

C. Bewegungswiderstände und Zugkräfte.

Der Vorgang bei der Fortbewegung ist bei Fuhrwerken mit tierischem Zug (Gespannen) ein anderer als bei Kraftwagen, die durch einen in das Fahrzeug selbst eingebauten Motor fortbewegt werden. Die ersteren, wie auch die Anhängewagen oder Anhänger der Lastkraftwagen, haben nur gezogene Räder, wogegen bei den Kraftwagen auch Triebräder (ziehende Räder) vorhanden sind.

Der Fortbewegung eines Fahrzeugs auf der Straße stellen sich gewisse Widerstände hemmend entgegen, die durch die Zugkraft überwunden werden müssen. Zunächst ist der *Reibungswiderstand* anzuführen, der bei den Räderfuhrwerken, die uns hier allein interessieren, hervorgerufen wird einmal durch die Reibung zwischen den Rädern und der Fahrbahnoberfläche und sodann durch die Zapfenreibung der Räder. Bei Schlitten, auf deren eingehendere Behandlung angesichts ihrer geringen Bedeutung hier füglich verzichtet werden kann, kommt nur die gleitende Reibung zwischen den Kufen und der Schneebahn in Betracht. Zu dem Reibungswiderstand tritt auf ansteigenden Straßenstrecken noch der *Steigungswiderstand* und außerdem der *Luftwiderstand* hinzu, der jedoch nur bei sehr rasch fahrenden Kraftfahrzeugen eine merkliche Größe erreicht und in allen übrigen Fällen deshalb ganz außer Betracht bleiben kann. Während nun bei den auf Gleisen verkehrenden Fahrzeugen der Eisenbahnen und Straßenbahnen zu den soeben genannten drei Widerständen noch als eine weitere erhebliche Hemmung in Krümmungen der sogenannte Krümmungswiderstand hinzukommt, ist dieser bei den Straßenfahrzeugen so unbedeutend, daß er ohne Bedenken vernachlässigt werden kann. Der Grund hierfür besteht, wie leicht einzusehen ist, kurz gesagt, darin, daß alle bei den Bahnen aus der zwangsweisen Führung der Räder durch die Schienen entstehenden Reibungen und Klemmungen bei den Straßenfuhrwerken nicht auftreten. Überdies sitzen die Räder dieser letzteren Fuhrwerke mit Ausnahme der Triebräder der Kraftwagen lose auf den Achsen und können sich deshalb beim Durchfahren von Krümmungen genau nach den für die beiden Räder einer und derselben Achse verschieden großen Krümmungshalbmessern drehen. Zur Fortbewegung eines Fahrzeugs bedarf es einer Zugkraft, die größer ist als der aus der Summe der einzelnen Widerstände sich zusammensetzende Gesamtwiderstand des Fahrzeugs. Wirft man endlich noch die Frage auf, welche Bedeutung diesen Untersuchungen über die Fortbewegung der Fahrzeuge zukommt, so ist zu erwidern, daß sie weniger zu unmittelbarem praktischen Gebrauch, als zur Klärung der grundlegenden Begriffe und Anschauungen bestimmt sind. Wir wollen nun zunächst die drei Arten der Bewegungswiderstände und hierauf die Zugkräfte und die Arbeitsleistung einer näheren Betrachtung unterziehen.

1. **Bewegungswiderstände.** a) *Auf wagrechter Bahn (Reibungswiderstand).* Da bei Gespannen die Zugkraft Z an den Achsen angreift, so äußert sich der Widerstand des Fahrzeugs als eine gleichfalls auf die Achsen wirkende, der Zugkraft entgegengesetzte Kraft W , die von der Zugkraft überwunden werden muß. Bei den Kraftfahrzeugen hingegen, bei denen die Reibung zwischen den Triebrädern und der Fahrbahnoberfläche zur Fortbewegung benützt wird, ist die Zugkraft Z ebenso wie der ihr entgegenstehende Widerstand W als am Radumfang wirkend anzusehen.

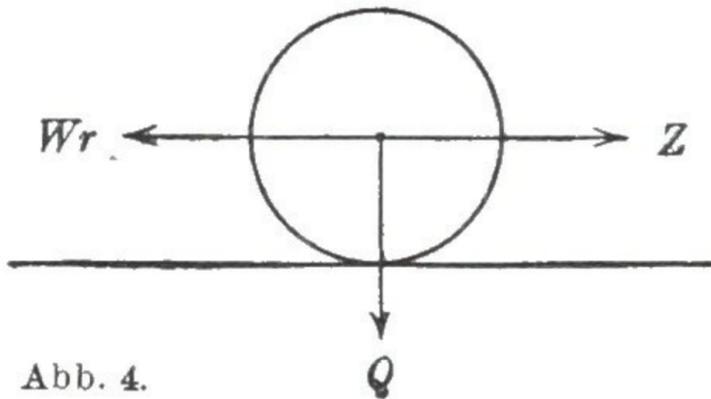


Abb. 4.

Erfahrungsgemäß läßt sich der bei wagrechter Bahn und langsamer Fahrt allein in Betracht kommende Reibungswiderstand W_r , wenn man sich nach Abb. 4 das Gesamtgewicht Q des Wagens, das aus Eigengewicht und Nutzlast besteht, auf ein einziges Rad vereinigt denkt, durch folgende einfache Beziehung zum Ausdruck bringen.

$$W_r = \mu Q \quad (1)$$

Hierin stellt μ die sogenannte Reibungszahl dar, die den Einfluß der gesamten Reibung, d. h. der rollenden Reibung zwischen Rad und Fahrbahn sowohl als auch der Zapfenreibung in *einem* Zahlenwert zum Ausdruck bringt. Diese Reibungszahl läßt sich, wie ein Blick auf die obige Formel zeigt, für ein bestimmtes Wagengewicht durch Messung der notwendigen Zugkraft mittels Kraftmesser unschwer feststellen. Für μ lassen sich nur Durchschnittswerte für jede Art der Fahrbahnbefestigung angeben, denn man müßte sich in recht überflüssige Untersuchungen verlieren, wollte man die mannigfachen Verhältnisse, die ihren Einfluß auf den Wert von μ geltend machen, im einzelnen zahlenmäßig festlegen. Es sei nur soviel bemerkt, daß die rollende Reibung die Zapfenreibung bedeutend überwiegt, indem sie durchschnittlich etwa sechsmal so groß ist, und daß die rollende Reibung und die Zapfenreibung je für sich wieder großen Schwankungen unterliegen. Die erstere ist auch bei gleicher Art der Fahrbahnbefestigung und Bereifung der Räder (Eisen einerseits und elastische Bereifung andererseits) von den verschiedensten Umständen abhängig. Bei Schotterbahnen z. B. von der Beschaffenheit des Schotters, die im einzelnen sehr verschieden sein kann, dem Unterhaltungszustand der Straße und der Witterung, ferner von der Felgenbreite sowie dem Durchmesser der Räder, da mit zunehmendem Durchmesser die Reibung geringer wird. Die Größe der Zapfenreibung ist vor allem bedingt durch die Bauart der Achsen und Räder und z. B. bei einem mit Kugellagern versehenen Luxuswagen erheblich kleiner als bei einem einfachen Landfuhrwerk. Für die im Landstraßenbau üblichen Fahrbahn-

befestigungen gibt die folgende Tafel Durchschnittswerte der Reibungszahlen.

Tafel 2.

Art der Fahrbahn	Reibungszahlen, Durchschnittswerte
Trockener, fester Erdweg	$\frac{1}{20} = 0,050$
Kotige Schotterbahn	$\frac{1}{20} = 0,050$
Trockene, gute Schotterbahn	$\frac{1}{35} = 0,030$
Bituminöse Fahrbahn	$\frac{1}{50} = 0,020$
Fuhrwerksgleise aus Stahl	$\frac{1}{200} = 0,005$

b) *Auf Steigungen (Steigungswiderstand)*. Auf Steigungen erhöht sich bei der Bergfahrt der Widerstand gegenüber demjenigen auf wagrechter Bahn um den in die Richtung der Straßenneigung fallenden Teil des gesamten Wagengewichts. Zu diesem tritt bei Gespannen noch ein ebenso großer Anteil des Zugtiergewichts hinzu, dessen Bergaufbeförderung die Kräfte der Tiere gleichfalls in vermehrter Weise in Anspruch nimmt. Bei der Talfahrt hingegen vermindern die entsprechenden Teile des Wagen- und Zugtiergewichts den Widerstand um dasselbe Maß. Die folgenden Beziehungen, die sich aus Abb. 5 leicht entnehmen lassen und bei denen von den Doppelvorzeichen das obere für Steigungen, das untere für Gefälle gilt, werden dies vollends klar machen. W bezeichnet den Gesamtwiderstand, Z die erforderliche Zugkraft, Q das gesamte Wagengewicht, G das gesamte Zugtiergewicht, worüber die Zusammenstellung auf S. 16 nähere Angaben enthält, α den Winkel der Straßensteigung, s die gleiche Steigung in Hundertsteln, also $\text{tg } \alpha = s$. Damit ergibt sich

$$W = \mu Q \cos \alpha \pm (Q + G) \sin \alpha \quad (2)$$

Bei den geringen Steigungen, die für Landstraßen angängig sind,

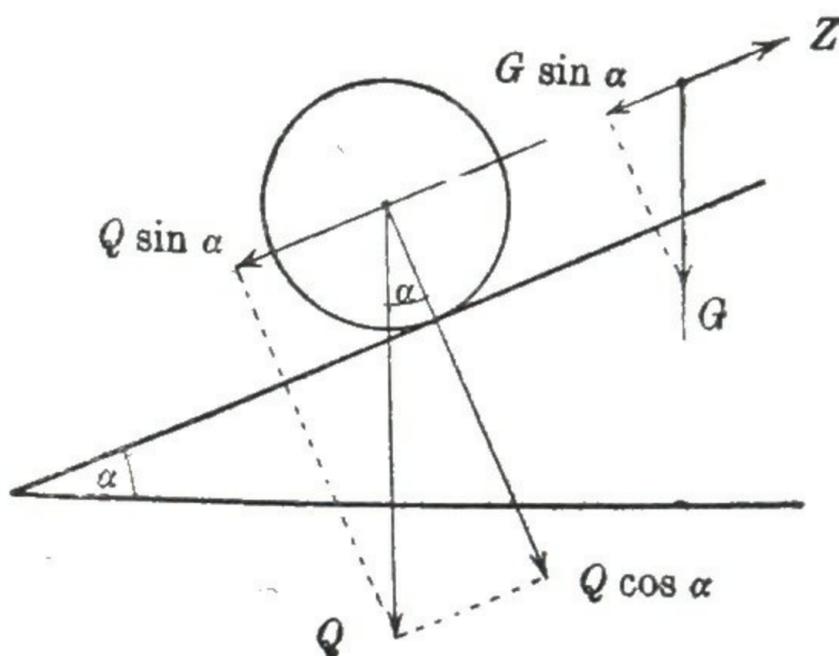


Abb. 5.

wird der Winkel α stets klein bleiben. Es kann deshalb $\cos \alpha = 1$ und $\sin \alpha = \text{tg } \alpha$ gesetzt werden, zumal da auch für die Reibungszahlen μ nur Durchschnittswerte ermittelt werden können. Hieraus ergibt sich die folgende einfache und übersichtliche Fassung:

$$\begin{aligned} W &= \mu Q \pm (Q + G) \text{tg } \alpha \\ &= \mu Q \pm (Q + G) s \leq Z \quad (3) \end{aligned}$$

oder für Kraftfahrzeuge, wo kein Zugtiergewicht in Betracht kommt:

$$W = \mu Q \pm Q s = (\mu \pm s) Q \leq Z \quad (4)$$

In beiden Fällen stellt das erste Glied der rechten Seite den reinen Reibungswiderstand dar, wie er nach Gleichung (1) auf wag-rechter Bahn vorhanden ist, während das zweite Glied den gesamten Einfluß der Steigung zum Ausdruck bringt. Die einzelnen Formeln besagen also, daß für ein und denselben Wagen auf einer Fahr-bahn von bestimmter Oberflächenbeschaffenheit und Steigung der durch die Zugkraft Z zu überwindende Widerstand W mit dem Gesamtgewicht des Wagens, also auch entsprechend der Nutzlast zu- und abnimmt. Hierzu kommt bei Gespannen in Steigungen noch der Einfluß des Zugtiergewichts. Wird der absolute Wert des zweiten Glieds der rechten Seite (des Steigungswiderstands) größer als der Wert des ersten Glieds (des Reibungswiderstands), was bei Vernachlässigung des Zugtiergewichts G eintritt, sobald $s > \mu$, so bewegt sich der Wagen von selbst bergab. Er muß deshalb bei der Tal-fahrt, sobald unzulässig große Geschwindigkeiten eintreten wollen, ge-bremst werden. Auf guter trockener Schotterbahn mit $\mu = 1/35 = 0,03$ beginnt somit bei einem Gefäll von 3 % der Wagen sich von selbst bergab zu bewegen. Wenn Bremsen fehlen, wie dies bei Gespannen namentlich in vorwiegend ebenen Gegenden ab und zu vorkommt, muß in größeren Gefällen der Wagen durch die Zugtiere zurück-gehalten werden, was schwierig ist und eine ungünstige, vielfach an Mißhandlung grenzende Beanspruchung der Zugtiere bedeutet. Ebenso muß bei derartigen Gefällen, wenn der Wagen bei einem Halt während der Bergfahrt nicht von selbst in rückläufige Be-wegung talabwärts kommen und die Zugtiere entlastet werden sollen, der Wagen entweder gebremst oder seine Räder unterlegt werden. Es erhellt aus dem Angeführten auch, daß bei Kraftfahrzeugen, wo die Möglichkeit einer Hemmung des Fahrzeugs durch die Zug-tiere nicht besteht, eine sicher wirkende Bremse zu den unentbehr-lichen Ausrüstungsgegenständen gehört.

Die Gleichungen (3) und (4) zeigen auch, daß je besser, d. h. je glatter die Straßenbefestigung ist und je kleiner demnach μ und damit der Reibungswiderstand wird, desto überwiegender bei zu-nehmender Steigung der Einfluß des Steigungswiderstands zur Gel-tung kommt. Dieser Umstand legt den Gedanken nahe, zur vollen Ausnützung der Vorzüge von Straßen mit glatter Fahrbahnbefesti-gung die Steigungen möglichst niedrig zu halten, doch kann diesem Gesichtspunkt im Landstraßenbau nur in beschränktem Umfang Rechnung getragen werden, weil, wie an anderer Stelle gezeigt werden wird, sowohl die Steigungen der Landstraßen als auch die Art ihrer Fahrbahnbefestigung überwiegend durch zwingende Rück-sichten anderer Art bestimmt werden.

Die Gleichung (4) ist auch für Lastkraftzüge brauchbar, und

zwar kann bei gleichartiger Bereifung der Räder des Kraftwagens und der Anhänger, d. h. bei gleichgroßer Reibungszahl μ das Gesamtgewicht der Anhänger ohne weiteres dem Gesamtgewicht Q des Kraftwagens selbst zugeschlagen und somit das Gewicht aller Wagen durch eine einzige Zahl ausgedrückt werden. Ist die Bereifung der Wagen dagegen erheblich verschieden (etwa Eisen und Gummi), so können wenigstens die Wagen mit gleichartiger Bereifung in der gleichen Weise zusammengefaßt werden.

Dies sind die Widerstände, die für gewöhnlich allein in Betracht kommen. Nur bei rascher Fahrt von Kraftfahrzeugen tritt, wie wir gesehen haben, zu ihnen noch hinzu:

c) *Luftwiderstand*. Der Luftwiderstand entsteht im wesentlichen durch den Druck der Luft auf die Stirnfläche und ihre Saugwirkung auf die Hinterfläche des Fahrzeugs und wächst nach Versuchen mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit. Für seine Größe w in kg auf 1 qm des Wagenquerschnitts werden verschiedene Werte angegeben, die sich im allgemeinen zwischen

$$w = 0,005 V^2 \text{ bis } 0,007 V^2 \quad (5)$$

bewegen, wenn V die Geschwindigkeit in km in der Stunde ist. Bei Bemessung der Geschwindigkeit V wird, um auch einen etwaigen Gegenwind zu berücksichtigen, zur größten Fahrgeschwindigkeit zweckmäßigerweise noch ein Betrag von etwa 18—20 km für die Stunde hinzugeschlagen. Als von der Luft getroffener Wagenquerschnitt kann (nach Güldner) für allgemeine Berechnungen das Produkt aus Spurweite und größter Höhe des Wagens über der Vorderachse angenommen werden.

Im übrigen ist der Luftwiderstand ein Punkt, der weniger für den Straßenbau als für den Bau und Betrieb von Kraftfahrzeugen von Interesse ist und zwar nicht bloß deswegen, weil er, wie bereits angedeutet wurde, nur bei verhältnismäßig rascher Fahrt auf ein erhebliches Maß anschwillt, für die überwiegende Mehrzahl der Fahrzeuge also ausscheidet, sondern auch deshalb, weil er durch Maßnahmen des Straßenbaues in keiner Weise beeinflussbar ist. Umgekehrt aber hat es jeder Kraftwagenführer in der Hand, einen etwa lästig fallenden Luftwiderstand durch Verringerung der Fahrgeschwindigkeit zu ermäßigen oder so gut wie ganz auszuschalten. Angefügt sei hier noch die jedem Radfahrer bekannte Erfahrungstatsache, daß sich bei der Fortbewegung der Fahrräder schon ein einigermaßen kräftiger Gegenwind als empfindliche Hemmung fühlbar macht, während andererseits ein Rückenwind die Fahrt erleichtert.

2. Zugkräfte und Arbeitsleistung. a) *Tierische Zugkraft*. Die Leistungsfähigkeit eines Zugtieres ist selbstverständlich zunächst abhängig von der Tiergattung, der es angehört. Sie schwankt aber auch innerhalb der gleichen Gattung nach der individuellen Be-

schaffenheit und dem Lebensalter des Tieres, sowie nach seiner Ernährung und Pflege und der Geschicklichkeit des Fuhrmanns in der Lenkung des Tieres zwischen weiten Grenzen. Es liegt auf der Hand, wie schwierig es ist, alle diese Verhältnisse ebenso wie die Vorgänge im tierischen Organismus, die sich bei der Arbeitsleistung abspielen, in feste Zahlen und Formeln zu fassen, die uns eine klare Vorstellung von den betreffenden Vorgängen geben könnten. Man hat deshalb bei der Beurteilung des folgenden stets im Auge zu behalten, daß es sich um Dauerleistungen und Mittelwerte handelt, von denen die lebendige Wirklichkeit oft genug erheblich abweichen wird.

Die *tägliche Arbeitsleistung* A eines Zugtieres ist ausgedrückt durch die folgende Formel $A = Z vt$ (6)

worin Z die Zugkraft, v die Ganggeschwindigkeit, t die tägliche Arbeitszeit bezeichnen. Alle diese drei Größen können zwar bei jedem einzelnen Tier recht verschiedene Werte annehmen, es gibt aber für jede Tiergattung doch bestimmte Normalwerte Z_0 , v_0 , t_0 dieser drei Größen, die der Natur der betreffenden Tiere am besten entsprechen und deshalb die tägliche Arbeitsleistung zu einem Größtwert A_0 machen, während jede Abweichung von diesen Werten die Arbeitsleistung herabdrückt. Die zweckmäßigste tägliche Arbeitszeit t_0 allerdings ergibt sich aus den natürlichen Verhältnissen des Wechsels zwischen Tag und Nacht und den notwendigen Ruhe- und Fütterungspausen für alle Tiergattungen etwa zu acht Stunden, wogegen die günstigsten Werte von Z_0 und v_0 je nach der Gattung verschieden sind und überdies auch innerhalb jeder Gattung nach der Beschaffenheit der Tiere schwanken. Die folgende Zusammenstellung gibt hierüber näheren Aufschluß und enthält zugleich Angaben über das Gewicht der Tiere, wie sie zu Rechnungen mit Gleichung (2) und (3) S. 13 notwendig sind.

Tafel 3.

Tierart	Gewicht G kg	Z_0 kg	v_0 m/Sek.
1. Pferde			
a) leicht	250	60	1,25
b) mittelstark	350	75	1,10
c) schwer	450	90	0,80
2. Ochsen	—	60	0,79
3. Esel	—	40	0,79
4. Maultiere	—	50	1,00

Die Normalzugkraft beträgt demnach bei Pferden etwa $\frac{1}{5}$ des Eigengewichts der Tiere. Für kürzere Zeit, etwa auf Weglängen bis zu 600 m, kann aus den Zugtieren das Doppelte der normalen Zugkraft ohne Schädigung herausgeholt werden. Für den kurzen

Augenblick des Anziehens stillstehender Fuhrwerke hat es sogar nichts auf sich, wenn die Zugkraft auf ein Mehrfaches der normalen gesteigert wird.

Es ist eine altbekannte Tatsache, daß die mannigfachen Bedürfnisse des Verkehrs von den Zugtieren vielfach Dauerleistungen unter wesentlich anderen als den ihnen besonders zusagenden Bedingungen verlangen. So ist bei den Personenfuhrwerken eine wesentlich höhere Geschwindigkeit als die normale bei geringerer Zugkraft oder Arbeitszeit oder etwa bei schweren Lastwagen eine geringere Geschwindigkeit bei erhöhter Zugkraft und dergl. geboten. Wie sich die Verhältnisse in solchen Fällen gestalten, darüber gibt die *Mascheksche Kraftformel* Aufschluß, in der die Buchstaben Z, v, t die von den normalen Werten Z_0, v_0, t_0 abweichenden Größen bezeichnen. Diese Formel lautet:

$$Z = Z_0 \left(3 - \frac{v}{v_0} - \frac{t}{t_0} \right) \quad (7)$$

Die Mascheksche Kraftformel ist so lange anwendbar, als die verlangten Leistungen nicht allzusehr von den normalen abweichen, was ja bei den Dauerleistungen des praktischen Lebens auch in der Regel der Fall ist. Für die Grenzwerte $v = 0$ und $t = 0$ oder $v = 2 v_0$ und $t = t_0$ oder $v = 3 v_0$ und $t = 0$ verlieren ihre Ergebnisse die Brauchbarkeit.

Die in Tafel 3 auf S. 16 für die Zugkraft Z_0 angegebenen Werte gelten nur für einzelne Zugtiere. Werden mehrere Zugtiere an ein Fuhrwerk zusammengespannt, so verringert sich wegen der Ungleichmäßigkeit des Zugs die Leistung jedes einzelnen Tieres etwa wie folgt:

	bei 2 Tieren auf	98 %
„ 4	„	80 %
„ 6	„	64 %

Von Interesse sind endlich noch Grenzwerte, zwischen denen sich die Geschwindigkeiten der Pferde im allgemeinen bewegen, sie betragen

im Schritt	0,4 — 1,6	m/Sek.
„ Trab	3 — 6	„
„ Galopp	7 — 12	„

In besonderen Fällen werden die oberen Grenzen noch erheblich überschritten.

b) *Maschinenkraft*. Durch Maschinenkraft bewegt werden vor allem die *eigentlichen Kraftwagen*, die bei ihrer großen Verbreitung auch für den Landstraßenbau von besonderer Bedeutung sind. Hierher gehören aber auch die *Straßenwalzen* (soweit sie nicht für Pferdezug eingerichtet sind) und die *Straßenlokomotiven*, von denen die ersteren, die in Abschnitt XI unter anderen Gesichtspunkten ihre Würdigung finden werden, als Verkehrsmittel nur ausnahmsweise, die letzteren nur für bestimmte Massenförderungen auf ver-

hältnismäßig kurze Strecken in Frage kommen. Die Betrachtung von Fahrzeugen, die an Bahngleise gebunden sind, fällt nicht in den Rahmen dieses Leitfadens. Wir können uns also hier, ohne daß etwas Wesentliches unberücksichtigt bliebe, auf die Besprechung der *eigentlichen Kraftwagen*, die in Personen- und Lastkraftwagen zerfallen, und auch hier wiederum auf das Allgemeinste beschränken. Die Erörterung von Einzelheiten ist Sache der Werke über Kraftwagenbau. Der Antrieb erfolgt in der Regel durch einen *Benzinmotor*, der auf die Hinterachse wirkt. Bei vereinzelt neueren Bauarten werden beide Achsen angetrieben. Der Vorgang besteht hierbei darin, daß ein vom Motor erzeugtes Drehmoment die Hinterachse samt den auf ihr festgekeilten Triebrädern in Drehung versetzt. Die von diesem Drehmoment herrührende Umfangskraft an den Triebrädern muß größer sein, als der nach Ziff. 1 Buchstabe a bis c S. 12—15 zu ermittelnde Gesamtwiderstand W des Wagens. Damit sich jedoch die Triebräder nicht unter dem stehenbleibenden Wagen drehen, sondern dessen Fortbewegung bewirken, muß die sogenannte Adhäsion, d. h. die gleichfalls am Umfang der Triebräder angreifende Gegenstützkraft der gleitenden Reibung größer sein, als die vom Drehmoment erzeugte Umfangskraft. Die Adhäsion entspricht bekanntlich dem Produkt aus dem Achsendruck (Reibungsgewicht) und der Reibungsziffer für die gleitende Reibung zwischen Radreifen und Fahrbahn. Bei Wagen mit Gummibereifung ist die Adhäsion in der Regel ohne weiteres mehr als genügend. Zur Erhöhung der Adhäsion bei glatter Fahrbahn, insbesondere also im Winter bei Eis und Schnee, dienen besondere Vorrichtungen, namentlich die sogenannten Gleitschutzdecken, die mit niedrigen flachköpfigen Stahlnieten besetzt sind. Eisenbereifte Triebräder werden zur Erzielung der erforderlichen Adhäsion, die namentlich im Winter bei Schnee- und Eisbahn ungenügend ist, häufig mit niederen Querrippen versehen (Riffelung), die aber auf die Fahrbahndecken leicht schädigend einwirken.

Die Stärke der Motoren kann sehr hohe Werte erreichen und schwankt zwischen weiten Grenzen, etwa von $8/20$ — $82/200$ PS. Die Lastkraftwagen können auch zum Ziehen anderer Wagen, der sogenannten Anhänger, eingerichtet und benützt werden. Der Geschwindigkeit sind bei den Kraftwagen durch die Rücksichten auf die Sicherheit des Betriebs und die Schonung der Straßenfahrbahn Schranken gezogen. Es ist nicht nur die Größe der Zugkraft und Geschwindigkeit, sondern auch der Wegfall der Ruhepausen, die bei gewöhnlichen Fuhrwerken zur Erholung der Zugtiere in bestimmten Zeitabständen eingeschaltet werden müssen, was den Kraftwagen ihre große Überlegenheit verleiht.