

Drehmoment und Leistung

Zusammenhang zwischen Drehmoment und Leistung

Wirkung des Drehmoments bei Benzin- und Dieselmotoren

Kurzfassung

Drehmoment und Leistung

Geradezu allgemein besteht die Vorstellung dass das größere motorseitige Drehmoment des Dieselmotors auch an den Antriebsrädern größeres Drehmoment bewirkt. Tatsächlich hat aber ein Benzinmotor wegen seiner höheren Drehzahl auch eine dementsprechend größere Getriebeübersetzung was sich entsprechend auch auf das Drehmoment an den Antriebsrädern auswirkt. **Das größere Drehmoment des Dieselmotors besteht daher nur auf der Motorseite aber nicht auf der Seite der Antriebsräder.**

Gerade so wie eine größere Übersetzung zu einem niedrigeren Gang ein größeres Drehmoment bei dementsprechend niedrigerer Geschwindigkeit bedeutet, bewirkt auch die größere Übersetzung von einer höheren Motordrehzahl zur gleichen Fahrgeschwindigkeit mehr Drehmoment an den Antriebsrädern.

Wenn man es sich von der Motorseite veranschaulichen will so kann man sich zwei Radfahrer als „Motoren“ vorstellen die nebeneinander mit gleicher Geschwindigkeit aber in unterschiedlichen Gängen also mit unterschiedlichen Übersetzungen fahren. Beide müssen unterschiedliche Kräfte bzw. Drehmomente bei unterschiedlicher Drehgeschwindigkeit an den Pedalen aufbringen. Auch hier wäre es nicht sinnvoll nur das aufgebrauchte Drehmoment zu vergleichen ohne die unterschiedliche Drehzahl zu berücksichtigen.

Ein rein zahlenmäßiger Vergleich von Drehmoment bei bestimmter Drehzahl stellt daher einen Motor mit niedrigerer Nenndrehzahl immer in einem mehr oder weniger stark beschönigten Licht dar.

Ein solcher direkter Vergleich, wie er in verschiedenen Artikeln über Autos, mitunter auch in Autozeitschriften, gezogen wird ist bei Motoren mit unterschiedlicher Nenndrehzahl daher durchaus sinnfrei. Oft genug bestehen völlig unrealistische Vorstellungen was die im allgemeinen deutlich langsamer drehenden Dieselmotoren, im Vergleich zu höher drehenden Benzinmotoren, insbesondere im unteren Drehzahlbereich, zu leisten imstande sind. Diese unrealistische Sichtweise besteht freilich generell beim Vergleich von langsamer drehenden zu schneller drehenden Motoren.

Ein Motor mit niedriger Drehzahl braucht bei seiner niedrigeren Drehzahl ein größeres Drehmoment um damit überhaupt erst auf die gleiche Leistung zu kommen wie ein Motor mit höherer Drehzahl. Nur mit diesem größeren Drehmoment kann ein Motor mit niedriger Drehzahl die gleiche Leistungscharakteristik und damit die gleichen Drehmomente bzw. Antriebskräfte an den Antriebsrädern bewirken, wie ein Motor mit höherer Drehzahl.

Die weit verbreitete Vorstellung dass das größere motorseitige Drehmoment des Dieselmotors auch größeres Drehmoment an den Antriebsrädern bedeutet entspricht daher in keinsten Weise der Realität.

Das heißt natürlich nicht dass der **Verlauf** des Drehmoments im niedrigen Drehzahlbereich nicht von Interesse wäre, für einen Vergleich verschiedener Motoren muss man aber die unterschiedliche Nenndrehzahl bzw. die Maximaldrehzahl eines Motors berücksichtigen. Der Unterschied der Drehzahlen zwischen PKW-Benzinmotoren und PKW-Dieselmotoren ist schließlich durchaus erheblich.

Da die Nennleistung im allgemeinen nur in einem kleinen Bereich der Drehzahl vorhanden ist, ist die Angabe der Nennleistung allein natürlich auch nur eine recht begrenzte Aussage.

Will man diese Zusammenhänge etwas näher betrachten so braucht man im wesentlichen zwei Gleichungen.

Die allgemeine Gleichung für die Leistung:

$$\mathbf{P = F \cdot v} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{F = P/v}$$

P...Leistung (Power) [W] (1 kW = 1000 W und 1 kW = 1,36 PS)

F...Kraft (Force) [N]

v...Geschwindigkeit (velocity) [m/s] (1 m/s=3,6 km/h)

Die Gleichung für die Leistung bei Drehbewegung:

$$\mathbf{P = M \cdot \omega} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{M = P/\omega}$$

M...Drehmoment [Nm]

ω ...Winkelgeschwindigkeit [rad/s]

mit

$$\mathbf{\omega = n \cdot \pi/30}$$

n...Drehzahl [U/min]

Damit ergibt sich

$$\mathbf{P = M \cdot n \cdot \pi/30} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{M = P \cdot 30/(n \cdot \pi)}$$

Weiters besteht noch folgender Zusammenhang zwischen Kraft und Drehmoment:

$$\mathbf{M = F \cdot r} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{F = M/r}$$

r...Radius [m]

In der folgenden Tabelle sind nun als Zahlenbeispiele vier Motoren eingetragen, die jeweils 100 kW Leistung erbringen aber verschiedene Nenndrehzahlen aufweisen. Die Motore haben Nenndrehzahlen von **6000 U/min** was einem **PKW-Benzinmotor** entspricht, einen mit **4000 U/min** was einen **PKW-Dieselmotor** entspricht, einen mit 5000 U/min einfach als Zwischenwert, und einen mit 2000 U/min als extremen Vergleich.

Man sieht hier bereits dass man bei verschiedenen Nenndrehzahlen sehr unterschiedliche Drehmomente braucht um die gleiche Leistung zu erhalten. Das ergibt sich zwangsläufig aus der Beziehung $P = M \cdot \omega$.

Weiters ist in der Tabelle angegeben was bei Übersetzung auf gleiche Fahrgeschwindigkeit, hier 180 km/h, auf der Radseite ankommt. Man sieht hier dass **bei gleicher Leistung auf der Motorseite, bei Übersetzung auf gleiche Fahrgeschwindigkeit, auf der Radseite gleiches Drehmoment und gleiche Antriebskraft ankommt**. Das ergibt sich einfach aus $M = P/\omega$ bzw. aus $F = P/v$.

Drehmoment und Antriebskraft auf der Radseite sind also eine Funktion der Motorleistung bei der betreffenden Motordrehzahl. Das gilt natürlich auch für den ganzen Drehzahlbereich der Motoren.

Man kann Drehzahl und Drehmoment auf der Radseite natürlich auch mit der **Gesamtübersetzung i**, die ebenfalls in der Tabelle angegeben ist, berechnen.

Für die Berechnung von Raddrehzahl und Drehmoment auf der Radseite wurde übrigens **60 cm Raddurchmesser** angenommen.

n Nenndrehzahl (U/min)	6000	5000	4000	2000
P Leistung bei Nenndrehzahl (kW)	100	100	100	100
M Drehmoment bei Nenndrehzahl (Nm)	159	191	239	477
i Übersetzung (Getriebe und Differential)	3,77	3,14	2,51	1,26
nr Raddrehzahl (U/min)	1590	1590	1590	1590
Mr Drehmoment an den Rädern (Nm)	600	600	600	600
v Fahrgeschwindigkeit (km/h)	180	180	180	180
F Antriebskraft an den Rädern (N)	2000	2000	2000	2000

Abb. 1 Motore bei Nenndrehzahl

Da auf der Radseite die Kraft ja am Umfang des Rades abgenommen wird sind hier Kraft und Geschwindigkeit am Umfang des Rades die eigentlich maßgebenden Werte. Das Drehmoment ist hier nur ein Zwischenwert dessen Zahlenwert vom Raddurchmesser abhängt. Der Vergleich von Drehmomenten auf der Radseite ergibt daher nur unter der Voraussetzung gleicher Raddurchmesser einen Sinn.

Der Antriebsstrang selbst verbraucht übrigens durch innere Reibung auch einen Teil der Leistung, rein für einen Vergleich kann dies aber

unberücksichtigt bleiben.

n 50% Nenndrehzahl (U/min)	3000	2500	2000	1000
P Leistung bei 50% Nenndrehzahl (kW)	62,8	62,8	62,8	62,8
M Drehmoment bei 50 %Nenndr. (Nm)	200	240	300	600
i Übersetzung (Getriebe und Differential)	3,77	3,14	2,51	1,26
nr Raddrehzahl (U/min)	796	796	796	796
Mr Drehmoment an den Rädern (Nm)	754	754	754	754
v Fahrgeschwindigkeit (km/h)	90	90	90	90
F Antriebskraft an den Rädern (N)	2510	2510	2510	2510

Abb. 2 Motore bei 50% der Nenndrehzahl

Wenn man nun mit diesen Fahrzeugen, wie in der zweiten Tabelle dargestellt, auf halbe Fahrgeschwindigkeit zurückgeht, hier 90 km/h, so ergibt sich bei allen Motoren dementsprechend die halbe Motordrehzahl. Auch hier braucht man bei diesen nun niedrigeren Motordrehzahlen wieder entsprechend unterschiedliche Drehmomente um die gleiche Leistung zu erhalten. Mit dieser gleichen Leistung bei den entsprechenden Motordrehzahlen erhält man auch hier wieder gleiche Drehmomente und Antriebskräfte an den Rädern.

Bei den hier verwendeten Drehmomenten sieht man den Zusammenhang besonders gut:

Will man mit einem Motor mit niedrigerer Drehzahl gleiche Leistungscharakteristik und damit auch gleiche Drehmoment- bzw.

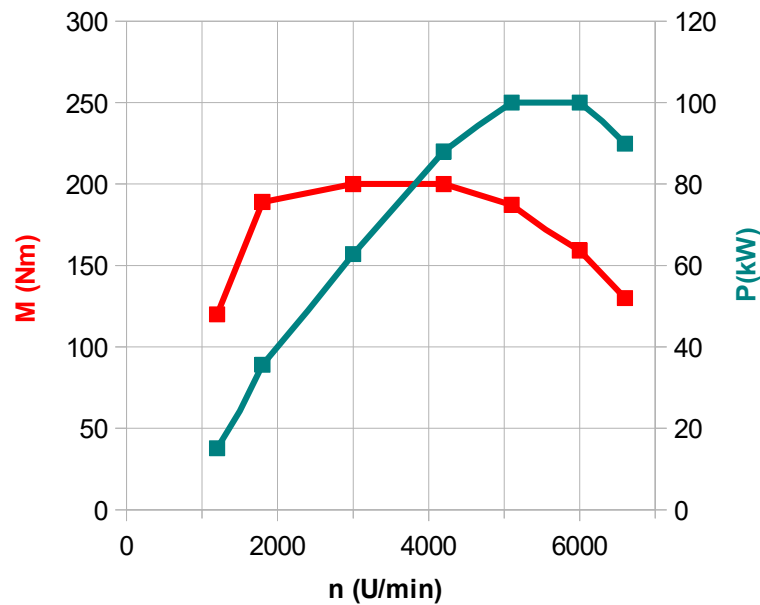
Kraftcharakteristik auf die Antriebsräder bringen so ist beim **Motor mit niedriger Drehzahl bei einer im Verhältnis der Maximaldrehzahlen niedrigeren Drehzahl ein im umgekehrten Verhältnis zu diesen Maximaldrehzahlen größeres Drehmoment auf der Motorseite erforderlich.**

Anders ausgedrückt: Wenn ein Motor z.B. die halbe maximale Motordrehzahl hat als der andere Motor so braucht man beim Motor mit niedriger Maximaldrehzahl das doppelte Drehmoment bei der gleichen Prozentzahl (z. B. bei 45 Prozent) dieser Maximaldrehzahlen.

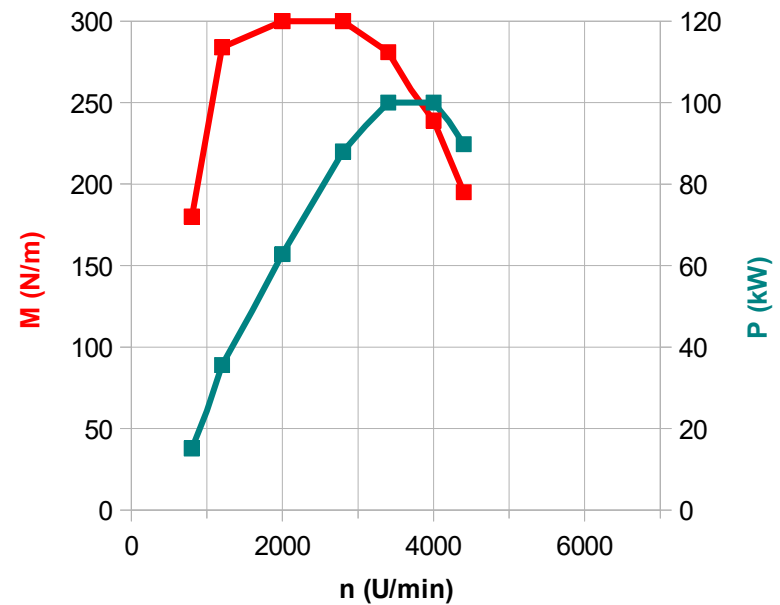
Für den Vergleich von Motordrehmomenten ist die Maximaldrehzahl die richtige Größe da bei Verwendung der Nenndrehzahl unberücksichtigt bleibt dass über der Nenndrehzahl je nach Motor noch ein kleinerer oder größerer Drehzahlbereich zur Verfügung steht.

Im Folgenden ist nun der Drehmoment- und Leistungsverlauf von zwei Motoren mit 100 kW Nennleistung aber unterschiedlicher Nenndrehzahl in Form von Grafiken dargestellt. Für einen durchgehenden Kurvenverlauf sind noch Werte für weitere Drehzahlpunkte eingetragen. Die Kurven entsprechen in etwa heutigen Turbomotoren, sie sind allerdings zum Zwecke der Anschaulichkeit etwas mehr gegliedert.

Die grafische Darstellung zeigt anschaulich die unterschiedlichen Drehmomente die erforderlich sind um bei unterschiedlichen Drehzahlen die gleiche Leistung zu erbringen.



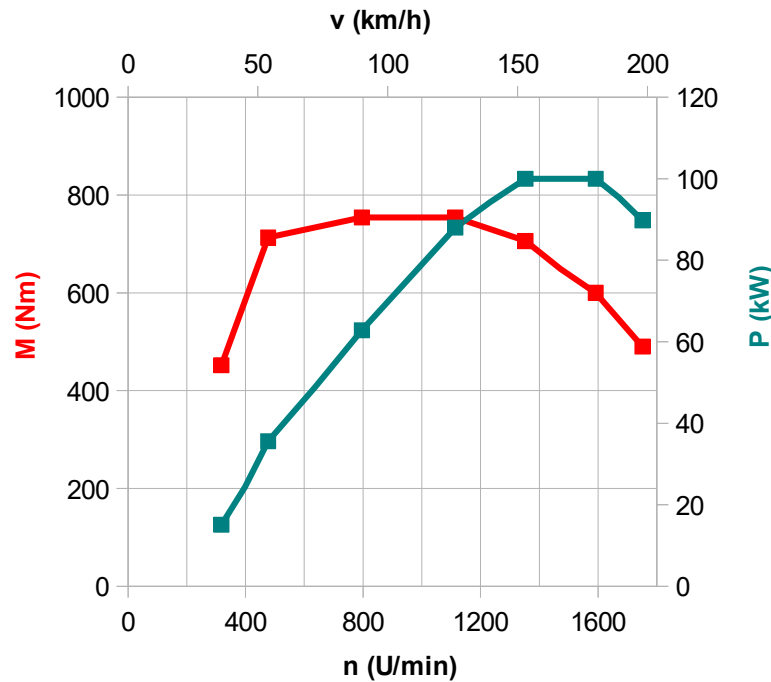
$P = 100$ kW $n_n = 6000$ U/min



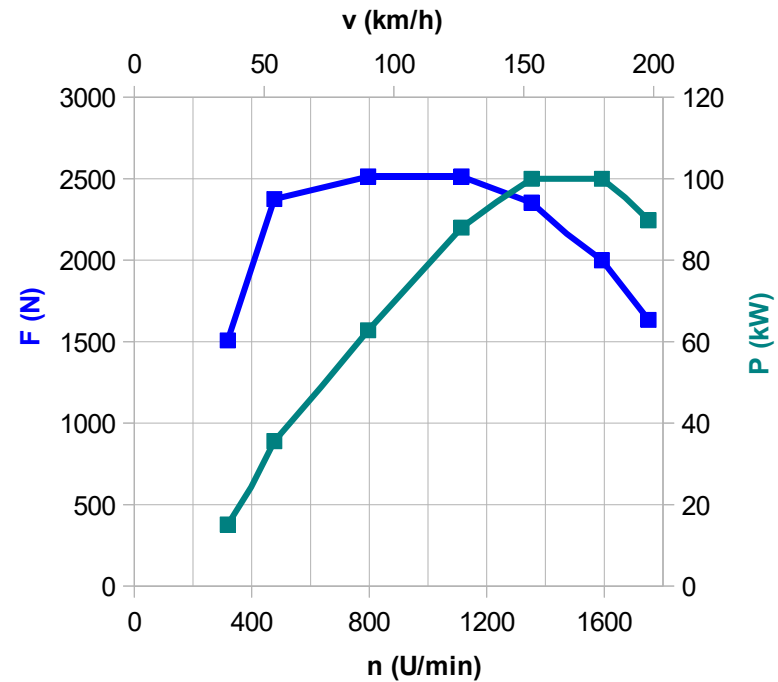
$P = 100$ kW $n_n = 4000$ /min

Abb. 3 Leistung und Drehmoment der Motoren

In den beiden folgenden Grafiken sieht man was an den Antriebsrädern ankommt, unter der Voraussetzung dass alle vier Motoren bei Nenndrehzahl auf die gleiche Geschwindigkeit, also z.B im fünften Gang auf eine Geschwindigkeit von 180 km/h übersetzt sind. **Alle vier Motoren bewirken also unter dieser Voraussetzung den gleichen Leistungs- und Drehmomentverlauf (bzw. Kraftverlauf) an den Antriebsrädern.**



Drehmoment an den Rädern



Kraft an den Rädern

Abb. 4 Drehmoment- und Kraftverlauf an den Antriebsrädern

Anders ausgedrückt: Würde man einen der Motoren mit einem nachgeschalteten Getriebe so übersetzen dass die Drehzahl nach dem Getriebe der Drehzahl eines anderen Motors entspricht, so würden Leistungs- und Drehmomentverlauf nach diesem Getriebe dem Verlauf des anderen Motors entsprechen. Also z.B. der Leistungs- und Drehmomentverlauf des Motors mit 6000 U/min entspräche nach einem

Getriebe, dass die Nenndrehzahl von 6000 U/min auf 4000 U/min übersetzt, dem Verlauf des Motors mit 4000 U/min, natürlich abgesehen davon dass ein Getriebe immer einen gewissen Leistungsverlust bedeutet.

Man sieht also dass für gleiche Drehmoment- bzw. Kraftcharakteristik auf der Radseite unterschiedliche Drehmomente auf der Motorseite in Abhängigkeit von der Motordrehzahl erforderlich sind. Die Leistung ist dabei auf der Motorseite und Radantriebsseite gleich.

Dies zeigt auch wie sinnfrei es ist Drehmomente von Motoren mit unterschiedlichen Drehzahlbereich einfach nur zahlenmäßig, noch dazu bei gleicher Drehzahl, zu vergleichen.

Allerdings werden Dieselfahrzeuge im Allgemeinen in den einzelnen Gängen wegen des größeren Schwungrads einerseits und des kleineren relativen Drehzahlbereichs andererseits doch zu merklich geringeren Geschwindigkeiten übersetzt, was bei gleichmäßiger Fahrgeschwindigkeit (etwa bergauf) zwangsläufig ein etwas größeres Drehmoment an den Rädern bedeutet und daher dadurch tatsächlich eine etwas andere Charakteristik an den Rädern bewirkt. Dies kommt aber weiter unten noch zur Sprache (S 17).

Der hier dargestellte Verlauf des Drehmoments, insbesondere der steile Anstieg im untersten Drehzahlbereich, entspricht wie erwähnt im Wesentlichen heutigen Turbomotoren, wenngleich hier der Anschaulichkeit wegen der Verlauf im unteren Bereich etwas mehr gegliedert dargestellt ist. Saugmotoren können im unteren Drehzahlbereich mit heutigen Turbomotoren nicht ganz mithalten, was auch der Hauptgrund dafür sein dürfte dass inzwischen auch bei Benzinmotoren praktisch nur noch Turbomotoren gebaut werden.

Das größere Drehmoment des Dieselmotors, das zum Ausgleich der niedrigeren Drehzahl notwendig ist, kommt übrigens einfach aus mehr Hubraum. Der effektive Mitteldruck (Mittlerer Druck-Unterschied zwischen Verbrennungstakt und Verdichtungstakt) aus dem sich das Drehmoment errechnet ist bei Dieselmotoren nicht wesentlich anders als bei Benzinmotoren. Der effektive Mitteldruck ist eher eine Frage wie hoch ein Motor aufgeladen wird, was bei PKW-Motoren durchaus unterschiedlich sein kann. Die niedrigere Drehzahl des Dieselmotors muss also durch mehr Hubraum ausgeglichen werden.

Wie erwähnt ist das Drehmoment an den Antriebsrädern vom Raddurchmesser abhängig und die Antriebskraft der eigentlich maßgebende Wert. Es hätte daher keinen Sinn bei Fahrzeugen mit unterschiedlichen Raddurchmessern die Drehmomente auf der Radseite zu vergleichen. Letztendlich sind immer Kraft und Geschwindigkeit am Radumfang für den Antrieb eines Fahrzeuges verantwortlich.

Raddrehmoment über Motordrehzahl

Ein weiterer interessanter Punkt ist wie der Drehmomentverlauf an den Antriebsrädern bei konstanter Fahrgeschwindigkeit aber sich ändernder Motordrehzahl über den gesamten Drehzahlbereich des Motors aussieht. Auch darüber bestehen nicht ganz selten Missverständnisse.

Eine Übersetzung auf konstant gleiche Fahrgeschwindigkeit bei sich durchgehend ändernder Motordrehzahl wäre zwar nur mit einem stufenlosen Getriebe möglich, die Drehmomentwerte in den einzelnen Gängen bei einer bestimmten Geschwindigkeit liegen aber auf einer entsprechenden Drehmomentkurve.

Nun, **wenn die Raddrehzahl bzw. Fahrgeschwindigkeit konstant sind, die Motordrehzahl sich aber ändert, so ist der Verlauf des Drehmoments bzw. der Antriebskraft an den Antriebsrädern äquivalent dem Verlauf der Motorleistung über der Motordrehzahl.** Dies ergibt sich einfach aus den Gleichungen $M = P/\omega$ bzw. $F = P/v$. Konstante Raddrehzahl bzw. Fahrgeschwindigkeit bedeutet dass sich das Drehmoment bzw. die Kraft im gleichen Verhältnis ändern wie die Leistung.

Man kann diesen Zusammenhang auch über das Drehmoment nachvollziehen. Wenn z.B. die Motordrehzahl bei 100km/h Fahrgeschwindigkeit in einem niedrigeren Gang 6000 U/min beträgt und in einem höheren Gang 3000 U/min so heißt das dass im niedrigeren Gang (6000 U/min) die doppelte Übersetzung vorhanden sein muss als im höheren Gang (3000 U/min). Um also das gleiche Drehmoment im höheren Gang bei 3000 U/min Motordrehzahl auf die Antriebsräder zu bringen als im niedrigeren Gang bei 6000 U/min wäre hier das doppelte Drehmoment auf der Motorseite erforderlich. Doppeltes Drehmoment bei halber Motordrehzahl heißt aber dass die Leistung gleich ist. Auch aus dieser Betrachtung sieht man also dass bei bestimmter Fahrgeschwindigkeit gleiches Drehmoment auf der Radseite, auf der Motorseite gleiche Leistung bei unterschiedlicher Motordrehzahl erfordert.

In den beiden folgenden Grafiken ist einerseits dargestellt was z.B. unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h bzw. bei 120 km/h bei sich ändernder Motordrehzahl an Drehmoment bzw. an Antriebskraft an den Antriebsrädern ankommt. Der Verlauf des Drehmoments (rote Kurven) entspricht, wie gesagt, dem Verlauf der Motorleistung. Ein solcher Verlauf ist dem Leistungsverlauf äquivalent und wäre nur mit einem stufenlosen Getriebe möglich. Allerdings liegen die Momente bzw. Antriebskräfte der einzelnen Gänge bei der betreffenden Geschwindigkeit auf einer solchen Kurve.

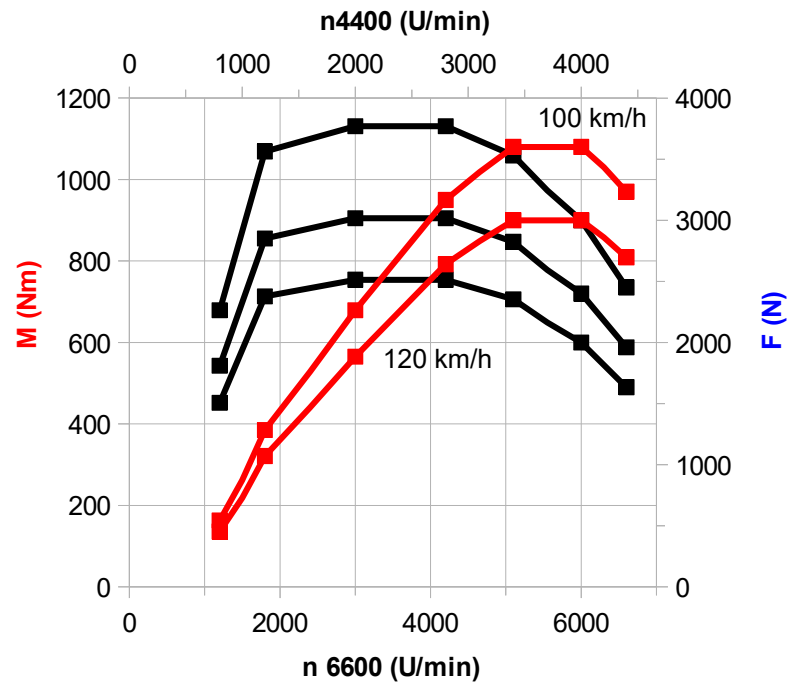
Die schwarzen Kurven stellen dagegen konstante Getriebeübersetzung, also jeweils einen bestimmten Gang dar. Dabei wird für den 3. Gang 120 km/h bei Nenndrehzahl angenommen, für den 4. Gang 150 km/h und für den 5. Gang 180 km/h. Die Endgeschwindigkeiten sind entsprechend der maximalen Motordrehzahl um 10 Prozent höher.

In den beiden Grafiken sieht man wo die Drehmomente bzw. Antriebskräfte für die einzelnen Gänge bei einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit liegen nämlich dort wo sich die Kurven für konstantes Drehmoment und konstante Geschwindigkeit schneiden. In der rechten Grafik sind die Drehmomentkurven über der Fahrgeschwindigkeit aufgetragen. Hier kann man die Drehmomente für die verschiedenen Gänge direkt bei gleicher Fahrgeschwindigkeit vergleichen.

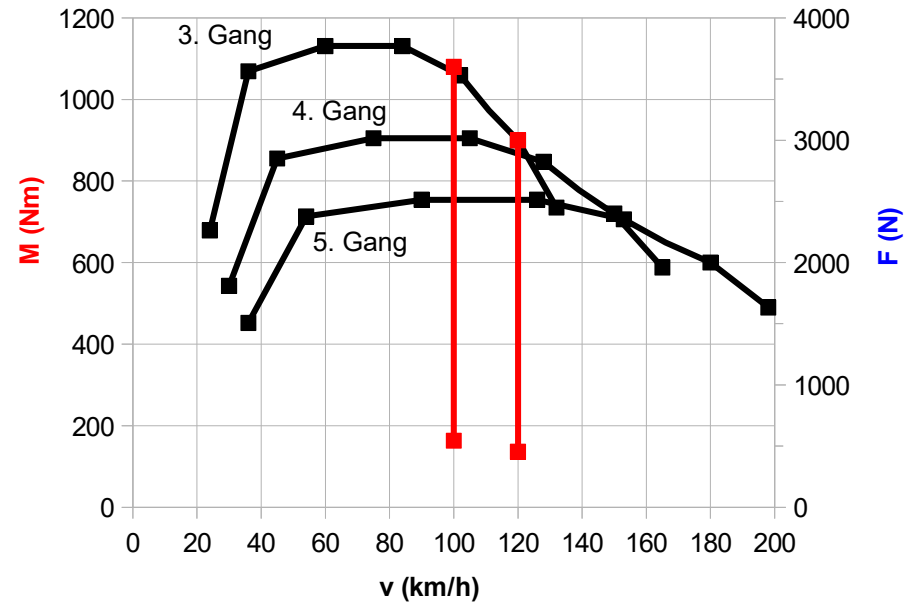
Da Leistung und Drehmoment der obigen 100 kW Motoren auf der Radseite gleich sind, sind in der linken Grafik zum Vergleich die Drehzahlen zweier Motoren eingetragen.

Das Drehmoment und die Antriebskraft stehen bei einem bestimmten Raddurchmesser, hier 60 cm, in einem bestimmten Verhältnis

zueinander, deshalb kann auch hier beides in der gleichen Grafik einfach mittels einer eigenen Skala dargestellt werden.



Drehmoment über Motordrehzahl



Drehmoment über Geschwindigkeit

Abb. 7 Überlagerung konstante Geschwindigkeit und konstante Übersetzung

Maximales Drehmoment an den Antriebsrädern ergibt sich also immer in jenem Gang bei dem sich die Motordrehzahl im Bereich maximaler Motorleistung befindet. Die alte Regel dass man vor dem Überholen Zurückschalten und Gas geben soll ist also schon richtig. Dasselbe gilt natürlich auch wenn man bergauf fährt.

Die mitunter vorhandene Vorstellung dass maximales Drehmoment auf der Motorseite auch maximales Drehmoment auf der Radseite bedeutet ist also ganz offensichtlich nicht richtig. Das Drehmoment auf der Radseite ist bei gleicher Geschwindigkeit eine Funktion der Leistung.

Ebenso sinnfrei ist natürlich auch die Vorstellung dass im unteren Drehzahlbereich oder bergauf das Drehmoment maßgebend sei und im oberen Drehzahlbereich oder auch bei hoher Geschwindigkeit die Leistung.

Es ist immer die Leistung bei einer bestimmten Motordrehzahl maßgebend. Aus dieser Leistung errechnet sich mit $F = P/v$ die Antriebskraft. Oder man errechnet aus der Leistung mit $M = P/\omega$ das Drehmoment und daraus mit $F = M/r$ wieder die Antriebskraft.

Diese Antriebskraft ist letztendlich für die Fortbewegung des Fahrzeugs verantwortlich.

Es ist dabei natürlich völlig gleichgültig ob das Drehmoment bzw. die daraus resultierende Antriebskraft (**FRad**) nun für Überwindung der Reibung (**Fr**), für Überwindung des Luftwiderstandes (**Fl**), bergauf zur Überwindung der Gravitation (**Fg**) oder für Beschleunigung (**Fa**) verwendet wird.

Ist die Antriebskraft größer als der Widerstand aus Reibung, Luftwiderstand und aus eventueller Gravitation so bewirkt die Restkraft eine Beschleunigung des Fahrzeugs. Ist die Antriebskraft geringer so tritt Verzögerung auf und das Fahrzeug wird langsamer. Geht es bergab so addiert sich die die Kraft durch Gravitation zur Antriebskraft und Antriebskraft plus Gravitation werden für Reibung, Luftwiderstand und eventueller Beschleunigung verbraucht.

Die Verwendung der Antriebskraft addiert sich ganz einfach wie im folgenden dargestellt.

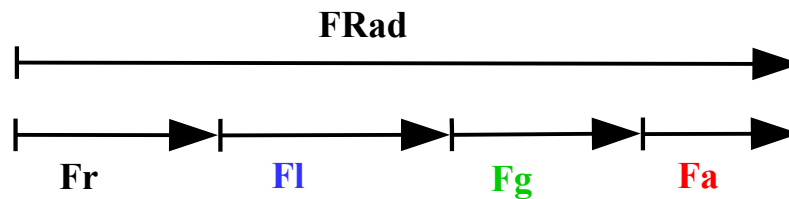


Abb. 7b Addition der Antriebskräfte

Ein Wort zum Argument des Dieselmotors als Zugfahrzeug:

Zunächst ist natürlich der rein zahlenmäßige Vergleich der maximalen Drehmomente von Motoren mit unterschiedlichen Drehzahlbereich grundfalsch. Weiters wird man gerade bei einer Bergfahrt mit Anhänger wirklich viel Drehmoment brauchen und maximales Drehmoment an den Antriebsrädern hat man dort wo man die maximale Motorleistung hat, wenn auch in einem niedrigeren Gang. Maximales Drehmoment im unteren Drehzahlbereich des Motors ist also bei Bergfahrten oder mit Anhänger nicht einmal so sehr das große Kriterium,

wenngleich es von Vorteil sein mag wenn man erst später zurückschalten muss.

Davon abgesehen dürfte die Kilometerleistung von Dieselfahrzeugen wo sie als Zugfahrzeuge verwendet werden so marginal sein wie bei Benzinfahrzeugen auch, und die Argumentation des besseren Zugfahrzeugs ist daher auch praktisch kaum von Bedeutung.

Allerdings werden Dieselfahrzeuge, wie weiter unten beschrieben (S 17), tatsächlich zu etwas niedrigeren Geschwindigkeiten übersetzt was dann zwangsläufig ein etwas größeres Drehmoment an den Antriebsrädern bedeutet. Dieselfahrzeuge sind daher tatsächlich eher etwas in Richtung Zugfahrzeug übersetzt. Dies ist aber nicht eine Folge des größeren motorseitigen Drehmoments, sondern ist aufgrund des größeren Schwungrads des Dieselmotors und des kleineren relativen Drehzahlbereichs erforderlich.

Größeres Drehmoment im mittleren und unteren Drehzahlbereich ist dagegen bei Fahrzuständen wo man häufig aus dem mittleren Drehzahlbereich heraus beschleunigt, also auf ganz normalen Landstraßen oder bei Stadtbetrieb sehr viel mehr von Interesse. Man braucht dann nicht so häufig zurück schalten wenn man aus dem mittleren Drehzahlbereich heraus wieder beschleunigen will. Das heißt freilich auch hier nicht dass man Drehmomente von Motoren unterschiedlichen Drehzahlbereichs einfach zahlenmäßig vergleichen kann.

Zusammenhang von Drehmoment und Leistung

In der folgenden Grafik ist noch einmal der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Leistung anschaulich dargestellt.

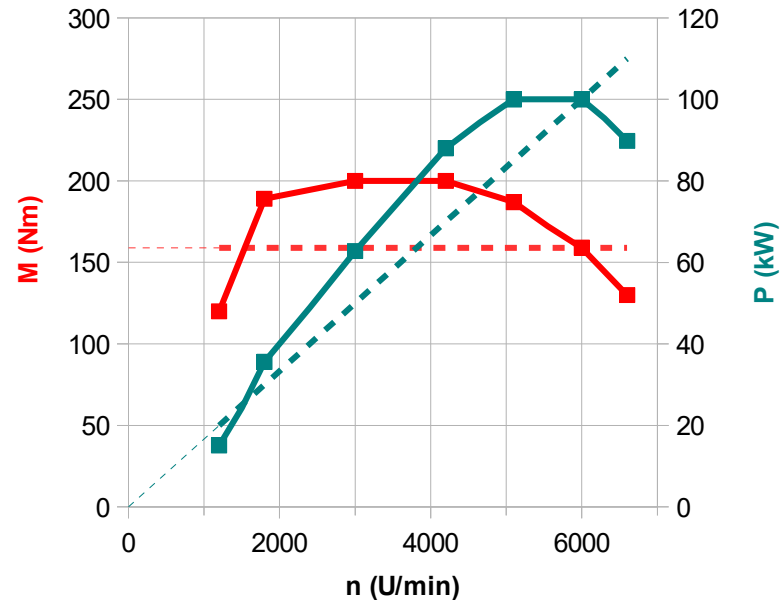


Abb. 8 Zusammenhang zwischen Drehmoment und Leistung

Ein konstantes Drehmoment über der Drehzahl (strichlierte Linie) ergibt bei der Leistung eine ansteigende Gerade (strichlierte Linie) die durch Null geht.

Konstante Leistung ergibt sich dort wo das Drehmoment genau im gleichen Verhältnis abnimmt wie die Drehzahl zunimmt.

Der Verlauf des Drehmoments besteht also bei der Leistung in analoger Weise, nur dass sich das Drehmoment je nach Drehzahl unterschiedlich stark auf die Leistung auswirkt.

Die Leistung ist der eigentlich maßgebende Gesamtwert der sich aus Drehmoment und Drehzahl ergibt.

Der unterschiedliche Leistungsverlauf verschiedener Motoren über der Drehzahl ist allerdings in der Tat weniger gut erkennbar als unterschiedlicher Drehmomentverlauf. Zusammen mit dem Umstand dass die Leistung im unteren Drehzahlbereich auch weniger beeindruckend ist mögen das die Gründe dafür sein dass im unteren Drehzahlbereich praktisch ausschließlich Drehmomente für einen Vergleich verwendet werden.

Vergleich zweier unterschiedlicher Motoren

In den vorherigen Grafiken wurden bewusst Motoren dargestellt die zwar unterschiedliche Drehzahl aufweisen, in ihren Motorkennwerten aber gleichwertig sind. In den beiden folgenden Grafiken sind dagegen nun zwei Motore eingetragen die sich in ihren Kennwerten etwas voneinander unterscheiden. Die Unterschiede für die beiden Motortypen sind dabei im Wesentlichen willkürlich angenommen mit Ausnahme des niedrigsten Drehzahlbereichs über 1000 U/min. Dieselmotore wie Benzinmotore haben eine Leerlaufdrehzahl von etwa 700 bis 800 U/min, was beim Dieselmotor relativ zur Maximaldrehzahl etwas höher ist. Bei 1000 U/min besteht oft nur ein geringer Unterschied von Drehmoment bzw. Leistung zwischen den beiden Motortypen. Auch erreichen Dieselmotore ihr maximales Drehmoment bei Drehzahlen die oft nur wenig unter den Drehzahlen von Benzinmotoren liegen, teilweise erreichen Benzinmotore das maximale Drehmoment sogar bei niedrigeren Drehzahlen, insbesondere dann wenn die Benzinmotore Biturbomotore sind.

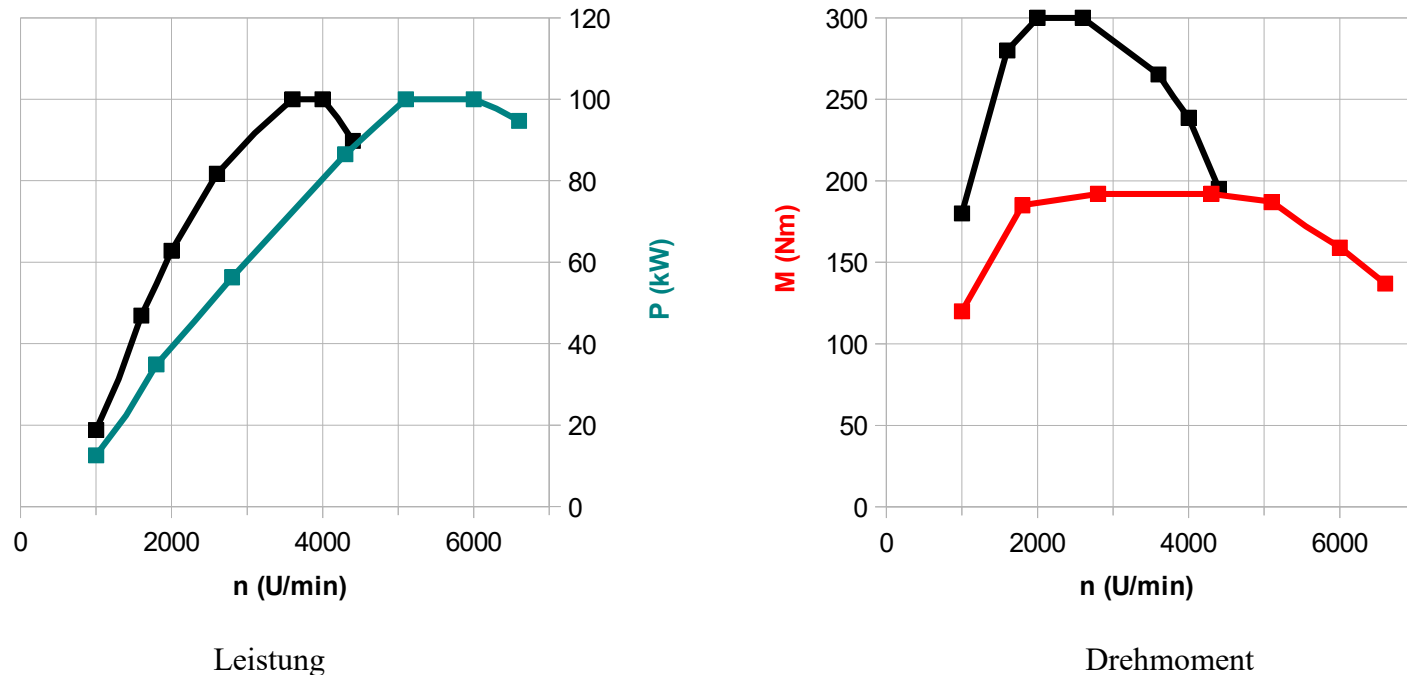


Abb. 12 Leistung und Drehmoment zweier unterschiedlicher Motoren

In den beiden folgenden Grafiken ist dargestellt wie die betreffenden Motorkennwerte aussehen wenn man sie auf eine gemeinsame maximale Motordrehzahl von umrechnet, wobei für diese Maximaldrehzahl 5000 U/min verwendet werden.

Bei der Leistung ist es lediglich erforderlich die Drehzahl entsprechend dem Verhältnis zur der neuen Maximaldrehzahl umzurechnen. Die Leistung ändert sich schließlich bei Übersetzung auf eine andere Drehzahl nicht. Weiters kann man zum Vergleich natürlich genau so gut Prozent der Maximaldrehzahl verwenden.

Für einen relativen Vergleich des Leistungsverlaufs für Motoren unterschiedlicher Leistung kann man hier auch Prozent der Nennleistung verwenden.

Beim Drehmoment muss man zusätzlich zur Umrechnung der Drehzahlen das Drehmoment im umgekehrten Verhältnis zu diesen Maximaldrehzahlen umrechnen. Das Drehmoment verhält sich bei Übersetzung auf eine andere Drehzahl letztendlich im umgekehrten Verhältnis zu diesen Drehzahlen. Man kann auch Prozent der Drehzahl verwenden sofern eindeutig definiert ist auf welche Maximaldrehzahl das Drehmoment bezogen ist.

Will man beim Drehmoment Motoren unterschiedlicher Leistung miteinander vergleichen, so kann man das Drehmoment nachdem es auf eine bestimmte Maximaldrehzahl umgerechnet wurde auf eine bestimmte Leistung, z. B. auf 100 kW Nennleistung beziehen.

Der Begriff der Drehmomentüberhöhung, wie er mitunter verwendet wird, ist für einen Vergleich nicht geeignet da deren Wert davon abhängt wo die Nennleistung im Drehzahlbereich liegt. Man kann dies gut erkennen wenn man in Abb. 8 S. 13 die „Drehmomentüberhöhung“ bei 5100 U/min und bei 6000 U/min miteinander vergleicht.

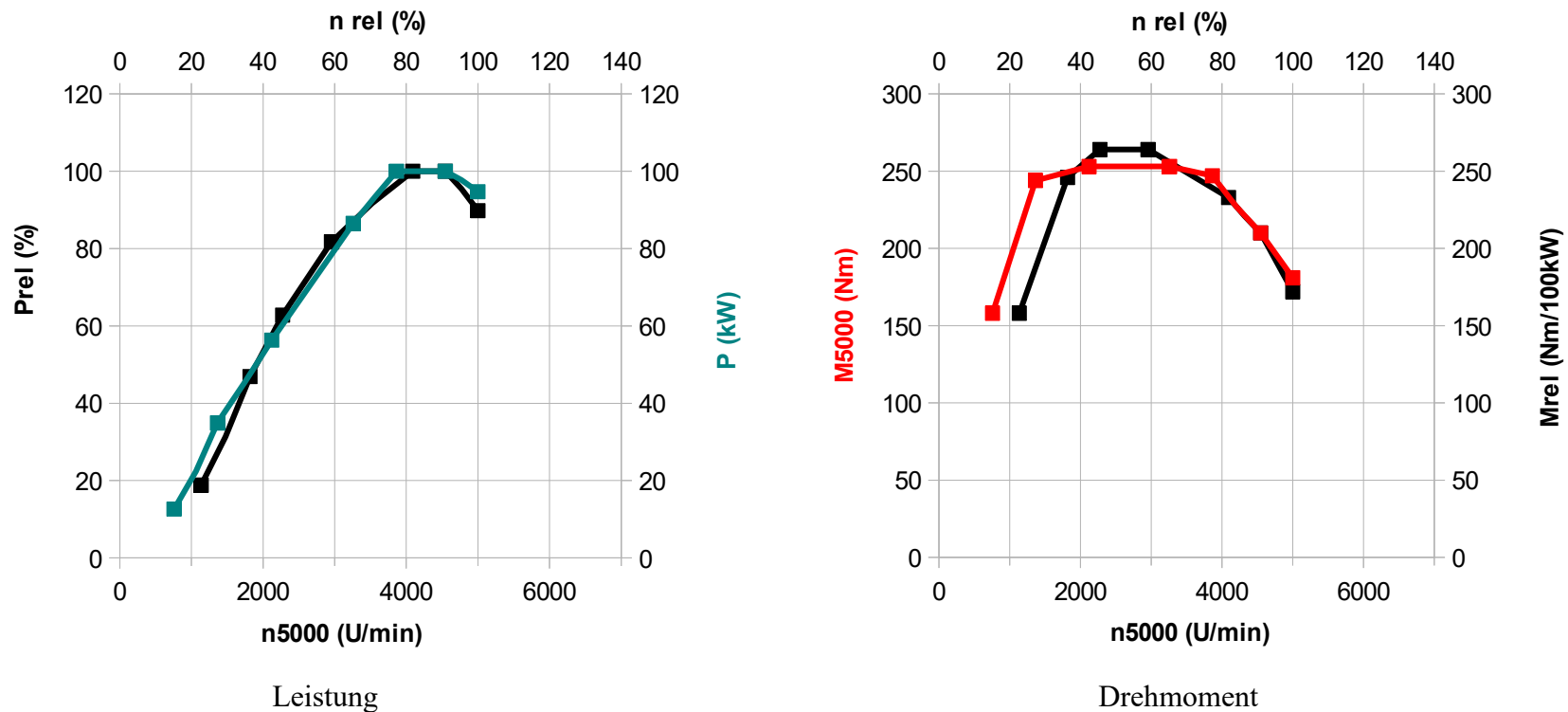
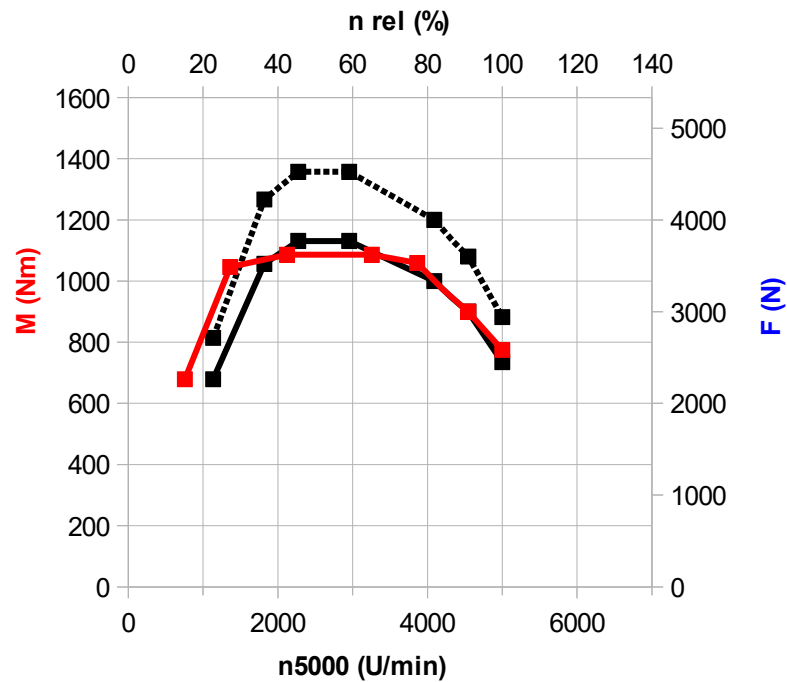


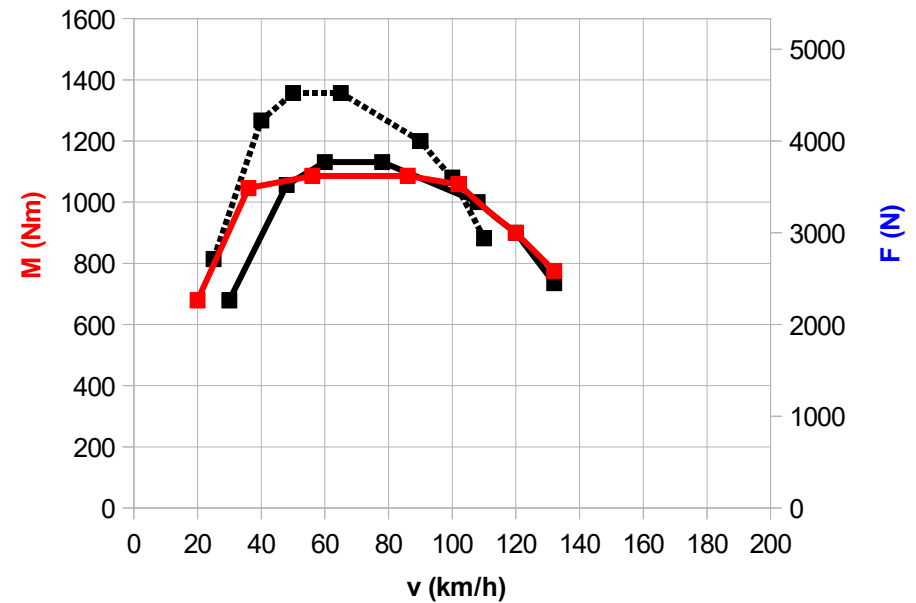
Abb. 13 Leistungs- und Drehmomentvergleich

Der geringe Unterschied des Drehmoments bei 1000 U/min bedeutet allerdings dass bei Umrechnung auf eine gemeinsame Motordrehzahl bzw. auch auf gleiche Fahrgeschwindigkeit in einem bestimmten Gang vergleichbares Drehmoment beim Dieselmotor erst merklich später einsetzt, was sehr im Gegensatz zur fast allgemein üblichen Auffassung steht. Will man erreichen dass das Drehmoment in einem bestimmten Gang bei ähnlicher Fahrgeschwindigkeit einsetzt wie beim Benzinmotor so muss man den Dieselmotor zu etwas niedriger Geschwindigkeit übersetzen. Dies ist daher einer der Gründe dass Dieselmotore insbesondere in den niedrigeren Gängen im Allgemeinen tatsächlich zu etwas geringeren Geschwindigkeiten übersetzt werden als Benzinmotore gleicher Leistung.

In den folgenden beiden Grafiken ist dargestellt wie sich beim Dieselmotor eine Änderung der Übersetzung des 3. Ganges von 120 km/h auf 100 km/h (strichlierte Linie) bei Nenndrehzahl auswirkt. Die Drehmomentkurve wird zu niedrigerer Geschwindigkeit verschoben, aber das Drehmoment erhöht sich auch dementsprechend. Man muss daher beim Dieselmotor bei etwas geringeren Geschwindigkeiten in den nächst höheren Gang schalten.



Über Motordrehzahl (bezogen auf 5000U/min)



Über Geschwindigkeit

Abb. 15 Übersetzung auf kleinere Geschwindigkeit

Ein weiterer Grund für die Übersetzung von Dieselfahrzeugen zu etwas niedrigeren Geschwindigkeiten liegt im größeren Schwungrad des Dieselmotors. Beim Beschleunigen des Fahrzeugs ändert sich natürlich auch die Motordrehzahl dementsprechend rasch, das heißt der Motor selbst einschließlich des Schwungrads muss hier ebenfalls mit beschleunigt werden. Das größere Schwungrad selbst nimmt daher beim Beschleunigen mehr Leistung und damit mehr Drehmoment auf als das kleinere Schwungrad des Benzinmotors. Das an den Antriebsrädern ankommende Drehmoment verringert sich beim Beschleunigen daher beim Dieselmotor mehr als beim Benzinmotor. Will man also bei Dieselfahrzeugen an den Antriebsrädern beim Beschleunigen vergleichbares Drehmoment erhalten wie bei Benzinfahrzeugen so ist auch aus diesem Grund eine Übersetzung zu etwas niedrigeren Geschwindigkeiten erforderlich.

Im mittleren Drehzahlbereich, wo durch die Übersetzungsänderung der größte Unterschied entsteht, wird das Drehmoment des

Dieselfahrzeuge dabei im Allgemeinen wohl über dem Drehmoment des Benzinfahrzeugs bleiben. Im unteren und oberen Drehzahlbereich wird dagegen das Drehmoment des Dieselfahrzeugs unter dem des Benzinfahrzeugs absinken.

Dies erklärt auch warum beim Beschleunigen von 80 bis 120 km/h im 4. Gang, wo man eher im mittleren Drehzahlbereich fährt, im Allgemeinen Dieselfahrzeuge etwas im Vorteil sind. Beim Beschleunigen von 0 bis 100 km/h werden dagegen die einzelnen Gänge bis zur Maximaldrehzahl ausgefahren, hier sind dann meist die Fahrzeuge mit Benzinmotoren etwas im Vorteil.

Der kleinere Drehzahlbereich des Dieselmotors verringert den Nachteil des größeren Schwungrades beim Beschleunigen etwas, da sich ja die Drehzahl des Dieselmotors dementsprechend weniger ändert. An den Beschleunigungswerten sieht man aber dass dies die Wirkung des größeren Schwungrades nicht kompensieren kann. Denn sonst müssten Dieselfahrzeuge aufgrund der Übersetzung zu kleineren Geschwindigkeiten ja erheblich bessere Beschleunigungswerte aufweisen als Benzinfahrzeuge, was aber durchaus nicht der Fall ist.

Bei konstanter Fahrgeschwindigkeit etwa bergauf, wo das Schwungrad keine Leistung aufnimmt, haben Dieselfahrzeuge wegen der Übersetzung zu niedrigeren Geschwindigkeiten dann tatsächlich ein etwas höheres Drehmoment bzw. Antriebskraft an den Antriebsrädern. Man muss dafür, wie gesagt, freilich auch bei etwas niedrigeren Geschwindigkeiten in den nächst höheren Gang schalten. Dieselfahrzeuge sind daher tatsächlich etwas in Richtung eines Zugfahrzeugs bzw. man könnte auch sagen etwas in Richtung eines „Bergfahrzeugs“ übersetzt.

Diese andere Charakteristik der Dieselfahrzeuge ist freilich eine Folge der Übersetzung zu niedrigeren Geschwindigkeiten, die wegen des geringeren relativen Drehzahlbereichs und des größeren Schwungrades des Dieselmotors erforderlich ist, und nicht, wie fast allgemein angenommen, eine Folge des größeren motorseitigen Drehmoments.

Mitunter wird diese Charakteristik auch als größere Elastizität des Dieselmotors angesehen, was natürlich auch nicht den Tatsachen entspricht.

Auch für das etwas größere Gewicht von Dieselfahrzeugen erscheint die Übersetzung zu niedrigeren Geschwindigkeiten von Vorteil, wengleich der Gewichtsunterschied bei heutigen Fahrzeugen nicht allzu groß ist.

Das Verhältnis zwischen Benzinmotoren und Dieselmotoren ändert sich dann etwas wenn man Saug-Benzinmotoren mit Turbo-Dieselmotoren der heutigen Generation vergleicht. Da aber inzwischen auch bei Benzinmotoren praktisch nur noch Turbomotoren gebaut werden ist dies auch kaum noch relevant.

Die Übersetzung von Fahrzeugen mit Benzinmotoren zu höheren Geschwindigkeiten hat natürlich auch seine Vorteile. In manchen Fahrsituationen ist es schon angenehmer die einzelnen Gänge zu etwas höheren Geschwindigkeiten ausfahren zu können, zumal wenn man bei Benzinmotoren auch damit zufriedenstellende Beschleunigungen erreicht. Weiters bedeutet diese Übersetzung auch dass man bei gleicher Geschwindigkeit mit niedrigerer Motordrehzahl fährt was für die Wirtschaftlichkeit im Allgemeinen schon von Vorteil ist. Was also für den einen Motortyp der geeignetste Kompromiss ist muss nicht auch für den anderen Motortyp der geeignetste Kompromiss sein.

Die Übersetzung zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten bei Fahrzeugen mit unterschiedlichen Motortypen ergibt sich aus der Gesamtübersetzung (Getriebe und Differential) der Fahrzeuge. Das Verhältnis zwischen den Übersetzungen beider Motortypen ist deutlich kleiner als das Verhältnis zwischen den Motordrehzahlen was eine Übersetzung zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten bedeutet. Diese Übersetzungsverhältnisse werden in den Fahrzeugdaten freilich oft nicht angegeben.

Eine weitere Möglichkeit Übersetzungen zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten festzustellen besteht dann wenn man zwei möglichst gleiche Fahrzeuge beider Motortypen mit möglichst gleicher Leistung zur Verfügung hat. Man muss zum Vergleich die Gänge nicht einmal zur maximalen Motordrehzahl ausdrehen, wenn man die Geschwindigkeit bei z.B. 3000 U/min abliest und dies im Verhältnis zur maximalen Motordrehzahl hochrechnet, reicht das auch und ist wesentlich einfacher.

Größeres Schwungrad des Dieselmotors

Oft wird das Drehmomentverhalten von Dieselmotoren gerade im unteren Drehzahlbereich als „bullig“ beschrieben. Nun, Dieselmotoren haben ein anderes Verbrennungsverfahren mit wesentlich höherem Verdichtungsdruck. Da die Energie zwischen den einzelnen Verbrennungstakten, einschließlich der Energie für die hohe Verdichtung, ja irgendwo gespeichert werden muss erfordert das, wie gesagt, ein deutlich größeres Schwungrad. Das Schwungrad muss letztendlich groß genug sein um auch bei niedriger Drehzahl zufriedenstellenden Rundlauf des Motors zu gewährleisten. Der Unterschied der Schwungradgröße wird zwar mit zunehmender Zylinderzahl geringer ist aber bei Vierzylindermotoren schon deutlich vorhanden.

Dieses größere Schwungrad hat auch einen angenehmen Nebeneffekt nämlich dass man hier etwas Energie also „Schwung“ gespeichert hat. Das kann etwa beim Anfahren auf einer Steigung oder auch langsamen Fahren mit niedriger Drehzahl von Vorteil sein da hier bei einem Dieselmotor etwas mehr Überbrückungsenergie vorhanden ist. Beim Anfahren etwa „würgt“ man einen Dieselmotor daher deutlich weniger leicht ab als einen Benzinmotor.

Ein weiterer Grund für dieses als „bullig“ beschriebene Drehmomentverhalten des Dieselmotors dürfte auch darin liegen dass Dieselmotoren schon immer „drehzahl geregelt“ waren. Die Drehzahl wurde früher durch einen Fliehkraftregler mittels Anpassung der Kraftstoffzufuhr geregelt und konstant gehalten. Benzinmotoren wurden dagegen rein durch die Stellung der Drosselklappe und der daraus sich ergebenden Luftzufuhr geregelt, ohne dass eine weitere Regelung der Drehzahl erfolgte. Da heute die Drehzahl beider Motortypen elektronisch geregelt wird dürfte das heute allerdings kaum einen Unterschied ausmachen, hat aber wahrscheinlich zum Ruf des Dieselmotors, im unteren Drehzahlbereich ein größeres Drehmoment zu haben, durchaus beigetragen.

Die ausgleichende Wirkung des größeren Schwungrades bewirkt also auch eine etwas andere Charakteristik des Dieselmotors, auch dies wird fälschlicherweise häufig dem größeren motorseitigen Drehmoment des Dieselmotors zugeschrieben.

Insgesamt kann man also zusammenfassen:

Drehmomente von Motoren unterschiedlicher Nenndrehzahl bzw. Maximaldrehzahl kann man nicht miteinander vergleichen. Für einen Vergleich muss man Drehzahlen im Verhältnis der Maximaldrehzahlen umrechnen, Drehmomente dagegen im umgekehrten Verhältnis der

Maximaldrehzahlen.

Das maximale Drehmoment bei einer bestimmtem Geschwindigkeit hat man an den Antriebsrädern wenn der Motor die maximale Leistung erbringt.

Das größere Schwungrad und der kleinere relative Drehzahlbereich des Dieselmotors erfordern eine Übersetzung zu etwas niedrigeren Geschwindigkeiten als bei vergleichbaren Fahrzeugen mit Benzinmotor. Dies bewirkt bei Dieselfahrzeugen eine etwas andere Charakteristik.

Da das größere Schwungrad bei Dieselmotoren mehr Energie speichert hat man hier auch etwas mehr kurzfristige Überbrückungsenergie zur Verfügung. Auch dadurch entsteht unter bestimmten Voraussetzungen eine etwas andere Charakteristik von Dieselfahrzeugen.

Alles in allem sind moderne Dieselmotoren mit modernen Benzinmotoren durchaus konkurrenzfähig, wenngleich sie eine etwas andere Charakteristik aufweisen. Ihre Stärke liegt aber vor allem in ihrer bekannten Wirtschaftlichkeit, die Vorstellung von einem höheren Drehmoment im unteren Drehzahlbereich beruht dagegen auf einem weit verbreiteten Missverständnis, nämlich auf den direkten zahlenmäßigen Vergleich von motorseitigen Drehmomenten ohne die unterschiedliche Motordrehzahl und daher unterschiedliche Übersetzung auf die Antriebsräder zu berücksichtigen.