergaser oder Einspritzvorrichtung hinzumischt.



- 4a Wenn die Strecke steiler wird, wird ein Teil der Antriebskraft für die Steigung benötigt und steht nicht mehr für die Überwindung des Luftwiderstandes zur Verfügung. Deshalb wird das Fahrzeug langsamer und die Drehzahl des Motors sinkt. Sobald die Fahrgeschwindigkeit den Grenzwert des Tempomaten unterschreitet, erhöht dieser das Drehmoment des Motors, z.B. durch Öffnen der Drosselklappe (Ottomotor) oder durch Steigerung der Einspritzmenge (Dieselmotor). Bis die Vollastlinie erreicht ist, kann so zusätzliche Antriebskraft gewonnen und die ursprüngliche Geschwindigkeit erreicht werden.

Wenn die Strecke so steil wird, dass auch Vollgas die Geschwindigkeit nicht mehr halten kann, werden Fahrzeug und Motor langsamer. Wie man an der Vollastlinie über 3500 min^{-1} erkennt, steigt das Motormoment zunächst weiter an, wenn die Drehzahl fällt. Das Fahrzeug hat also noch eine Chance, die Geschwindigkeit zu stabilisieren. Es fährt zwar langsamer, aber der Fahrer muss noch nicht eingreifen.

Sobald aber die Drehzahl unter die Drehzahl des maximalen Drehmomentes fällt, sinken Drehmoment und Drehzahl im Teufelskreis. Wenn der Fahrer jetzt nicht handelt, würgt der Motor ab.

- 4b,c Der Fahrer kann herunterschalten. Dadurch steigt zwar nicht das Drehmoment des Motors, aber seine Drehzahl. Und die Drehzahl tauscht das Getriebe im kleineren Gang in ein höheres Antriebsmoment für die Räder.

Weil man dort nicht schalten muss, heißt der Drehzahlbereich über dem maximalen Drehmoment „elastischer Bereich“. Er reicht bis zur Drehzahl der maximalen Leistung; darüber hinaus nützt Herunterschalten nichts mehr, weil dort das Drehmoment des Motors schneller sinkt als die Drehzahl steigt.¹

Bei Motoren für komfortable Pkw strebt man einen großen elastischen Bereich an. Dazu legt man das maximale Drehmoment auf niedrige Drehzahlen und kann damit niedrigtourig und schaltfaul fahren.

Wenn ein Konstrukteur eine hohe Leistung möchte ohne den Motor zu vergrößern, legt er das maximale Drehmoment auf höhere Drehzahlen. Läge im Verbrauchskennfeld das maximale Drehmoment bei $n = 5000 \text{ min}^{-1}$, wäre dort die Leistung $P = 2 \pi \cdot 100 \text{ Nm} \cdot 5000 \text{ min}^{-1} = 52,4 \text{ kW}$.

Man müsste aber mit höheren Drehzahlen fahren mit allen bekannten Folgen für Lebensdauer, Lärm und Verbrauch.

- 5 Den Verbrauch kann man wie folgt senken:

- Fahrzeug stehen lassen und Körperfett statt Kraftstoff verbrennen.
- Motor abstellen, wenn er nicht benötigt wird (rote Ampel, Stau, Bahnschranke, Warten auf ..).
- Gas wegnehmen, wenn kein Drehmoment benötigt wird (z.B. wenn die rote Ampel naht)
- keine 20 m-Zwischensprints im dichten Verkehr
- In möglichst hohem Gang fahren, weil der Motor bei niedriger Drehzahl und fast Vollgas einen geringeren spezifischen Verbrauch hat. Natürlich schluckt der Motor bei fast Vollgas mehr Kraftstoff je Arbeitstakt, aber es gibt weniger Arbeitstakte, sodass der Kraftstoffverbrauch insgesamt sinkt. Solange die Drehzahl hoch genug ist, dass der Motor rund läuft, sinkt auch noch der Motorverschleiß.
- Beschleunigen soll man zügig mit fast Volllast, denn erstens ist Volllast relativ (!) verbrauchsgünstiger und zweitens dauert der Mehrverbrauch nicht so lange.

- 6 Zum Vorwärtskommen spielt es keine Rolle, ob die benötigte Antriebskraft bei hoher oder niedriger Motordrehzahl erzeugt wird. Der Unterschied liegt nur beim Bezahlen: Im höheren Gang spart man Kraftstoff, Reifen und Motorverschleiß, und im niedrigeren Gang kann man Beschleunigen ohne zu schalten.

Da man im hohen Gang schon mit hohem Motormoment fährt, kann man es kaum noch erhöhen und muss deshalb vor dem Beschleunigen zurückschalten. Im niedrigen Gang bei hoher Drehzahl fährt man mit weniger Motormoment und kann es einfach per Gaspedal steigern („Beschleunigungsüberschuss oder -reserve“).

Die Frage ist, ob man ständig mit hoher Drehzahl fahren will, nur damit man vor dem Beschleunigen nicht schalten muss. Angst, den Gang nicht zu finden? In dem Fall empfehle ich ein Automatikgetriebe.

„Sportlich“ ist Dauerfahren im kleinen Gang jedenfalls nicht: Ein Formel-1-Pilot rührt durchschnittlich alle 2 Sekunden in seinem Getriebe und fährt er nie mit höherer Drehzahl als nötig, um Motor und Tank zu schonen.

Aber schnell abrufbares Drehmoment spürt man sofort, Kraftstoffkosten erst später, und Technik versteht wieso keiner. Gas geben scheint cool, Nachdenken ist anstrengend, und Geld für Sprit geht wohl nie aus. Beschleunigen gibt ein Gefühl der Macht (amerik.: power, lat.: potentia), und bei Power und Potenz setzt bei vielen leider das Hirn aus. Also fahren sie mit höherer Drehzahl als nötig und produzieren Lärm, Abgase und Kosten. Hoffentlich müssen sie wenigstens die Kosten selbst tragen (und nicht Mama ?).

Nebenbei bemerkt: „Er schaltet nicht“ ergibt auch auf neuronaler Ebene einen Sinn und ist eine wichtige Ursache für den hohen Anteil junger Männer auf Unfallstationen und Friedhöfen.

Einarbeiten: technik profi 05-2008 S.11

¹ Anders ausgedrückt: Wenn der Motor schon bei seiner Höchstleistung ist, kann man nicht mehr beschleunigen.