

Thema: Leistung, Drehmoment, Fahrleistungen, Getriebe

Fachbeitrag für www.motor-talk.de von Jürgen Tiegs

Aus gegebenem Anlass möchte ich etwas Licht in die ewige Debatte um Leistung und Drehmoment bei Verbrennungsmotoren bringen.

Die einen sind der Ansicht, daß allein die Maximalleistung eines Motors für die Fahrwerte verantwortlich ist. Die anderen behaupten das vom maximalen Drehmoment. Dann gibt's Leute, die der Meinung sind, daß 100 Diesel-PS ungefähr 140 Benziner-PS entsprechen. Was ich auch schon gelesen habe: Ein Golf TDI mit 330Nm muß automatisch besser beschleunigen als ein Porsche 911 mit 320Nm.

Was davon ist jetzt korrekt? Die Antwort ist eindeutig: Nicht viel!

Begriffserklärungen und Erläuterungen:

Motordrehmoment:

Liegt an der Kurbelwelle, bzw. an der Getriebeeingangswelle an. Dieses Motordrehmoment ist bei jeder Motordrehzahl anders. Es sagt erstmal nur über den Motor selbst etwas aus. Mit Fahrleistungen hat das noch sehr wenig zu tun, da ein Moment grundsätzlich im Getriebe gewandelt wird. Damit hängt es vom Getriebe und seiner Übersetzung ab, wieviel davon am Rad noch ankommt. Bei länger übersetzten Getrieben ist das zwangsläufig weniger als bei kürzer übersetzten Getrieben.

Von der Presse und am Stammtisch wird sehr oft nur vom maximalen Motordrehmoment gesprochen. Wie wenig dieser Wert in Wirklichkeit aussagt, wird auf den folgenden Seiten dargestellt.

Raddrehmoment:

Liegt am Rad an nachdem das Motordrehmoment im Getriebe gewandelt wurde.

Die Motorleistung hängt mit dem Motordrehmoment DIREKT zusammen, und zwar über die Beziehung $P = M * n / 9550$.

Ein Drehmomentdiagramm reicht also aus, um die Leistungskurve zu berechnen (und umgekehrt).

Herleitung der Formel $P = M * n / 9550$

Als Basis gilt:

$$P = M * \omega$$

bzw.:

$$P = M * n * 2 * \pi$$

Bis jetzt ist die Einheit Nm/min. Wir wollen aber Nm/s haben. Daher müssen wir durch 60s dividieren.

also folgt:

$$P = M * n * 2 * \pi * 1/60$$

ergibt:

$$P = M * n * 0.10471667$$

Die Einheit ist jetzt Nm/s bzw. Watt. Die Leistung eines Fahrzeugmotors gibt man aber in kW an. Daher kommt noch der Faktor 1000 dazu. Also folgt:

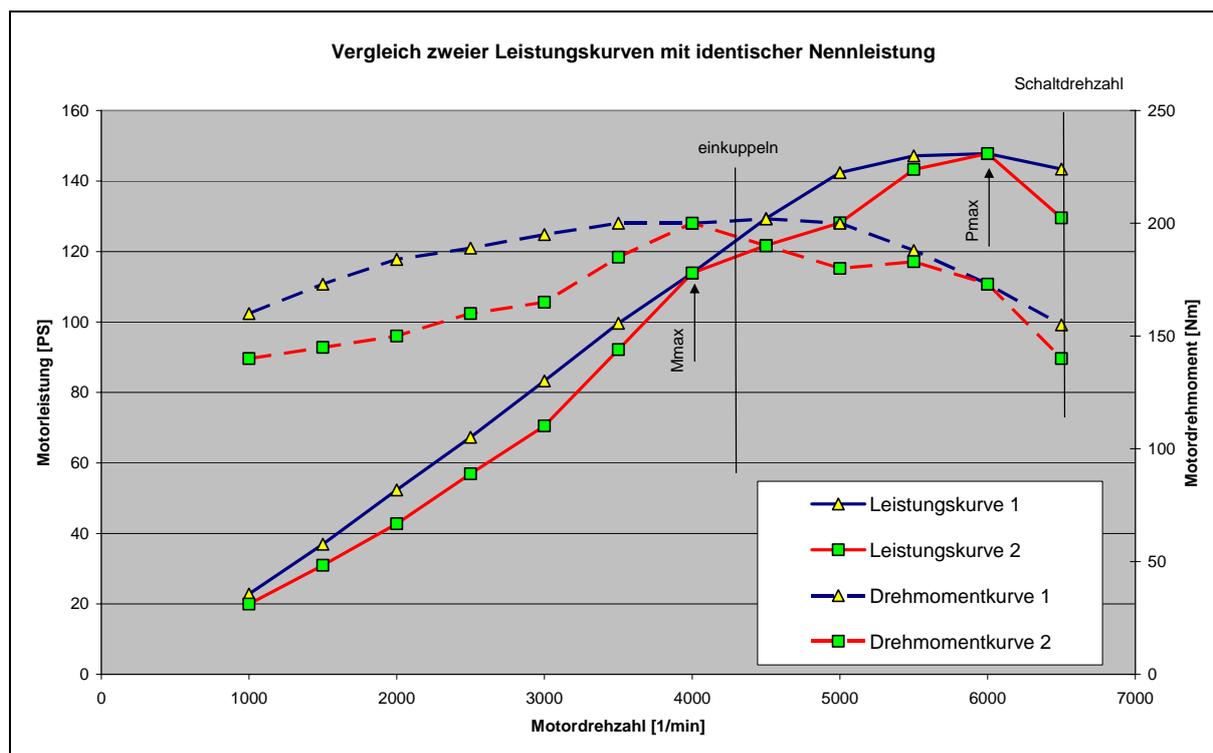
$$P = M * n * 0.00010471667$$

Da die Zahl 0.00010471667 aber schlecht zu merken ist, nimmt man den Kehrwert. Dieser ist 9549.57, also gerundet 9550.

So ergibt sich die Endformel mit der Einheit kW:

$$\mathbf{P = M * n / 9550}$$

Typisches Leistung/Drehmoment-Diagramm:



Es sind hier zwei Motoren aufgetragen. Beide haben ein maximales Motordrehmoment von 200Nm bei 4000/min und eine Motorleistung von 147PS bei 6000/min.

Obwohl die Eckdaten dieser zwei Motoren identisch sind, unterscheiden sie sich in ihrer Kraftentfaltung. Der Motor 1 verfügt über eine fülligere Drehmoment- und Leistungskurve als Motor 2.

Nehmen wir an, dass das Getriebe so gewählt ist, dass bei 6500/min geschaltet wird und die Drehzahl im nächst höheren Gang auf rund 4300/min fällt. Motor 1 hat bis auf den Punkt bei 6000/min stetig mehr Motordrehmoment und mehr Motorleistung. Somit wird der Wagen 1 besser beschleunigen. Daran erkennt man, dass die reinen Eckdaten eines Motors nur eine Teilinformation geben.

Was haben wir jetzt von den Daten „Motordrehmoment“ und „Motorleistung“? Eigentlich relativ wenig. Denn das Getriebe und seine Übersetzung spielt eine wesentliche Rolle dafür, wie ein Fahrzeug in Bewegung gesetzt werden kann. Die alten amerikanischen Fahrzeuge hatten zum Teil nur 2- oder 3-Stufen Getriebe und die Beschleunigung war trotz ordentlich Motorpower eher bescheiden weil die Drehzahlsprünge viel zu groß waren. Als krasses Gegenstück kann man die neue S-Klasse anführen. Sie besitzt eine 7-Gang Automatik und beschleunigt für das Gewicht und die zur Verfügung stehende Motorkraft hervorragend.

Warum ist das so?

Wie wir alle wissen, beschleunigt ein Fahrzeug in einem ganz bestimmten Drehzahlbereich am besten. Optimal wäre es jetzt, wenn man die Motordrehzahl immer konstant in diesem Bereich halten könnte. Das geht aber nur bei sehr wenigen Fahrzeugen die ein CVT (stufenloses Getriebe) haben. Man muß sich also anders behelfen.

Je mehr Gänge zur Verfügung stehen, desto kleiner werden die Drehzahlsprünge und umso enger bewegt man sich zwischen den Schaltvorgängen um optimalen Drehzahlpunkt herum. Damit erzielt man auch die besten Fahrwerte.

Radzugkraft:

Die Radzugkraft ist genau das, was ein Fahrzeug in Bewegung bringt. Es ist die Kraft, die am Radumfang anliegt. In ihr stecken alle Informationen drin (Motordrehmoment, Getriebeübersetzung, Radgröße). Ihr entgegengesetzt sind die Fahrwiderstands- und Trägheitskräfte.

Wann muß man schalten?

Der optimale Schaltpunkt ist dann erreicht, wenn man im nächst höheren Gang eine höhere Radzugkraft als im aktuellen Gang hat.

Um diesen optimalen Schaltpunkt zu finden, muß man sich mit Hilfe der Drehmomentkurve, der Getriebeübersetzung und der montierten Reifengröße ein Radzugkraft-Diagramm erstellen. Sobald sich die Kurven der einzelnen Gänge schneiden, muß in den nächsten Gang geschaltet werden um die beste Beschleunigung zu erreichen. Schneiden sich die Kurven erst gar nicht, dann gilt: Motor ausdrehen bis zum Begrenzer.

Auf den folgenden Seiten sind mehrere Radzugkraftdiagramme abgebildet damit man sich in die Materie hineindenken kann.

Der Einfluss der Übersetzung

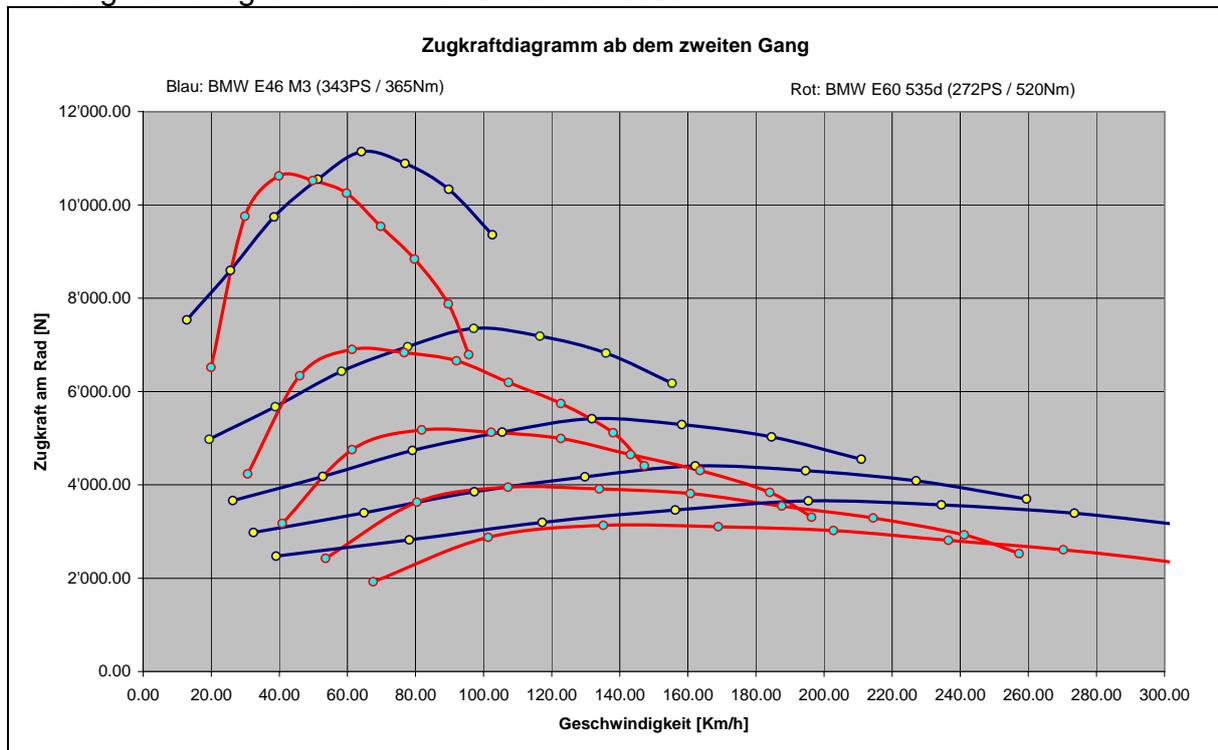
Gerade Turbodiesel erreichen sehr hohe Motordrehmomentwerte bei niedrigen Drehzahlen. Dieses Motordrehmoment ist aber (wie schon vorhin angesprochen) nur ein Indiz dafür, wie der Wagen „abgeht“ und trifft keine definitive Aussage. Warum? Weil der Diesel deutlich länger übersetzt sein MUSS um die gleiche Geschwindigkeit wie ein Benziner erreichen zu können (denn die Motordrehzahl beim Diesel ist ja wesentlich niedriger als beim Benziner). Daraus ergibt sich, dass der Benziner sein niedrigeres Motordrehmoment aufgrund seines kurz übersetzten Getriebes wesentlich besser hochwandeln kann als der lang übersetzte Diesel.

Turbodiesel gegen Hochdrehzahl-Sauger:

Trotz der längeren Übersetzung hat der Diesel in der Regel den besseren Durchzug bei niedrigen Drehzahlen. Daß es auch anders aussehen kann, zeigt das Diagramm vom 3.2 Liter M3-Motor und dem 3.0 Liter Register-Turbodiesel des 535d.

Trotz des gigantischen Motordrehmomentes des Diesels (520Nm) besitzt der Benziner (365Nm) über einen sehr weiten Drehzahlbereich eine z. T. deutlich höhere Radzugkraft. Diesen Benziner kann man also (ganz entgegen vieler Meinungen à la „M3 ist ne Drehorgel bei der untenrum nix geht“) sehr schaltfaul fahren, zum Teil sogar schaltfauler als den 535d (im sechsten Gang liegt die Radzugkraft des M3 konstant oberhalb der des 535d, egal bei welcher Drehzahl und bei welcher Geschwindigkeit).

Radzugkraft Diagramm BMW E46 M3 und 535d:

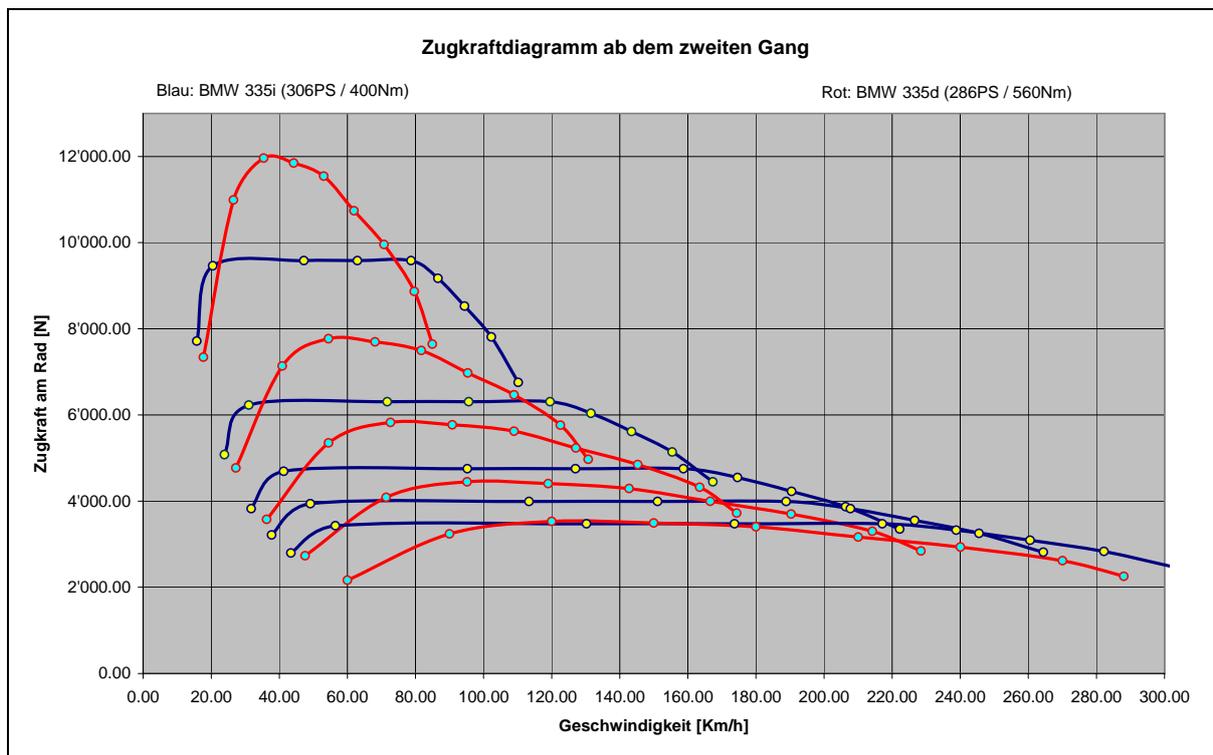


Man kann aber sagen, daß der Großteil der Turbomotoren den besseren Durchzug (niedrige Drehzahlen) im Vergleich zum Saugmotor hat. Ob man jetzt einen Motor bevorzugt, der den Bumms bei niedrigen Drehzahlen hat, oder lieber einen Motor der den Vortrieb gleichmässig entfaltet, das ist und bleibt Geschmackssache.

Turbodiesel gegen Turbobenziner:

Verglichen sind hier der BMW E90 335i mit 306PS und 400Nm und der BMW E90 335d mit 286PS und 560Nm. Hier ist der Diesel in den unteren Gängen verhältnismässig kurz übersetzt und seine Radzugkraft liegt im mittleren Drehzahlbereich teilweise deutlich über der des Benziners. Bei hohen Drehzahlen kann der Benziner seine Leistung ausspielen.

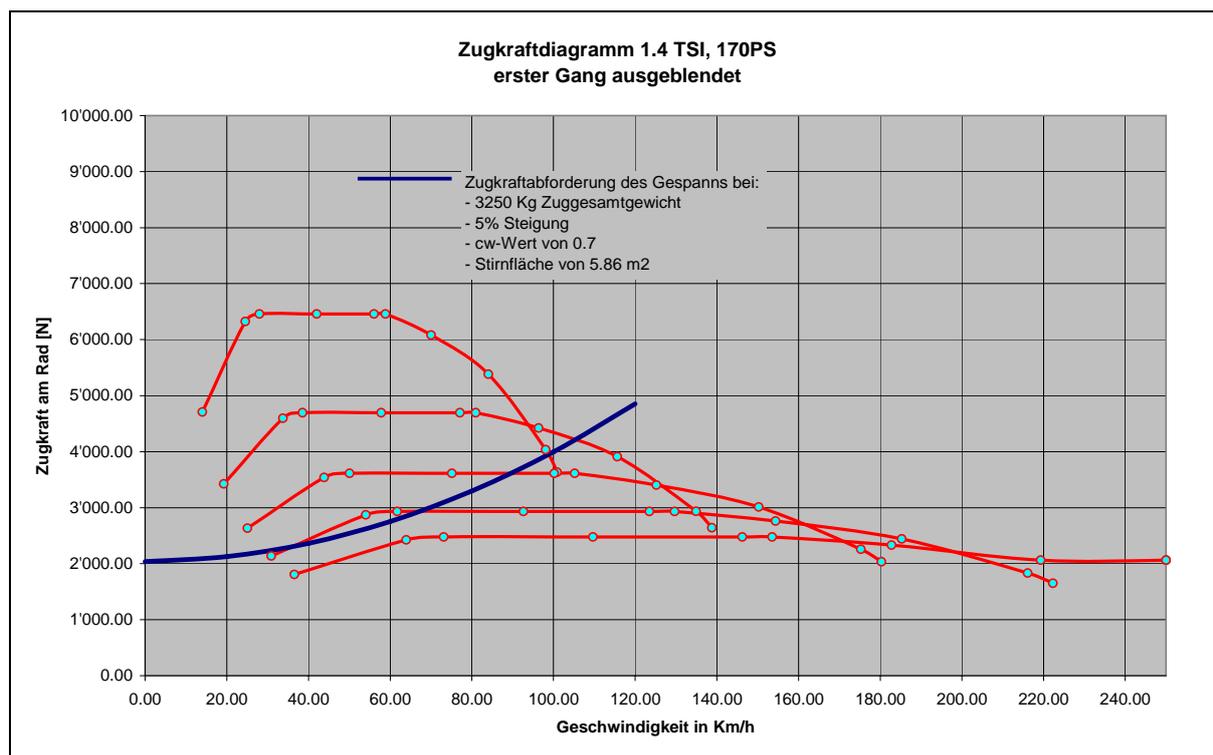
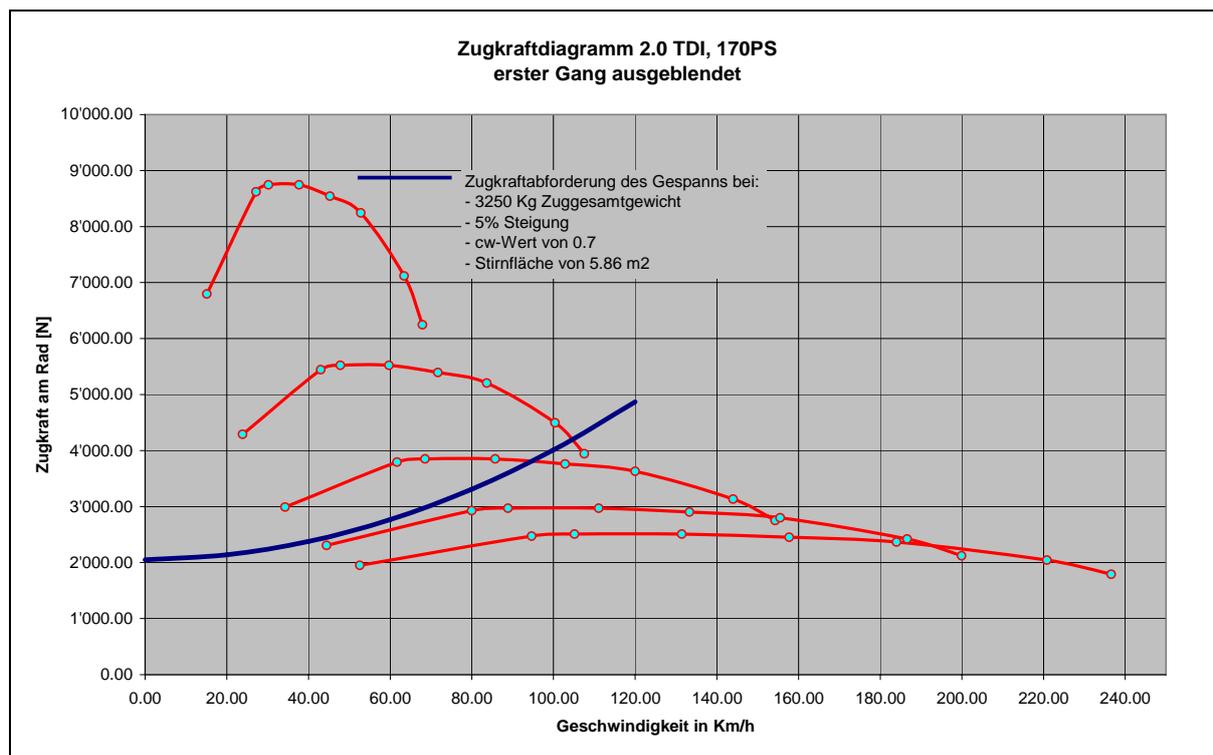
Auffällig ist trotzdem, dass der Benziner gerade in den oberen Gängen massiv punkten kann. IM 6. Gang hat der Benziner durchgängig mehr Zugkraft am Rad als der Diesel.



Diesel oder Benziner als Zugfahrzeug?

Die Ansicht, ein Diesel würde sich aufgrund seines hohen Motordrehmomentes besser als Zugfahrzeug eignen, ist weit verbreitet. Dies ist allerdings aufgrund der enormen Weiterentwicklung bei den Benzinmotoren nicht mehr richtig. Moderne Benziner verfügen immer öfter über Abgasturbolader, die bereits bei niedrigen Drehzahlen ordentlich Ladedruck aufbauen und somit ein hohes Motordrehmoment erzielen.

Beispielhafter Vergleich der Motoren 1.4 TSI (170PS, 240Nm) und 2.0 TDI (170PS, 350Nm) im Golf 5.



Als Basis wurde mit einer 5-prozentigen Steigung, einem gesamthaften cw-Wert von 0.7, einer Stirnfläche von 5.87 m² und einem Gesamtzuggewicht von 3250 Kg gerechnet. Der erste Gang ist für eine bessere Detailauflösung ausgeblendet.

Alle Zustände oberhalb der blauen Linie sind mit den oben genannten Voraussetzungen fahrbar. Alle Zustände unterhalb der blauen Linie führen zu einem Absacken der Geschwindigkeit und zwingen schlussendlich zum Runterschalten.

Man erkennt, dass der TDI die ersten vier Gänge nutzen kann. Der TSI kann sogar die ersten fünf Gänge.

Die maximal erreichbaren Geschwindigkeiten sind wie folgt:

TDI:

68 Km/h im zweiten Gang (im Drehzahlbegrenzer)

104 Km/h im dritten Gang (nahe am Drehzahlbegrenzer bei ca. 4400/min)

TSI:

99 Km/h im zweiten Gang (nahe am Drehzahlbegrenzer bei ca. 7000/min)

106 Km/h im dritten Gang (bei ca. 5500/min)

90 Km/h im vierten Gang (bei ca. 3500/min)

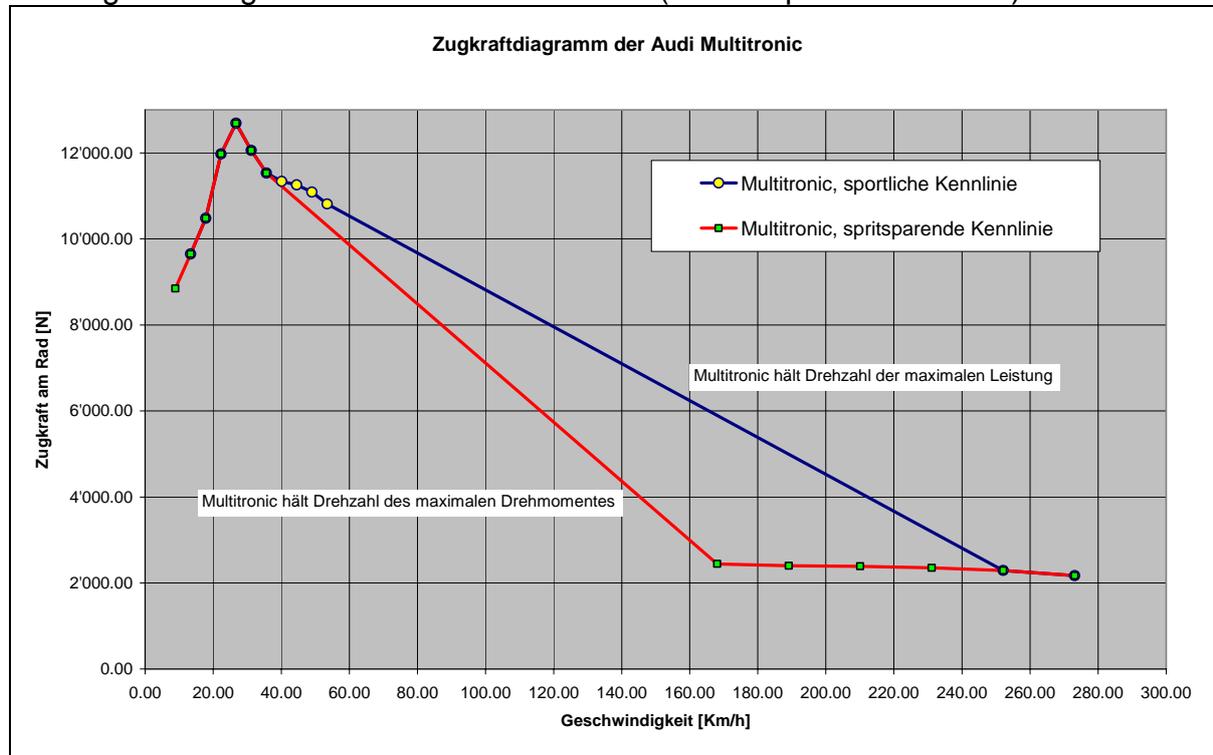
65 Km/h im fünften Gang bei ca. 2300/min)

Insgesamt bietet sich der TSI also als deutlich flexibleres Zugfahrzeug an. Einziger Nachteil dürfte hier der deutlich höhere Kraftstoffverbrauch des Benziners sein.

Nebenschauplatz: Die Audi Multitronic:

Wie Radzugkraftdiagramme von Stufengetrieben aussehen wissen wir nun. Der Vollständigkeit halber sollte auch das stufenlose Getriebe von Audi, die „Multitronic“ erwähnt werden.

Radzugkraft Diagramm einer Audi Multitronic (am Beispiel Audi A4 3.0)



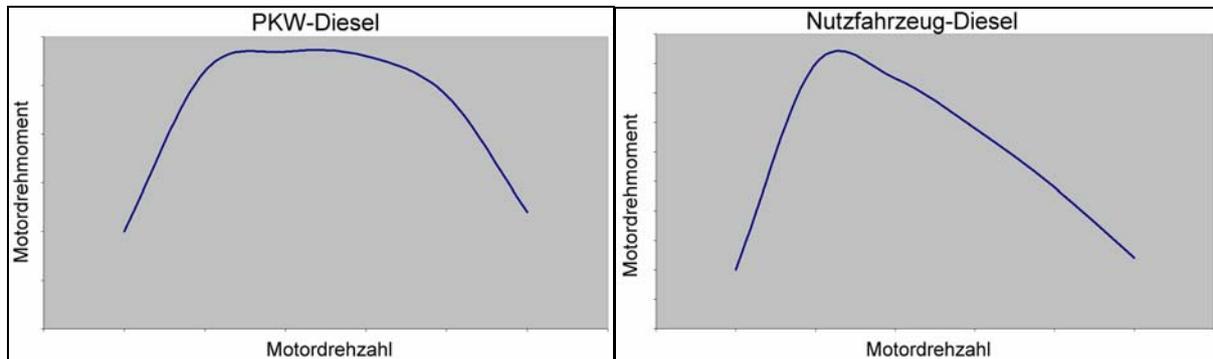
Die Audi Multitronic will ich hier nur kurz ansprechen weil sie bisher ein Schattendasein führt.

Sie ist ein stufenloses Getriebe welches mit unterschiedlichen Schaltprofilen ausgestattet ist. Der sportlich orientierte Fahrer benutzt die blaue Kennlinie für maximale Beschleunigung, nimmt aber eine hohe Motordrehzahl und einen höheren Verbrauch in Kauf. Der Normalfahrer wird mit einer Kennlinie fahren, die so lange wie möglich (bis zum Erreichen der Endübersetzung) tiefere Drehzahlen nutzt. Das führt aber dazu, dass die Radzugkraft nicht so hoch ist wie im Sportkennfeld. Dementsprechend langsamer beschleunigt der Wagen.

Ein CVT ist, wie schon erwähnt, eigentlich die perfekte Lösung. Sie ermöglicht zumindest theoretisch beste Fahrleistungen und kann fast jede gewünschte Fahrdrehzahl schalten. In der Praxis sieht es momentan noch anders aus. Die Multitronic-Fahrzeuge beschleunigen durch die Bank schlechter als ihre handgeschalteten Pendanten. Anscheinend sind die Verluste im Getriebe noch zu hoch und fressen den eigentlichen Vorteil wieder auf.

Was ist eigentlich mit LKW- und Nutzfahrzeugmotoren?

Wer sich die Leistungs- und Drehmomentkurven von Nutzfahrzeugmotoren ansieht, der wird schnell die erheblichen Unterschiede in den Kurvenverläufen zwischen Nutzfahrzeugmotor und PKW-Motor feststellen. Während der PKW-Motor ein möglichst gleichmässiges und hohes Drehmomentniveau zum Ziel hat, soll der Nutzfahrzeugmotor einen möglichst „spitzen“ Drehmomentverlauf aufweisen. Nachfolgend der qualitative Vergleich von PKW Turbodiesel und Nutzfahrzeug-Turbodiesel:



Warum ist das so?

Die Einsatzzwecke sind hier völlig unterschiedlich gelagert. Ein PKW soll eine hohe maximale Beschleunigung sowie eine hohe Endgeschwindigkeit erreichen. Gleichzeitig muss der Tatsache Rechnung getragen werden, dass diese Motoren fast ausschliesslich im Teillastbereich gefahren werden.

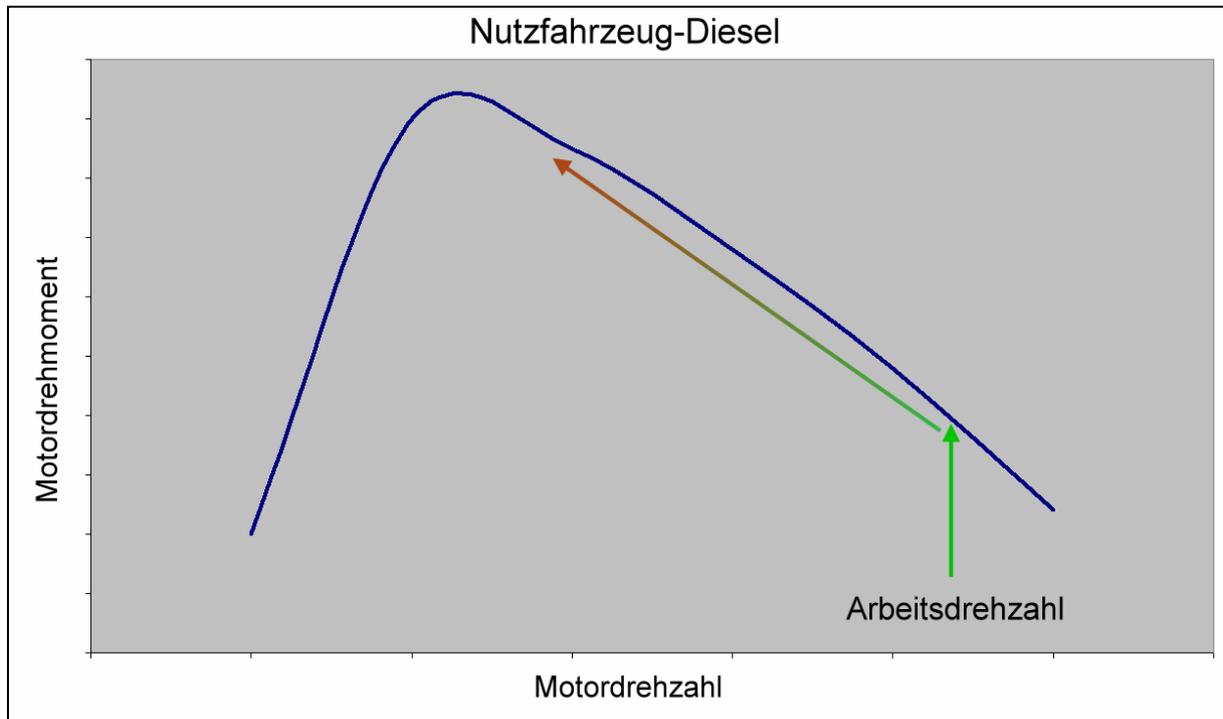
Ein Nutzfahrzeugmotor (nehmen wir einfach mal den Motor für eine Planierraupe oder einen Traktor als Beispiel) wird während typischer Einsätze eher im Volllastbereich bewegt. Er soll sein Drehmoment- und Leistungsmaximum bei niedrigen Drehzahlen haben und einen möglichst grossen Drehmomentanstieg aufweisen. Warum das nicht „Drehmomentverfall“, sondern „Drehmomentanstieg“ heisst, wird im nachfolgenden Absatz klar.

Den Sinn und Zweck dieses Drehmomentanstiegs kann man anhand einer Planierraupe gut erläutern.

Der Erdhaufen vor dem Planierschild wird immer grösser wodurch ein Bedarf an Mehrleistung entsteht um diesen Erdhaufen weiterschieben zu können. Bei dieser Belastung sinkt die Drehzahl des Motors und somit die Schubgeschwindigkeit der Raupe. Eine Verringerung der Motordrehzahl führt dank der nutzfahrzeugtypischen Drehmomentkurve aber zu einem Anstieg des Motordrehmomentes und der Motorleistung (siehe dazu die Grafik auf der folgenden Seite). Dadurch wird ein weiterer Abfall der Drehzahl und der Schubgeschwindigkeit in gewissen Grenzen verhindert – denn je stärker die Drehzahl abfällt, desto mehr Power gibt der Motor ab.

Man kann im übertragenen Sinne sagen: Die Motordrehmomentkurve von solchen Nutzmotoren ermöglicht eine von der angehängten Last relativ unabhängige Fahrgeschwindigkeit. Diese Motoren sind „immun“ gegen steigende Belastungen und werden bei Belastung kaum langsamer.

Warum also „Drehmomentanstieg“ und nicht „Drehmomentabfall“? Nun, man betrachtet die Kurve von der Richtung der Arbeitsdrehzahl her. Bei einer Belastung des Motors fällt die Drehzahl und das Drehmoment STEIGT an.



Zur Grafik:

Die Arbeitsdrehzahl ist die Drehzahl die ohne Belastung gefahren wird. Mit steigender Belastung (Pfeil wird rot) erhöht sich das Motordrehmoment und bremst somit einen weiteren Abfall der Drehzahl automatisch ab.