

Drehmoment und Leistung

Zusammenhang zwischen Drehmoment und Leistung

Wirkung des Drehmoments bei Benzin- und Dieselmotoren

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

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

Die Definitionen auf denen diese Gleichungen beruhen sind in **Anhang A** (Seite 27) dargestellt.

Es besteht daher der folgende Zusammenhang:

Die Leistung auf der Motorseite ergibt sich aus Drehmoment und Drehzahl $\mathbf{P = M \cdot \omega}$.

Das Drehmoment auf der Radantriebsseite ergibt sich aus der Motorleistung und Drehzahl $\mathbf{M = P/\omega}$ bzw. die Antriebskraft ergibt sich aus Motorleistung und Geschwindigkeit $\mathbf{F = P/v}$.

Man kann es auch folgendermaßen darstellen:

$$\begin{array}{lcl} \text{Motor} & \text{Leistung} & \text{Antriebsräder} \\ \\ \mathbf{M \cdot \omega} & = & \mathbf{P} \\ & & = \\ & \text{daher} & \mathbf{M = P/\omega} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{F = P/v} \end{array}$$

Die Leistung auf der Radseite entspricht der Leistung auf der Motorseite, das Drehmoment der Räder hängt ab von dieser Leistung und der jeweiligen Raddrehzahl, bzw. die Antriebskraft von dieser Leistung und der Fahrgeschwindigkeit.

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. (Der 50 kW Motor dient für einen späteren Relativvergleich.)

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.

In der Tabelle sind die Drehmomente eingetragen die diese Motoren brauchen um auf 100 kW Leistung bei ihrer jeweiligen Nenndrehzahl zu kommen.

Der Motor mit **6000 U/min** Nenndrehzahl braucht dafür **159 Nm** der Motor mit **4000 U/min** Nenndrehzahl **239 Nm** und beim Motor mit **2000 U/min** Nenndrehzahl sind dafür **477 Nm** Drehmoment erforderlich. Man sieht hier also dass bei unterschiedlicher Nenndrehzahl entsprechend unterschiedliche Drehmomente erforderlich sind um gleiche Leistungswerte zu erreichen.

Übersetzt man nun Fahrzeuge mit diesen Motoren bei jeweiliger Nenndrehzahl und Nennleistung auf die gleiche Fahrgeschwindigkeit von **180 km/h**, was allerdings unterschiedliche Getriebeübersetzung erfordert, so ergibt sich bei allen vier Motoren auf der Radseite eine Antriebskraft von **2000 N**, bzw. wenn man von einem **Raddurchmesser von 60 cm** ausgeht ein Drehmoment von **700 Nm**. Hier sieht man nun gut dass großes Drehmoment auf der Motorseite allein noch nichts sagt, die Drehzahl ist ebenso von Bedeutung.

Was auf der Radseite bei Übersetzung auf eine bestimmte Fahrgeschwindigkeit ankommt ist eine Funktion der Leistung bei der entsprechenden Motordrehzahl.

Man kann Drehzahl und Drehmoment auf der Radseite natürlich auch mit der **Gesamtübersetzung i**, die ebenfalls in der Tabelle angegeben ist, berechnen (siehe auch **Anhang F** Seite 37).

n Nenndrehzahl (U/min)	6000	5000	4000	2000		4000
P Leistung bei Nenndrehzahl (kW)	100	100	100	100		50
M Drehmoment bei Nenndrehzahl (Nm)	159	191	239	477		119
i Übersetzung (Getriebe und Differential)	3,77	3,14	2,51	1,26		2,51
nr Raddrehzahl (U/min)	1590	1590	1590	1590		1590
Mr Drehmoment an den Rädern (Nm)	600	600	600	600		300
v Fahrgeschwindigkeit (km/h)	180	180	180	180		180
F Antriebskraft an den Rädern (N)	2000	2000	2000	2000		1000

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		2000
P Leistung bei 50% Nenndrehzahl (kW)	62,8	62,8	62,8	62,8		31,4
M Drehmoment bei 50 %Nenndr. (Nm)	200	240	300	600		150
i Übersetzung (Getriebe und Differential)	3,77	3,14	2,51	1,26		2,51
nr Raddrehzahl (U/min)	796	796	796	796		796
Mr Drehmoment an den Rädern (Nm)	754	754	754	754		377
v Fahrgeschwindigkeit (km/h)	90	90	90	90		90
F Antriebskraft an den Rädern (N)	2510	2510	2510	2510		126

Abb. 2 Motore bei 50% der Nenndrehzahl

Wenn man nun als nächsten Schritt die Geschwindigkeit der Fahrzeuge im gleichen Gang auf die Hälfte auf 90 km/h verringert, so verringern sich auch die Motordrehzahlen auf die Hälfte, also beim Motor mit 6000 U/min Nenndrehzahl auf **3000 U/min**. Wenn man hier ein etwas höheres Drehmoment von **200 Nm** annimmt, so ergibt sich eine Leistung von 62,8 kW.

Beim Motor mit 4000 U/min Nenndrehzahl ergibt sich bei halber Fahrgeschwindigkeit eine Motordrehzahl von **2000 U/min**. Will man hier die gleiche Leistung von 62,8 kW erreichen, so sind dafür **300 Nm** erforderlich.

Mit diesen motorseitigen Drehmomenten und Leistungen ergeben sich auf der Radseite wieder gleiche Antriebskräfte von 2510 N und Momente von 754 Nm bei Übersetzung auf gleiche Fahrgeschwindigkeit von 90 km/h.

An diesem Zahlenbeispiel ist nun besonders gut zu erkennen:

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.**

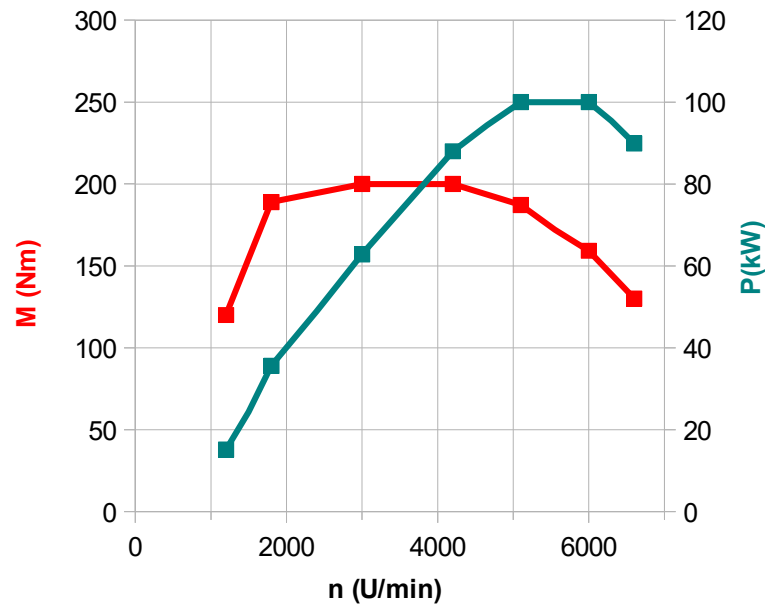
Anders ausgedrückt: Wenn ein Motor z.B. die halbe maximale Motordrehzahl hat als der andere Motor so braucht man beim Motor mit niedriger Maximaldrehzahl das doppelte Drehmoment bei der gleichen Prozentzahl (z.B. bei 45 Prozent) dieser Maximaldrehzahlen.

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.

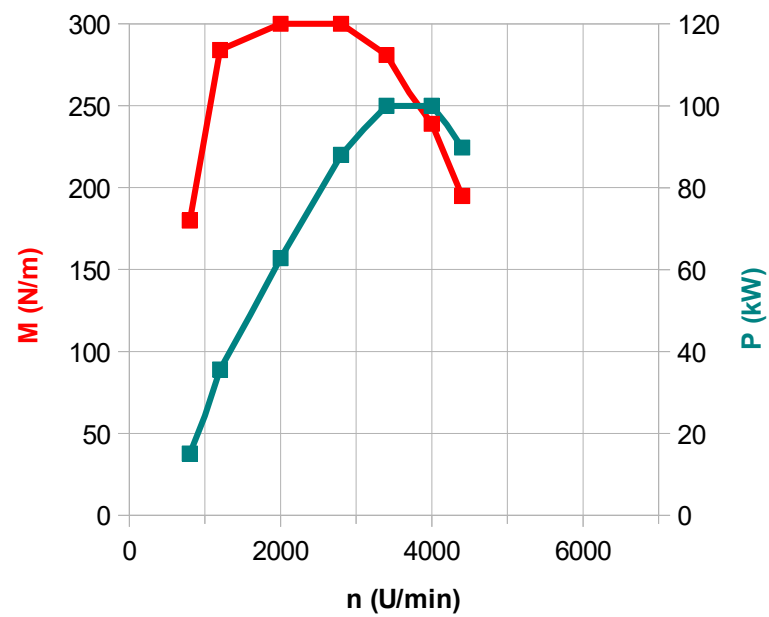
Auch hier sieht man dass gleiche Leistung bei der entsprechender Motordrehzahl bei gleicher Fahrgeschwindigkeit auch gleiche Antriebskraft an den Antriebsrädern bedeutet.

Wenn man von Motorleistung und Fahrgeschwindigkeit ausgeht ist es übrigens einfacher das Moment auf der Radseite mit **$M = F \cdot r$** aus Radkraft und Radius des Rades zu errechnen als über die Winkelgeschwindigkeit.

Im Folgenden ist nun der Drehmoment- und Leistungsverlauf von zwei Motoren mit 100 kW Nennleistung aber unterschiedlicher Nenndrehzahl in Form von Grafiken dargestellt. Die beiden anderen 100 kW Motoren sind im **Anhang B** (Seite 31) 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.



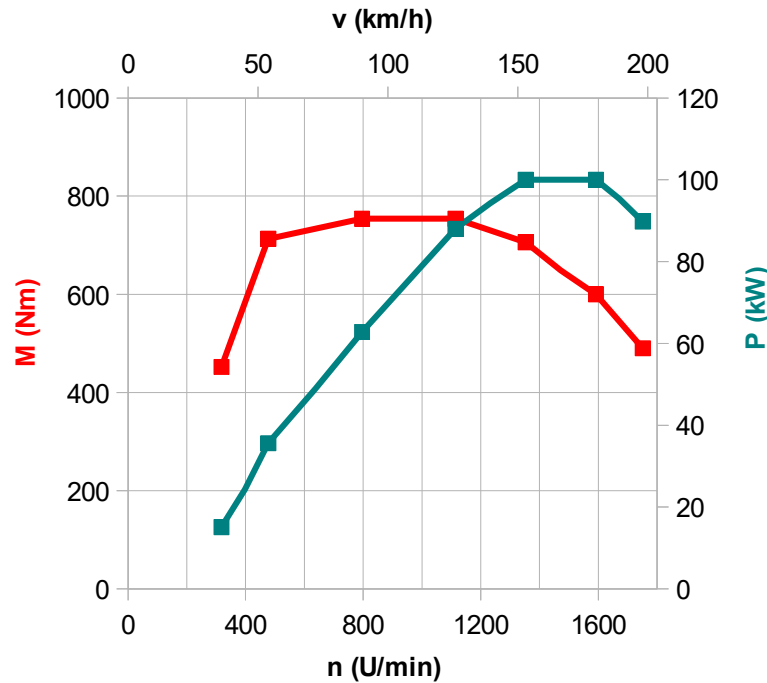
$P = 100$ kW $n_n = 6000$ U/min



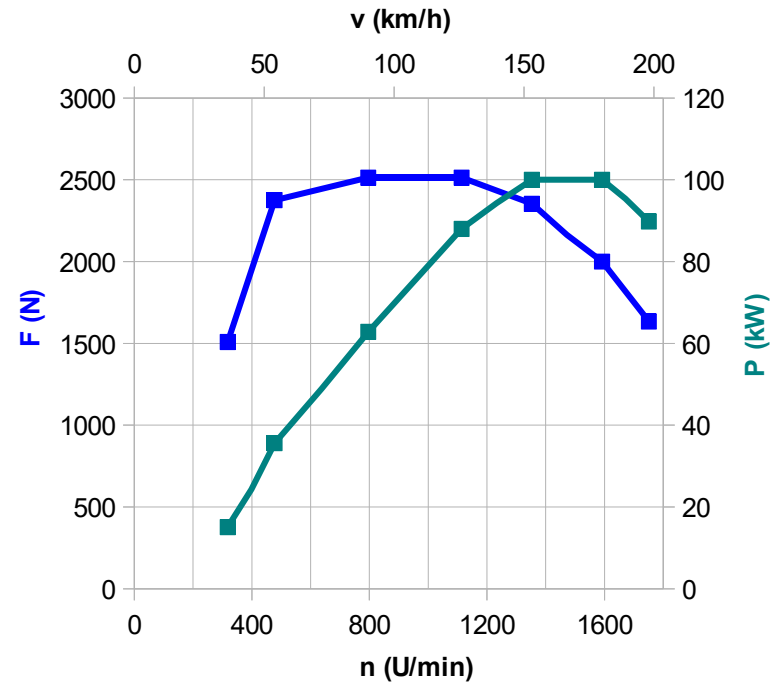
$P = 100$ kW $n_n = 4000$ /min

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. 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 (Seite 23).

Der hier dargestellte Verlauf des Drehmoments, insbesondere der steile Anstieg im untersten Drehzahlbereich, entspricht wie erwähnt im Wesentlichen heutigen Turbomotoren, wengleich hier der Anschaulichkeit wegen der Verlauf im unteren Bereich etwas mehr gegliedert dargestellt ist. Saugmotoren können hier nicht ganz mithalten (siehe auch **Anhang E** Seite 35), 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 (**Anhang G** Seite 38) 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 bereits erwähnt ist das **Drehmoment an den Antriebsrädern vom Raddurchmesser abhängig und die Antriebskraft der eigentlich maßgebende Wert.** Diese Abhängigkeit wird in **Anhang C** (Seite 32) grafisch dargestellt.

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. Doppelt 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 dargestellt was z.B. unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h bei sich ändernder Motordrehzahl an Drehmoment bzw. an Antriebskraft an den Antriebsrädern ankommt. Der Verlauf des Drehmoments entspricht, wie gesagt, dem Verlauf der Motorleistung. Da Leistung und Drehmoment der obigen 100 kW Motoren auf der Radseite gleich sind, sind hier übrigens zum Vergleich die Drehzahlen zweier Motoren eingetragen.

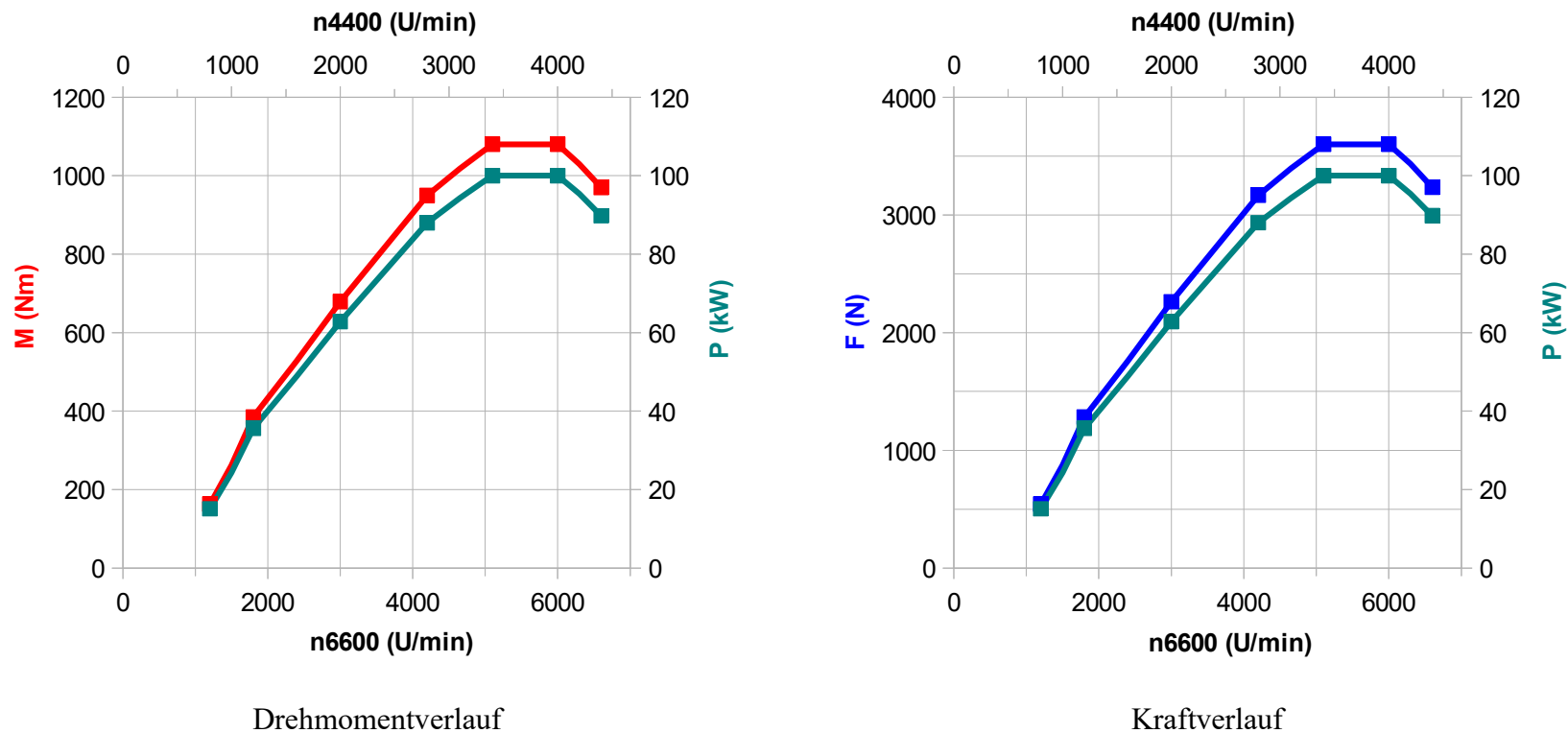


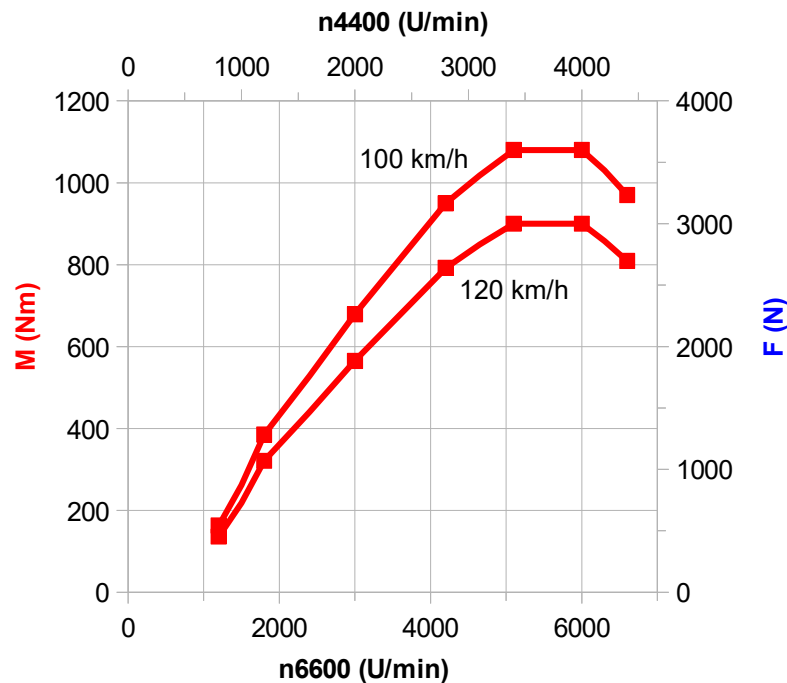
Abb. 5 Drehmoment und Kraftverlauf bei konstanter Geschwindigkeit

In der ersten der beiden nächsten Grafiken ist der Verlauf des Drehmoments an den Antriebsrädern für zwei Geschwindigkeiten, für 100 km/h und für 120 km/h eingetragen. Man sieht hier dass das maximale Drehmoment zwar für beide Geschwindigkeiten unterschiedlich ist, aber das jeweilige Maximum immer bei der maximalen Leistung liegt.

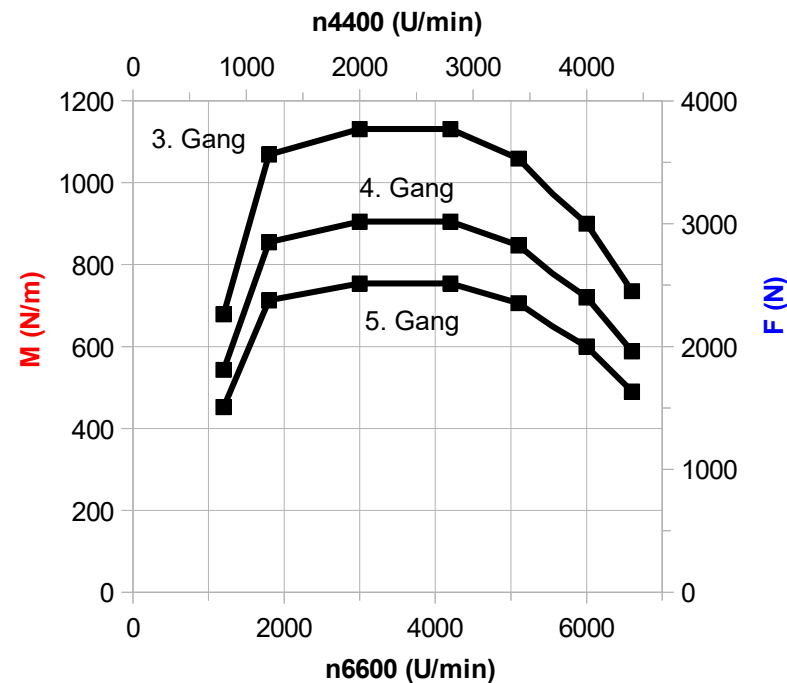
In der zweiten Grafik ist der Verlauf des Drehmoments für drei Gänge, einen angenommenen dritten, vierten und fünften Gang dargestellt, wobei für den **3. Gang 120 km/h bei Nenndrehzahl**, für den **4. Gang 150 km/h** und für den **5. Gang wie oben 180 km/h** angenommen werden. Die Endgeschwindigkeiten sind entsprechend der maximalen Motordrehzahl um 10 Prozent höher.

Bei konstanter Übersetzung, wenn sich also die Geschwindigkeit im gleichen Verhältnis ändert wie die Motordrehzahl, verläuft das jeweilige Drehmoment auf der Radseite analog zum Drehmomentverlauf des Motors.

Da Drehmoment und Antriebskraft bei einem bestimmten Raddurchmesser, hier 60 cm, in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen, kann hier beides in der gleichen Grafik mittels einer eigenen Skala dargestellt werden.



Drehmoment bei konstanter Geschwindigkeit

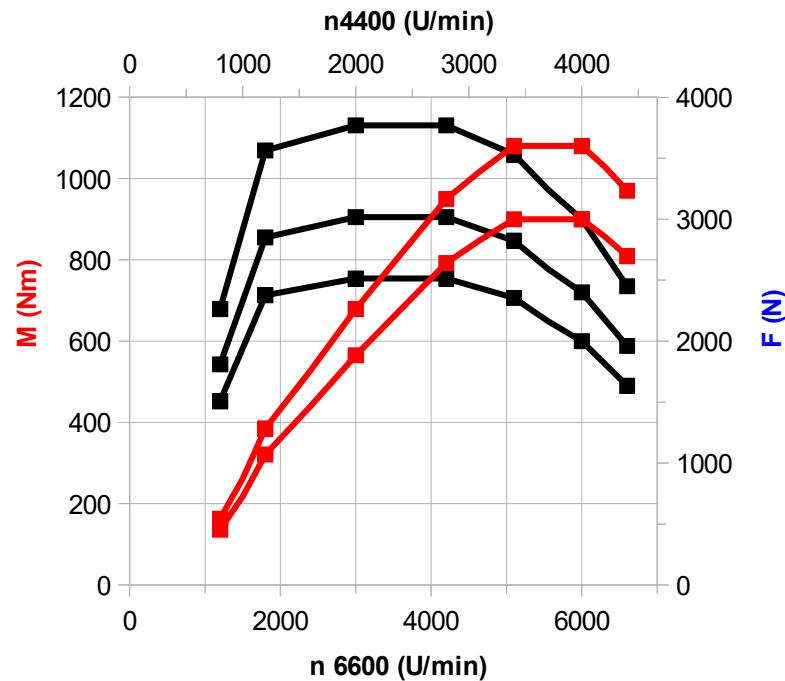


Drehmoment bei konstanter Übersetzung

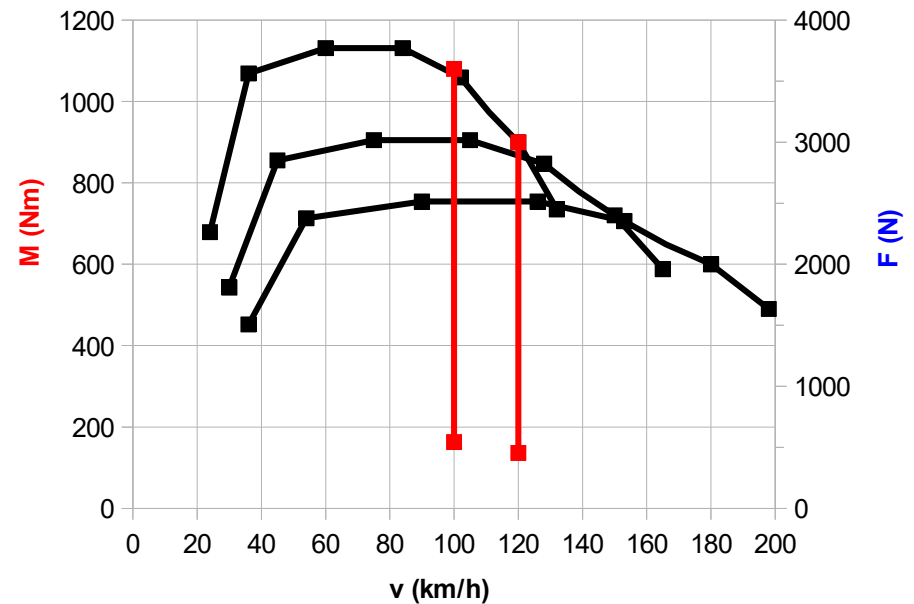
Abb. 6 Drehmoment- bzw. Kraftverlauf an den Rädern

Bringt man nun die Kurven für konstante Geschwindigkeit und konstante Übersetzung in eine gemeinsame Grafik so 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.



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 nun für Überwindung der Reibung, für Überwindung des Luftwiderstandes, bergauf zur Überwindung der Gravitation oder für Beschleunigung 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.

In **Anhang D** (Seite 33) ist dies grafisch dargestellt.

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 (Seite 23), 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.

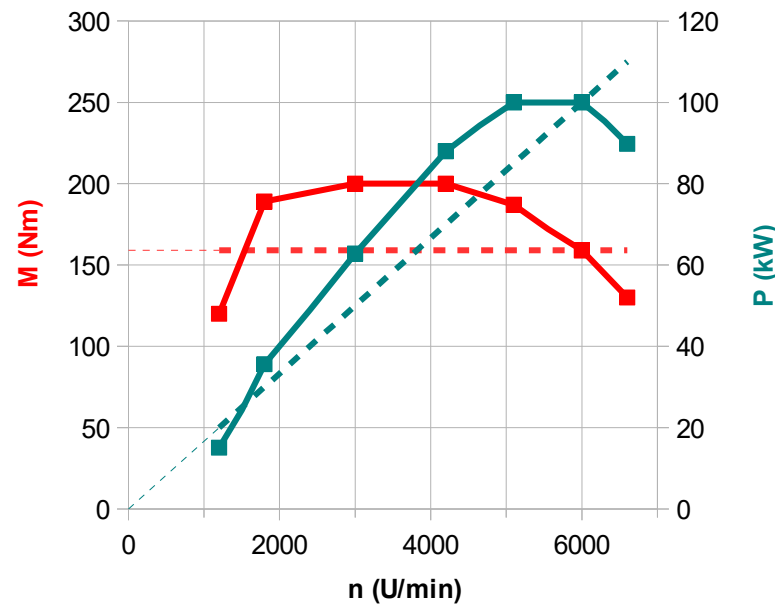


Abb. 8 Zusammenhang zwischen Drehmoment und Leistung

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.

Leistungsvergleich

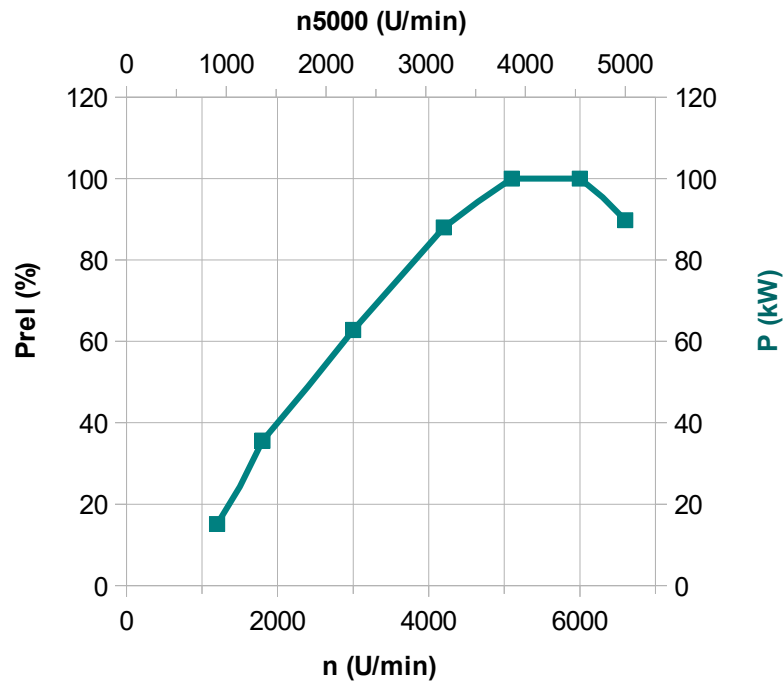
Das heißt natürlich nicht dass es nicht möglich wäre die Leistung verschiedener Motoren über den gesamten Drehzahlbereich zu vergleichen. Leistung über dem Drehzahlbereich ist sogar recht einfach zu vergleichen da sich die Leistung bei Übersetzung auf eine andere Drehzahl ja nicht ändert. Für den Vergleich des Leistungsverlaufs verschiedener Motoren muss man lediglich die Drehzahl anpassen.

Dies kann erfolgen indem man einzelne Drehzahlpunkte im Verhältnis der Maximaldrehzahlen umrechnet. Oder wie in der nachfolgenden linken Grafik dargestellt überhaupt einfach die Skala der Drehzahl auf eine gemeinsame Maximaldrehzahl, also z.B. 5000 U/min umrechnet. Man kann als Vergleichsdrehzahl natürlich jede beliebige Drehzahl verwenden es muss nur bei allen zu vergleichenden Motoren die gleiche Drehzahl sein.

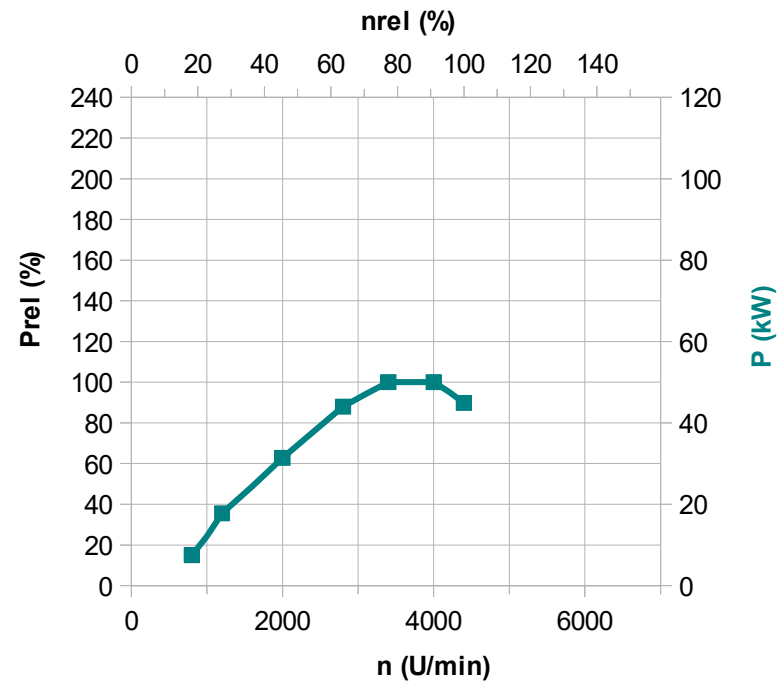
Für die Umrechnung der Drehzahlen muss man das Verhältnis der Maximaldrehzahlen verwenden, da ja der gesamte Drehzahlbereich verglichen werden soll. Der Abstand zwischen Nenndrehzahl und Maximaldrehzahl kann mitunter recht unterschiedlich sein.

Da die Leistung von einer Übersetzung auf eine andere Drehzahl unabhängig ist kann man auch genau so gut Prozent der Maximaldrehzahl verwenden, wie in der rechten der beiden Grafiken dargestellt.

Man kann dann die Leistung einfach bei einer bestimmten Vergleichsdrehzahl oder bei Prozent der Maximaldrehzahl ablesen. Also z.B. Motor A leistet bei 2500 U/min Vergleichsdrehzahl (bezogen auf eine Maximaldrehzahl von 5000 U/min) bzw. bei 50% seiner Maximaldrehzahl 69 kW, oder z.B Motor B leistet bei 50 % seiner Maximaldrehzahl 35 kW.



P = 100 kW nmax = 6600 U/min



P = 50 kW nmax = 4400 U/min

Abb. 9 Leistungsvergleich

Leistung relativer Vergleich

Für einen relativen Vergleich von Motoren unterschiedlicher Leistung kann man auch Prozent der Leistung bei einer Vergleichsdrehzahl bzw. bei Prozent der Drehzahl vergleichen, also z.B. Motor A hat bei 2500 U/min seiner Vergleichsdrehzahl (5000 U/min) bzw. bei 50% seiner Drehzahl noch 69 % seiner Leistung. Dies ist aber eher von technischen Interesse und für einen direkten Vergleich von Motoren weniger geeignet.

Drehmomentvergleich

Da unterschiedlicher Drehmomentverlauf besser erkennbar ist als unterschiedlicher Leistungsverlauf wird, wie gesagt, im unteren Drehzahlbereich für einen Vergleich fast nur das Drehmoment verwendet. Solange man sich dessen bewusst ist dass sich das Drehmoment bei Übersetzung auf eine andere Drehzahl ändert, und man daher Drehmomente für einen sinnvollen Vergleich auf eine gemeinsame Drehzahl umrechnen muss, spricht auch nichts dagegen. Auch dass das was ein Drehmoment bewirken kann, also dass das was an den Rädern an Drehmoment ankommt, auch von der konkreten Motordrehzahl abhängt, darf man nicht übersehen.

In den beiden folgenden Grafiken sind die Drehmomente der beiden Motoren mit 6000 U/min bzw. 4000 U/min Nenndrehzahl dargestellt. Die Drehmomente der Motoren in den beiden Grafiken entsprechen einander sie bewirken bei den jeweiligen Drehzahlen die gleiche Leistung.

Um Drehmomente miteinander zu vergleichen muss man zunächst, wie bei der Leistung, die Drehzahlen selbst auf eine gemeinsame Maximaldrehzahl umrechnen. **Da sich die Drehmomente, bei Übersetzung auf eine andere Drehzahl im umgekehrten Verhältnis zu diesen Drehzahlen verhalten, muss man folglich die Drehmomente im umgekehrten Verhältnis zu den Maximaldrehzahlen umrechnen.**

Als Vergleichsdrehzahl wird wieder eine Maximaldrehzahl von 5000 U/min verwendet. Die Umrechnung der Drehzahl erfolgt wieder wie bei der Leistung mittels einer Skala in der Grafik. Auch die Umrechnung des Drehmoments wird einfach mit einer eigenen Skala dargestellt.

Rechnet man nun die Drehmomente für beide Motoren auf eine Maximaldrehzahl von 5000 U/min um, so ergibt sich dann auch für beide Motoren das gleiche maximale Drehmoment von 264 Nm.

Wenn man also die beiden Motoren über das Drehmoment charakterisieren will so kann man sagen, sie weisen beide bei 2500 U/min der Vergleichsdrehzahl (bezogen auf eine Maximaldrehzahl von 5000 U/min) ein maximales Drehmoment von 264 Nm auf. Man kann auch hier für die Drehzahl einfach Prozent verwenden wenn eindeutig definiert ist auf welche Drehzahl das Drehmoment bezogen ist also z. B. Motor A hat bei 50% seiner Drehzahl ein Drehmoment von 264 Nm bezogen auf eine Maximaldrehzahl von 5000 U/min (M5000).

Man kann für den Vergleich natürlich auch hier jede beliebige Drehzahl verwenden sofern man die Drehmomente aller zu vergleichenden Motoren auf die gleiche Drehzahl umrechnet.

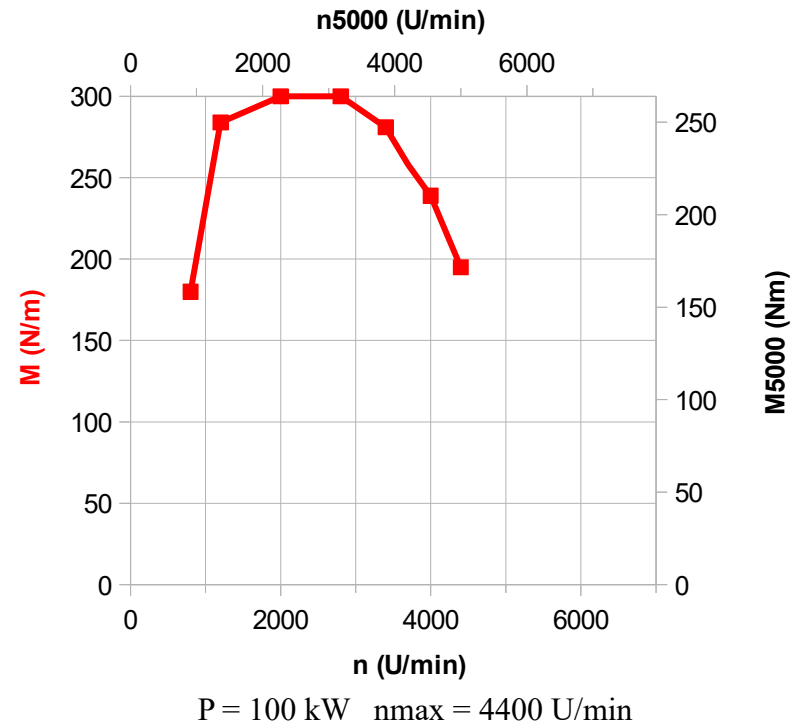
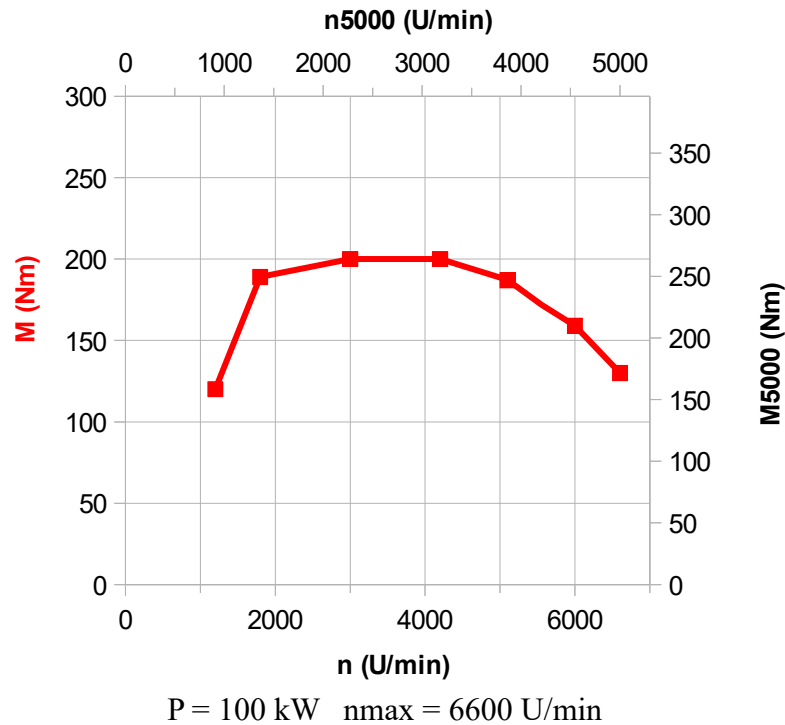


Abb. 10 Drehmomentvergleich

Drehmoment relativer Vergleich

Auch den Drehmomentverlauf für Motoren unterschiedlicher Leistung kann man relativ zueinander vergleichen, wenngleich das auch hier eher von technischen Interesse ist als dass es für einen direkten Vergleich geeignet wäre.

Auf den ersten Blick könnte man glauben dass man Drehmomentüberhöhung, also maximales Drehmoment verglichen mit dem Drehmoment bei Nennleistung, verwenden kann. Wie man aber in der Grafik weiter oben (Abb. 8, Seite 14) sieht hängt die Überhöhung des Drehmoments gegenüber dem Drehmoment bei Nennleistung davon ab bei welcher Drehzahl die Nennleistung erreicht wird. Im obigen Beispiel ergibt sich bei 6000 U/min eine wesentlich größere Drehmomentüberhöhung als bei gleicher Leistung bei 5100 U/min.

Um so früher die Nennleistung erreicht wird um so geringer ist die Drehmomentüberhöhung, Drehmomentüberhöhung gegenüber dem Drehmoment bei Nenndrehzahl ist daher für einen Vergleich ungeeignet. Der Begriff der Drehmomentüberhöhung wurde früher bei Saugmotoren, wo die Nenndrehzahl noch nicht ein Bereich war, nicht so selten verwendet, ist aber weit weg von einem korrekten Vergleichswert.

Man kann dagegen aber den Verlauf des Drehmoments einfach auf die Nennleistung beziehen. Ein Motor mit z.B. 50 kW und halber

Leistung über den ganzen Drehzahlbereich hat gegenüber einen 100 kW Motor auch das halbe Drehmoment über der ganzen Drehzahlbereich. Dies setzt allerdings voraus dass es es sich um denselben Drehzahlbereich handelt, bzw. dass die Drehmomente vorher auf den gleichen Drehzahlbereich (z.B. 5000 U/min) umgerechnet wurden. Es ergibt sich dann daher auch für beide Motoren der gleiche auf die Nennleistung bezogene Drehmomentverlauf.

Um nicht zu kleine Werte zu erhalten erscheint es allerdings sinnvoll das Drehmoment nicht auf 1 kW der Nennleistung sondern auf 100 kW Nennleistung zu beziehen. Der sich dabei ergebende Wert Nm/100kW (Nm Drehmoment pro 100 kW Nennleistung) ist zwar keine physikalische Einheit aber als ein relativer Vergleichswert durchaus geeignet.

In den nachfolgen beiden Grafiken wird wieder jeweils eine Skala verwendet um den auf die Nennleistung bezogenen Drehmomentverlauf darzustellen. In der rechten Grafik wird Prozent der Maximaldrehzahl verwendet, was man wie gesagt auch hier verwenden kann wenn die Bezugsdrehzahl (5000 U/min) eindeutig definiert ist.

Die beiden Grafiken stellen den Drehmomentverlauf eines 100 kW Motors und eines 50 kW Motors dar. Bezogen auf die Nennleistung weisen beide Motoren einen maximalen Drehmomentvergleichswert von 264 Nm pro 100kW Nennleistung auf, wobei das Drehmoment seinerseits auf eine maximale Motordrehzahl von 5000 U/min bezogen ist

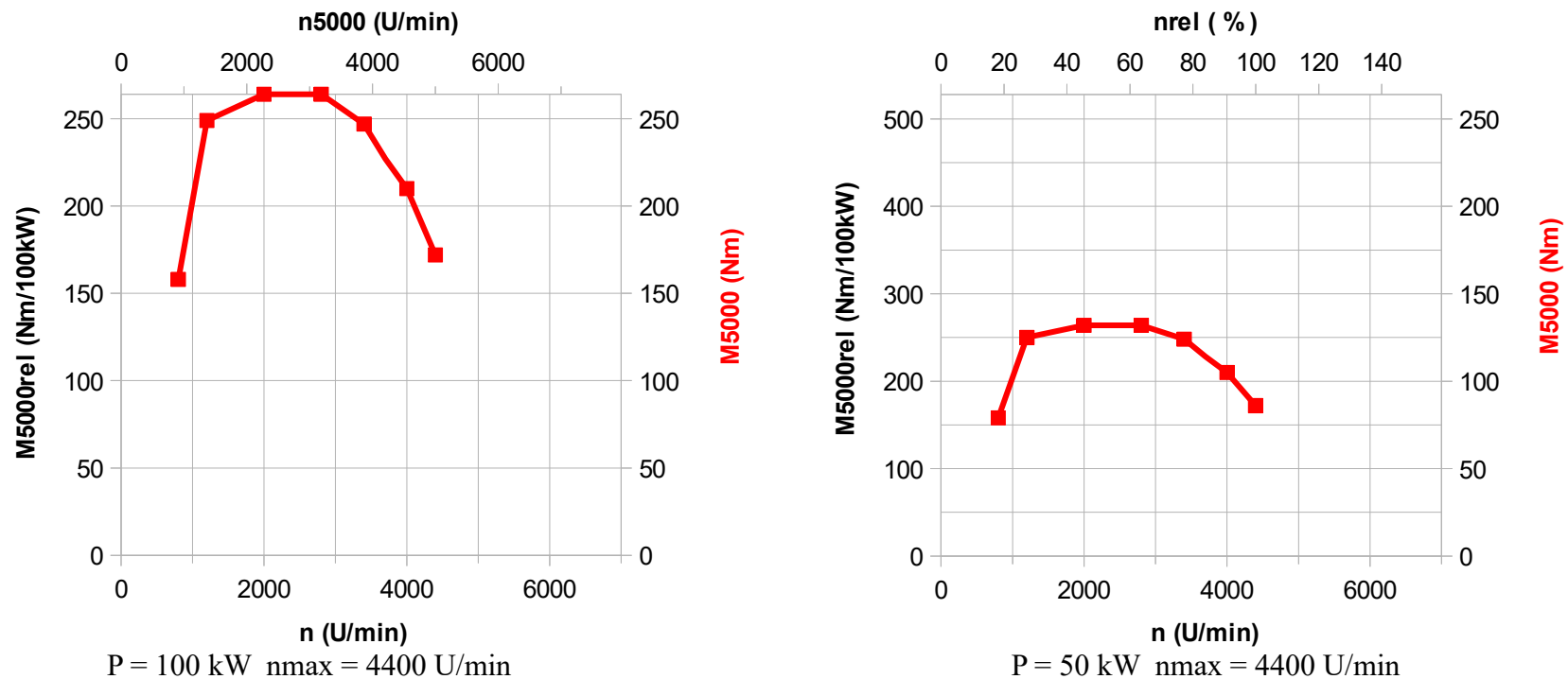


Abb. 11 Relativer Drehmomentvergleich

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.

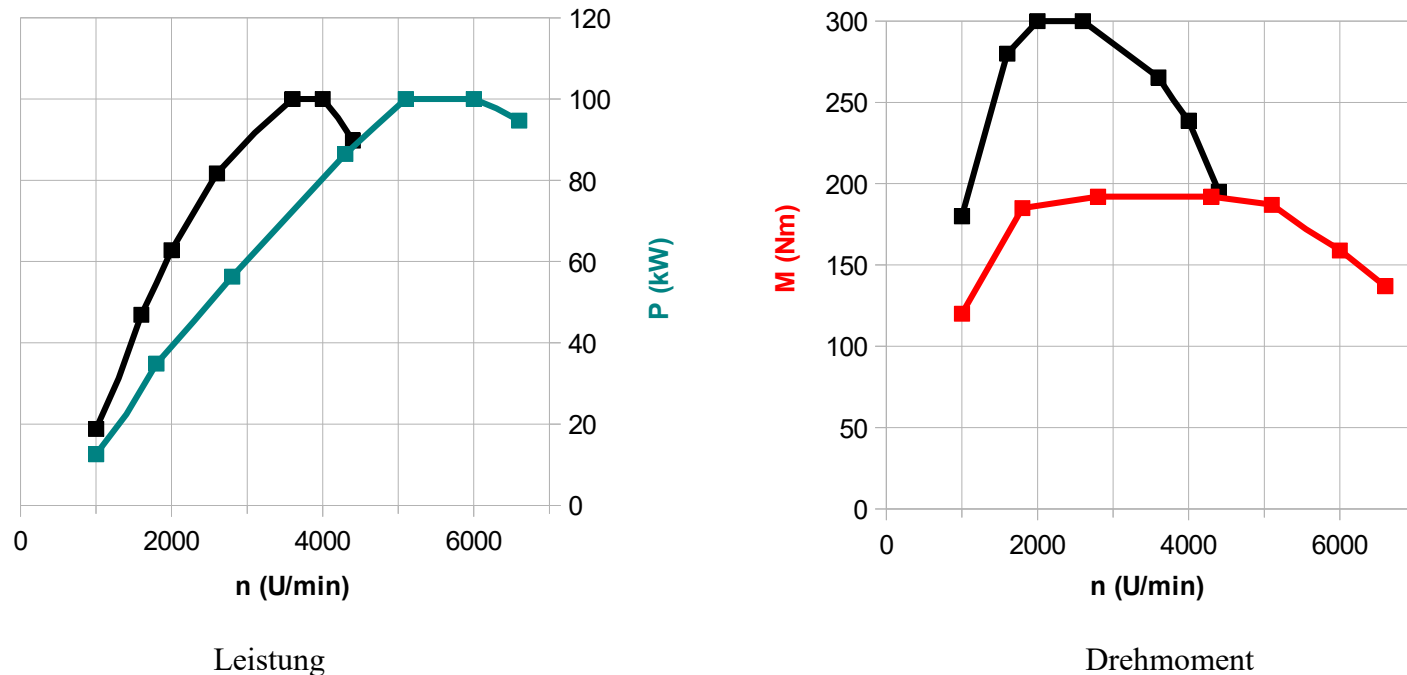


Abb. 12 Leistung und Drehmoment zweier unterschiedlicher Motoren

In den beiden folgenden Grafiken ist dargestellt wie die betreffenden Motorkennwerte aussehen wenn man sie auf eine gemeinsame maximale Motordrehzahl von 5000 U/min umrechnet. Auf diese Weise kann man sie, wie oben beschrieben, direkt miteinander vergleichen.

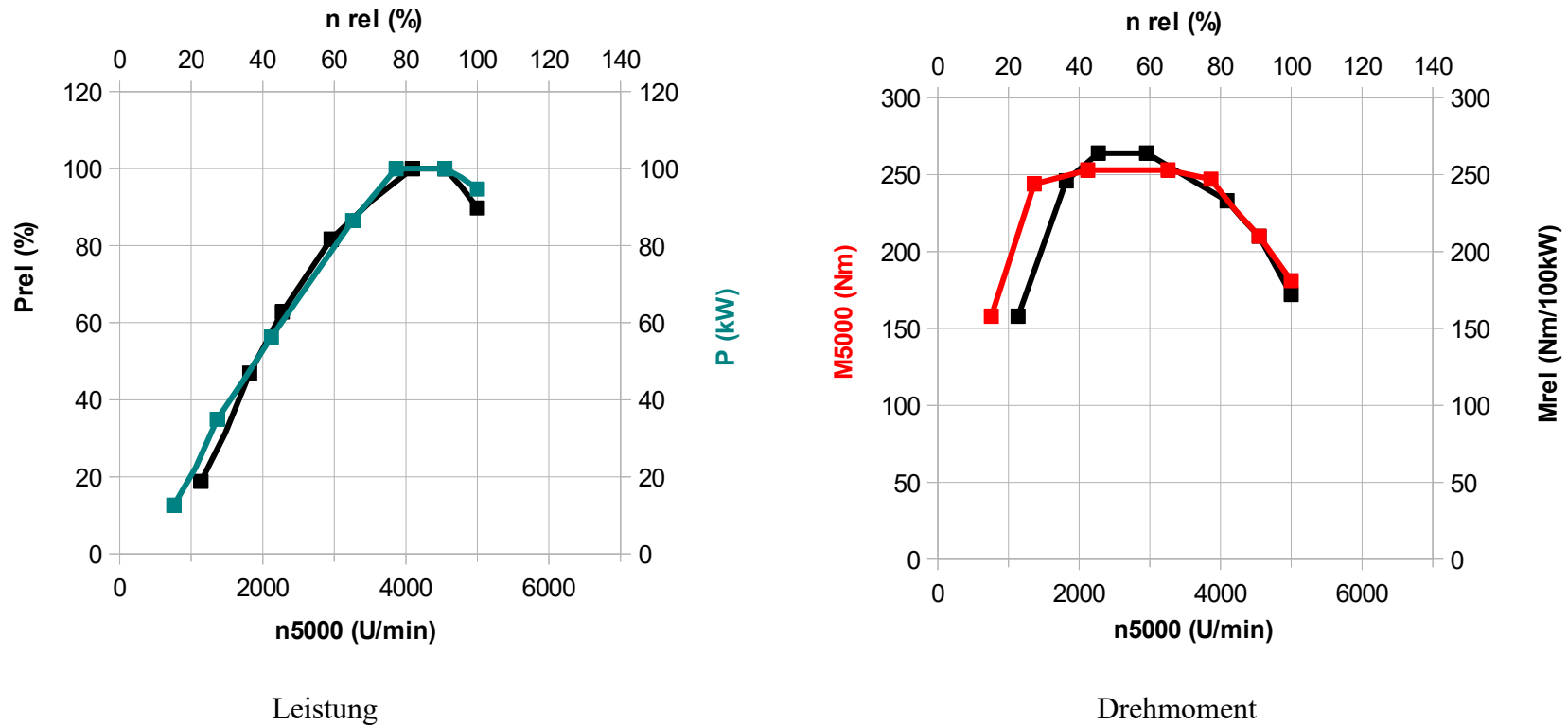


Abb. 13 Leistungs- und Drehmomentvergleich

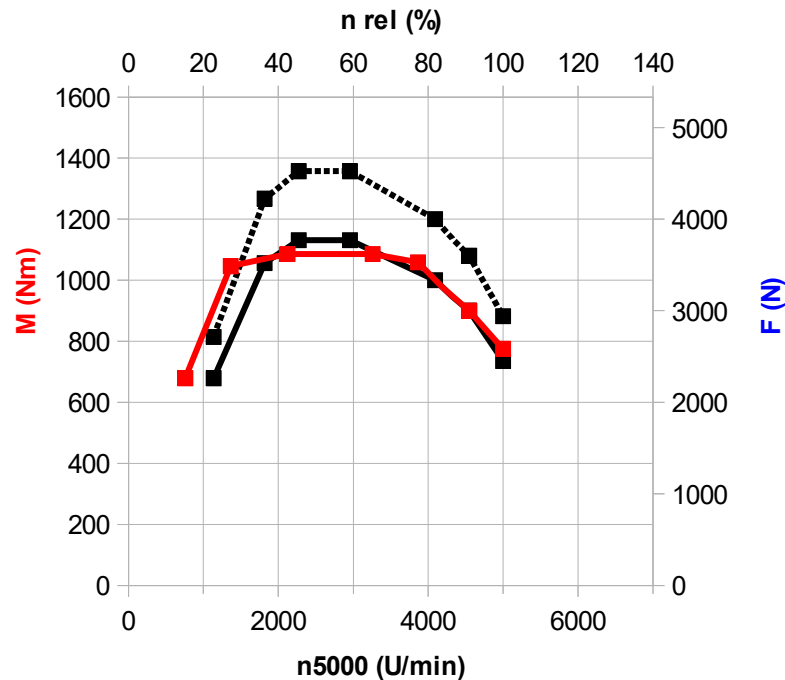
In der folgenden Tabelle sind die Kennwerte dieser beiden Motoren zusammen gefasst. Die Werte die für einen Vergleich von Motoren am geeignetsten erscheinen sind dabei hervor gehoben, wobei auch die jeweils letzten, relativen Werte bei Leistung und Drehmoment als charakteristische Werte nicht ganz uninteressant sind. Auch die Leerlaufdrehzahl ist von einem gewissen Interesse da sich ab hier das Drehmoment aufzubauen beginnt.

P Leistung bei Nenndrehzahl (kW)	100	100
n Nenndrehzahl (U/min)	5100 - 6000	3600 - 4000
n _{max} Max. Drehzahl (U/min)	6600	4400
n ₅₀₀₀ Nenndrehzahl bezogen 5000 U/min (U/min)	3860 – 4540	4090 - 4540
Nenndrehzahl (%)	77 – 91	82 - 91
P₅₀ Leistung bei 50% Nenndrehzahl (kW)	66	69
P _{rel} Relative Leistung bei 50% Nenndrehzahl (%)	66	69
M Max. Drehmoment (Nm)	192	300
n _M Drehzahlbereich für Max. Drehmoment (U/min)	2800 - 4300	2000 - 2600
M₅₀₀₀ Max. Drehmoment bezogen auf 5000 U/min (Nm)	253	264
n _{M5000} Drehzahlbereich bezogen auf 5000 U/min (U/min)	2120 – 3260	2270 - 2950
n_{Mp} Drehzahlbereich (%)	42 – 65	45 - 59
Drehmoment M ₅₀₀₀ bezogen auf 100 kW Leistung (Nm/100kW)	253	264
n _l Leerlaufdrehzahl (U/min)	800	800
n _{l5000} Leerlaufdrehzahl bezogen auf 5000 U/min (U/min)	606	909
n_{lp} Relative Leerlaufdrehzahl (%)	12	18

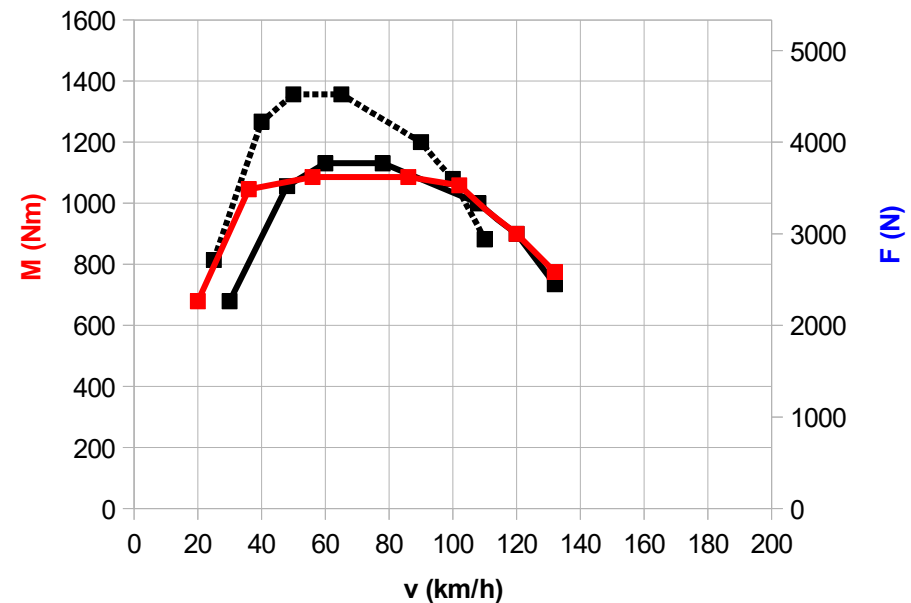
Abb. 14 Leistungs- und Drehmomentvergleich

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 Dieselfahrzeugs 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 Beschleunigungen 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 vergleicht (**Anhang E** Seite 35). 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.

Anhang A

Allgemeine Gleichung für die Leistung:

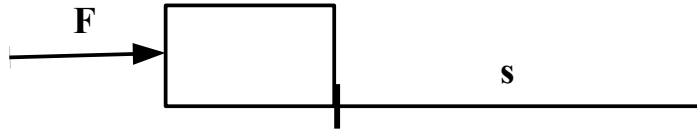


Abb. 16 Kraft und Weg

Arbeit:

Physikalische Arbeit ist Kraft mal Weg

$$W = F \cdot s$$

W.....Arbeit (Work) [Nm] (1 Nm = 1 J = 1 Ws und 1 kJ = 1000 J, 1 kWh = 3,6 E6 Ws,
weilers 1 kcal = 4,19 kJ)
Nm Arbeit nicht zu verwechseln mit dem Drehmoment das ebenfalls die Einheit Nm hat!

F.....Kraft (Force) [N]

s.....Weg (Strecke) [m]

Leistung:

Leistung ist Arbeit pro Zeit

$$P = W/t = F \cdot s/t$$

P.....Leistung (Power) [Nm/s = W = VA (VoltAmpere)] (1 kW = 1000 W und 1 kW = 1,36 PS)

t.....Zeit (time) [s]

mit

$$v = s/t$$

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

ergibt sich

$$\mathbf{P} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$$

Leistung ist Kraft mal Geschwindigkeit

Gleichungen für die Drehbewegung:

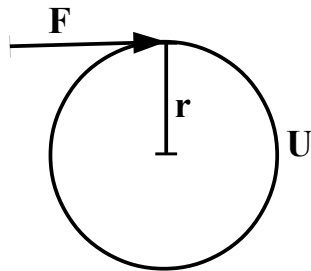


Abb. 17 Drehbewegung

Arbeit:

$$\mathbf{W} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{z} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \mathbf{z}$$

\mathbf{U}Umfang [m]

\mathbf{z}Anzahl der Umdrehungen

\mathbf{r}Radius [m]

mit

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{r}$$

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot z \quad (2 \cdot \pi \text{ Radianen pro Umdrehung})$$

\mathbf{M}Drehmoment [Nm]

φDrehwinkel [rad]

ergibt sich:

$$\mathbf{W} = \mathbf{M} \cdot \varphi$$

Leistung:

$$\mathbf{P} = \mathbf{W}/t = \mathbf{F} \cdot \mathbf{r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot z/t = \mathbf{M} \cdot \varphi/t$$

mit Umdr. pro Sekunde als Drehfrequenz:

$$\omega = \varphi/t = 2 \cdot \pi \cdot z/t = 2 \cdot \pi \cdot f$$

ωWinkelgeschwindigkeit [rad/s]

fDrehfrequenz [Hz] bzw. [U/s] (für Umdr. pro s wird im Allgemeinen der Frequenzbegriff verwendet)

In der Technik (zumindest Maschinenbau, Fahrzeugtechnik etc.) wird dagegen fast generell Umdr. pro min verwendet:

$$\omega = \varphi/t = 2 \cdot \pi \cdot z/t = 2 \cdot \pi \cdot n/60 = n \cdot \pi/30$$

nDrehzahl [U/min]

Damit ergibt sich:

$$\mathbf{P} = \mathbf{M} \cdot \omega$$

Leistung ist Drehmoment mal Winkelgeschwindigkeit

Es werden verschiedene Schreibweisen verwendet:

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

mit

$$\mathbf{\omega = 2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{bzw.}$$

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

Einsetzen als Drehfrequenz:

$$\mathbf{P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{M = P/(2 \cdot \pi \cdot f)}$$

Drehzahl direkt eingesetzt:

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

Leistung in kW umgerechnet und die Zahlen ausgerechnet:

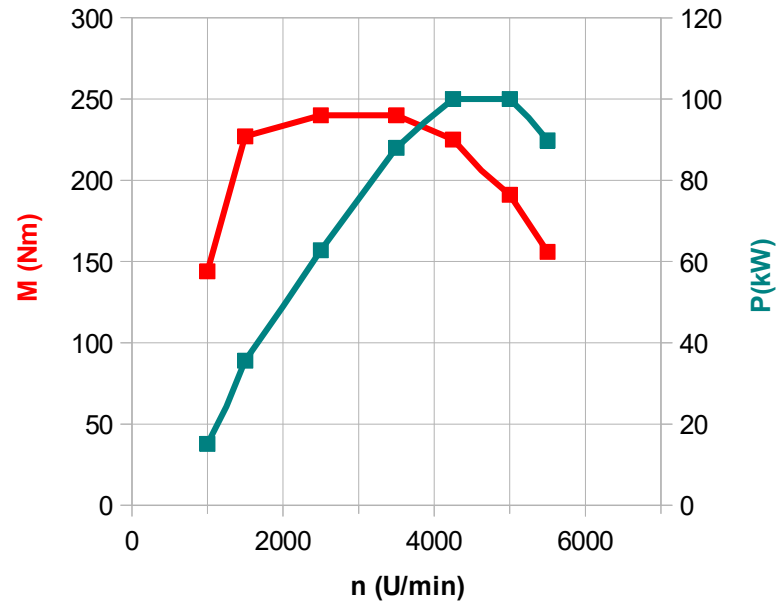
$$\mathbf{P = M \cdot n \cdot \pi/(30 \cdot 1000)}$$

$$\mathbf{P = M \cdot n/9550} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{M = P \cdot 9550/n}$$

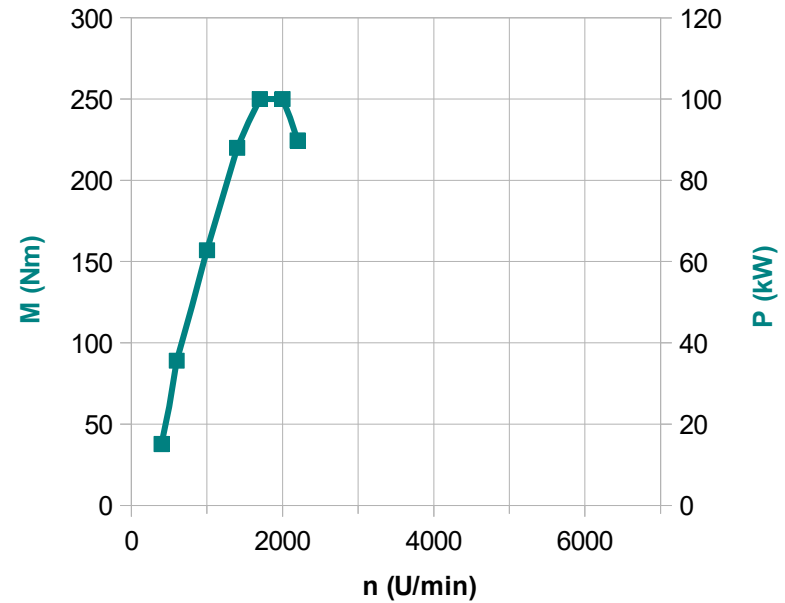
P...Leistung [kW]

Anhang B

Nenn Drehzahl 5000 U/min und 2000 U/min



$P = 100 \text{ kW}$ $n_n = 5000 \text{ U/min}$

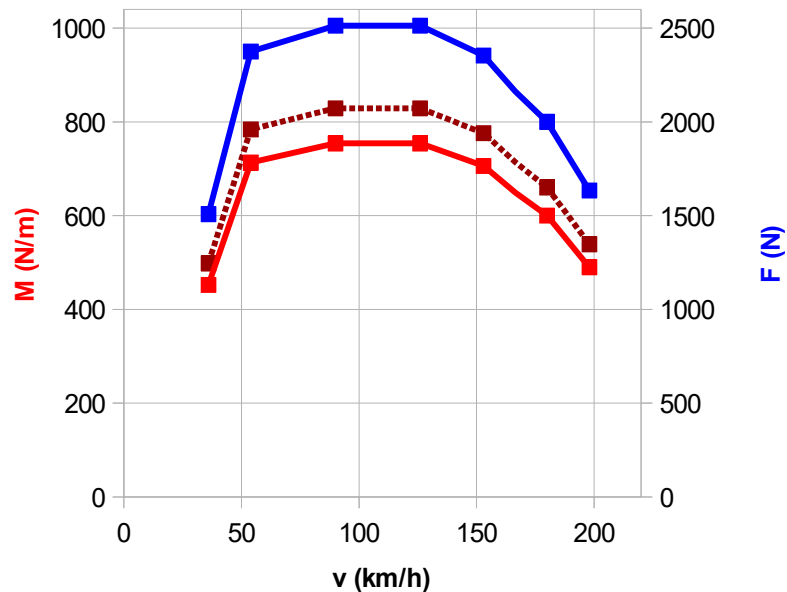


$P = 100 \text{ kW}$ $n_n = 2000 \text{ U/min}$

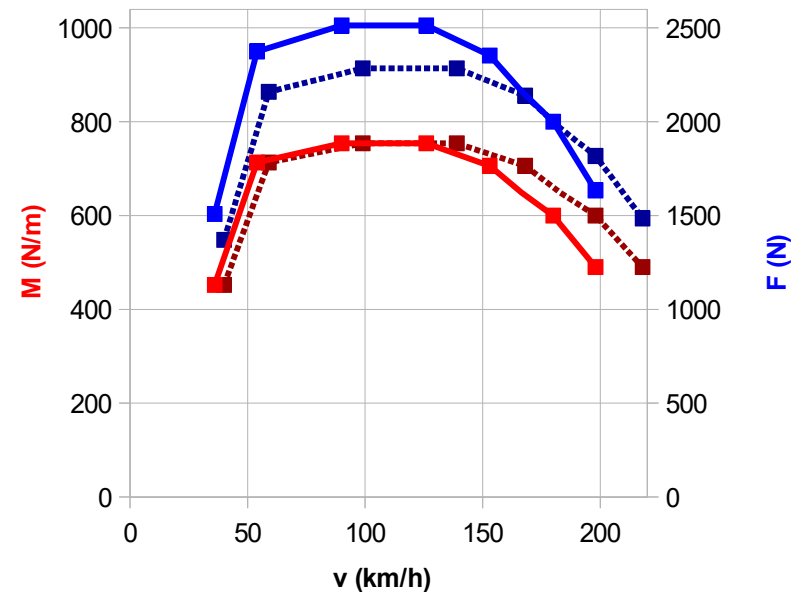
Abb. 18 Leistung und Drehmoment der Motoren

Anhang C

Zusammenhang Drehmoment – Raddurchmesser



Übersetzung auf gleiche Geschwindigkeit



Nur Änderung des Raddurchmessers

Abb. 19 Auswirkung der Raddurchmesser

Ein größeres Rad hat bei Übersetzung auf die gleiche Fahrgeschwindigkeit eine niedrigere Drehzahl und dementsprechend nach $M = P/\omega$ ein größeres Drehmoment (linke Grafik). Die Radantriebskraft die letztendlich das Fahrzeug antreibt ist allerdings wieder gleich, da sich nach $F = M/r$ bei größerem Drehmoment aufgrund des größeren Radius wieder die gleiche Kraft ergibt. Das ergibt sich natürlich auch aus $F = P/v$.

Drehmomente auf der Radseite zu vergleichen ergibt daher nur dann einen Sinn wenn die Raddurchmesser gleich sind.

In der rechten Grafik ist dargestellt was sich ergibt wenn man bei gleicher Übersetzung ein größeres Rad montieren wollte. Das Drehmoment bleibt bei gleicher Drehzahl unverändert verschiebt sich aber wegen der dabei größeren Umfangsgeschwindigkeit zu größeren

Fahrgeschwindigkeiten.

Die Antriebskraft wird darüber hinaus bei dieser größeren Geschwindigkeit dementsprechend geringer.

Für den Raddurchmesser des größeren Rades wurden 66 cm Durchmesser, also um 10 Prozent größer, verwendet.

Anhang D

Wirkung der Antriebskraft

Die Antriebskraft errechnet sich aus $F = P/v$ bzw. aus $M = P/\omega$ und daraus $F = M/r$.

Diese Antriebskraft wird nun verbraucht zur Überwindung der Reibung, der Überwindung des Luftwiderstands und wenn eine Steigung vorhanden ist zur Überwindung der Gravitation. Wenn darüber hinaus noch weitere Kraft vorhanden ist so beschleunigt das Fahrzeug.

Die Reibungskraft ändert sich über der Fahrgeschwindigkeit nicht allzu sehr.

Der Luftwiderstand nimmt dagegen mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu, doppelte Fahrgeschwindigkeit bedeutet also vierfachen Luftwiderstand. Der Luftwiderstand hängt weiters ab von der Stirnfläche und dem spezifischen Luftwiderstand (c_w -Wert).

Die Gravitationskraft ist eine Funktion der Steigung.

Die Beschleunigung errechnet sich aus der Beziehung $F = m \cdot a$ bzw. es ergibt sich $a = F/m$.

m...Masse [kg]

a.....Beschleunigung (Acceleration) [m/s²]

Im Folgenden ist als Beispiel dargestellt dass die Kraft für Reibung F_r , für Luftwiderstand F_l und für Gravitation F_g kleiner sind als die Radkraft F_{Rad} , die restliche Kraft F_a bewirkt Beschleunigung. Wäre keine Steigung vorhanden und daher für Gravitation keine Kraft erforderlich so wäre die verfügbare Kraft F_a für die Beschleunigung dementsprechend größer und würde eine dementsprechend größere Beschleunigung bewirken.

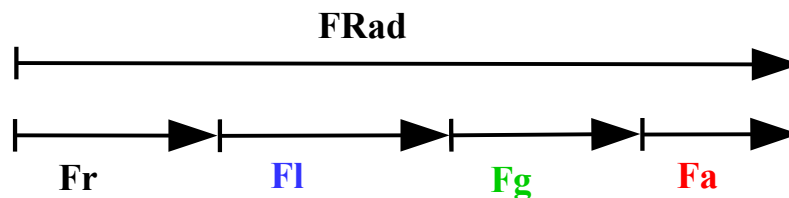


Abb. 20 Antriebskraft größer als Fahrwiderstand

Ist dagegen, wie im nächsten Beispiel, die Radkraft geringer als die Kraft für Reibung, für Überwindung des Luftwiderstandes und Überwindung der Gravitation so wird das Fahrzeug langsamer, es erfolgt eine negative Beschleunigung. Bei entsprechend größerer Radkraft, bzw. kleinerer Gravitationskraft, bliebe die Fahrgeschwindigkeit gleich.

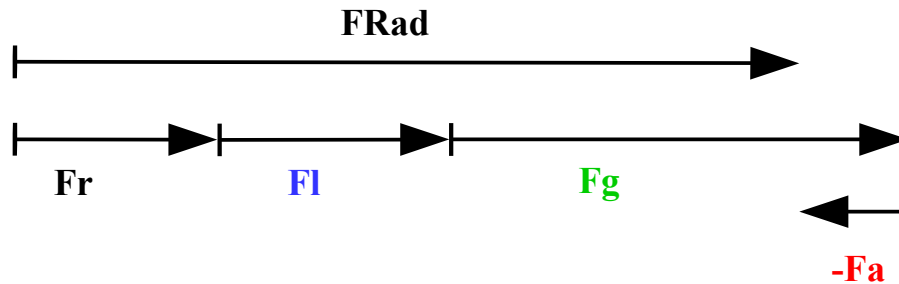


Abb. 21 Antriebskraft kleiner als Fahrwiderstand

Als weiteres Beispiel ist noch dargestellt wenn es bergab geht. Hier addiert sich die Gravitationskraft F_g zur Radkraft. Die Radkraft entspricht in diesen Beispiel einer geringeren Motorleistung. Sind diese beiden Kräfte größer als Kraft für Reibung und Luftwiderstand so bewirkt die restliche Kraft wieder Beschleunigung. Sind die Radkraft plus Gravitation gleich der Kraft für Reibung plus Luftwiderstand so bleibt die Geschwindigkeit wieder gleich.

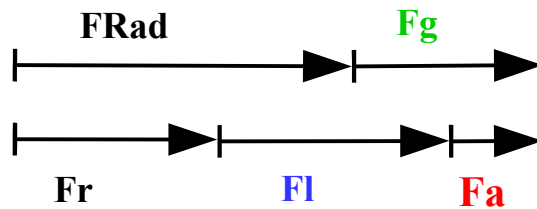


Abb. 22 Bergabfahrt

Anhang E

Vergleich Saugmotor – Turbomotor

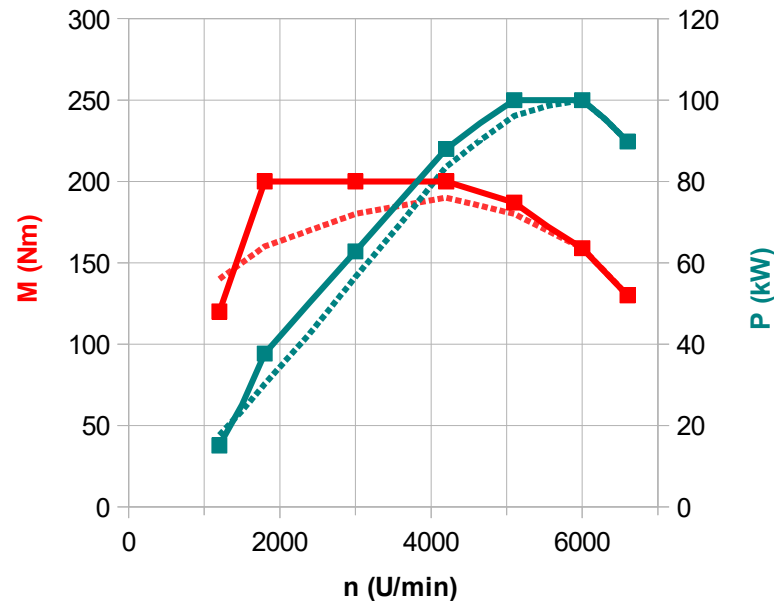


Abb. 23 Vergleich Turbomotor - Saugmotor

Während zu Beginn der Entwicklung von Turbomotoren diese nur im oberen Drehzahlbereich zusätzliches Drehmoment bzw. zusätzliche Leistung erbrachten erreicht man mit Turbomotoren der gegenwärtigen Generation eine sehr viel vorteilhaftere Charakteristik. Sie erbringen nicht nur bei deutlich kleineren Hubraum die gleiche maximale Leistung sondern erbringen im unteren Drehzahlbereich sogar deutlich mehr Drehmoment bzw. Leistung als ein herkömmlicher Saugmotor (strichlierte Linie). Dieser Unterschied besteht sowohl bei Benzinmotoren als auch bei Dieselmotoren. Bei einem Vergleich zwischen Turbo-Dieselmotoren der neueren Generationen mit einem Benzin-Saugmotor war daher schon der Turbo-Diesel im unteren Drehzahlbereich im Vorteil. Inzwischen werden aber ohnehin auch bei Benzinmotoren praktisch nur mehr Turbomotoren gebaut.

Bei Turbomotoren sind die auf gleiche Drehzahl umgerechneten maximalen Drehmomente im allgemeinen recht ähnlich. Je nachdem welche Motoren man vergleicht hat mitunter der eine oder der andere Motortyp einen leichten Vorteil. Turbomotoren der gegenwärtigen

Generation haben meist einen breiten Bereich maximalen Drehmoments, ihr maximales Drehmoment erreichen sie im allgemeinen schon bei 1500 -1800 U/min, oder bei Biturbomotoren auch bei noch niedrigeren Drehzahlen. Bei der niedrigsten Drehzahl wo maximales Drehmoment erreicht wird kann der Unterschied zum herkömmlichen Saugmotor 40 Prozent und sogar mehr betragen. Wenn man allerdings, insbesondere in einem niedrigen Gang, von ganz unten heraus beschleunigt, dürfte der Anstieg des Drehmoments wahrscheinlich nicht ganz so steil ausfallen. Der erforderliche Ladedruck muss schließlich auch erst aufgebaut werden. Dass man bei Dieselmotoren schon früher dazu übergegangen ist praktisch nur mehr Turbomotoren zu bauen hat vor allem mit dem größeren Gewicht des Dieselmotors zu tun. Durch die niedrigere Drehzahl und den daher erforderlichen größeren Hubraum einerseits und den wesentlich höheren Zünddruck und die dafür notwendige größere Festigkeit andererseits ist der Dieselmotor schon schwerer. Bei PKW- Dieselmotoren war daher die Einsparung von Gewicht und Baugröße durch Turbomotoren dringender erforderlich als bei Benzinmotoren.

Anhang F

Zahnradübersetzung

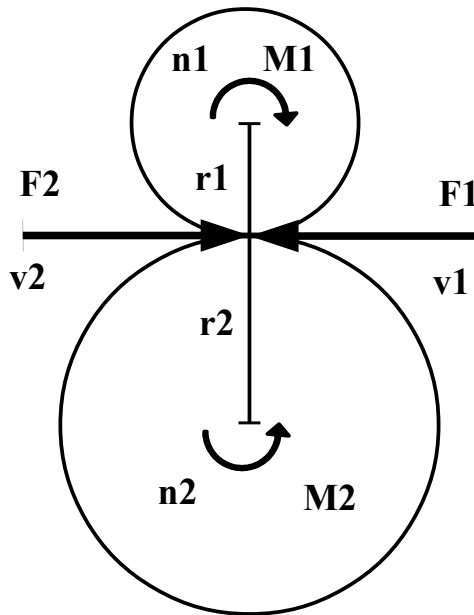


Abb. 24 Zahnradübersetzung

Bei zwei Zahnradern sind Kraft und Geschwindigkeit am Umfang gleich.

$$F_1 = F_2$$

$$v_1 = v_2$$

Die Drehmomente verhalten sich im Verhältnis der Radien der Zahnradern, die Drehzahlen im umgekehrten Verhältnis dazu.

$$M_2 = M_1 \cdot r_2 / r_1 \quad \text{bzw.} \quad M_2 = M_1 \cdot i \quad i = r_2 / r_1 \quad (\text{Übersetzungsverhältnis})$$

$$n_2 = n_1 \cdot r_1 / r_2 \quad \text{bzw.} \quad n_2 = n_1 / i$$

Wenn also ein größeres Rad den doppelten Durchmesser des kleineren Rades hat dann hat das größere Rad die halbe Drehzahl aber das doppelte Drehmoment. Man sieht daraus übrigens auch dass die Leistung bei einer Zahnradübersetzung gleich bleibt

($P = F \cdot v$ bzw. $P = M \cdot \omega$).

Anhang G

Effektiver Mitteldruck – Drehmoment

Arbeit:

$$W = F \cdot s = F \cdot h$$

W.....Arbeit (Work) [Nm]

F.....Kraft (Force) [N]

s.....Weg (Strecke) [m]

h.....Kolbenhub [m]

mit

$$F = p \cdot A$$

p.....mittlerer effektiver Kolbendruck (pressure) [Pa] (1 bar = 10E5 Pa; Pa = N/m²)

A.....Kolbenfläche (Area) [m²]

$$W = p \cdot A \cdot h = p \cdot V$$

V.....Hubvolumen [m³]

Arbeit Drehbewegung:

$$W = M \cdot \varphi = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot z = M \cdot 4 \cdot \pi \quad (\text{siehe Anhang A})$$

M....Drehmoment [Nm]

φ....Drehwinkel [rad] (2.π Radianten pro Umdrehung)

z....Anzahl der Umdrehungen (2 Umdrehungen beim 4 Taktmotor)

damit ergibt sich:

$$M \cdot 4 \cdot \pi = p \cdot V$$

$$M = p \cdot V / (4 \cdot \pi) \quad \text{bzw.} \quad p = M \cdot 4 \cdot \pi / V$$

Druck in bar und Hubvolumen in Liter:

$$M = (p \cdot 10E5) \cdot (V/1000) / (4 \cdot \pi) = p \cdot V \cdot 100 / (4 \cdot \pi)$$

$$M = p \cdot V \cdot 100 / (4 \cdot \pi) \quad \text{bzw.} \quad p = M \cdot 4 \cdot \pi / (V \cdot 100)$$

p.....mittlerer effektiver Kolbendruck (**p**ressure) [bar] (1 bar = 10E5 Pa; Pa = N/m²)

V.....Hubvolumen [Liter] (1 m³ = 1000 Liter; 1 Liter = 1 dm³)