

Landtechnische Forschung

HERAUSGEBER: KURATORIUM FÜR TECHNIK IN DER LANDWIRTSCHAFT
LANDMASCHINEN- UND ACKERSCHLEPPER-VEREINIGUNG (LAV) IM VDMA
MAX EYTH-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER LANDTECHNIK (MEG)

Heft 3/1965

Fahr A. G., Göttingen

MÜNCHEN

15. JAHRGANG

Eing. 2. JULI 1965 J.G.F.

Erl.

Wolfgang Perret:

Lenkstabilität hinten gelenkter Fahrzeuge

Die vorliegende Arbeit stammt aus der Tätigkeit des Verfassers als Versuchsingenieur bei der Zahnradfabrik Friedrichshafen AG, Werk Schwäbisch Gmünd

1. Der Begriff Lenkstabilität

Das moderne Kraftfahrzeug hat sich zu einer gewissen Standardbauform entwickelt, innerhalb der allerdings genügend Variationsmöglichkeiten bestehen. Beim normalen Kraftfahrzeug kann beispielsweise die treibende Achse vorne oder hinten angeordnet sein, wobei es für beide Möglichkeiten praktisch befriedigende Lösungen gibt. Im Gegensatz zur Lage der Treibachse hat sich die Vorderachslenkung als Standardlösung eingeführt, während Hinterachslenkung auf ganz wenige Sonderfahrzeuge beschränkt bleibt. In der Literatur wird die Hinterachslenkung gelegentlich erwähnt und dabei deren Instabilität festgestellt [1...3].

Trotzdem wird man bei manchen Fahrzeugen Hinterachslenkung vorsehen, zum Beispiel bei Schaufelladern, weil deren Vorderachsendruck während der Arbeit sehr stark veränderlich ist. Eine selbstfahrende Arbeitsmaschine muß auf öffentlichen Straßen im normalen Verkehr ihren Einsatzort erreichen. Es ist dann zu fordern, daß auch das hinten gelenkte Sonderfahrzeug stabil zu lenken ist. Untersuchungen über die Fahrtrichtungsstabilität eines Kraftfahrzeuges gibt es in größerer Anzahl. Ihnen liegt meist die Überlegung zugrunde, daß ein Kraftfahrzeug bei in der Geradeausfahrtstellung unbeweglich festgehaltenem Lenkrad seine Fahrtrichtung trotz vorhandener Störeinflüsse selbsttätig weitgehend aufrechterhalten soll, damit der Fahrer möglichst selten korrigierend eingreifen muß.

Der Begriff Lenkstabilität soll in diesem Zusammenhang die Lenkeigentümlichkeiten zusammenfassen, die ein Fahrzeug dann zeigt, wenn sein Lenkrad nicht unbeweglich festgehalten wird, sondern sich in den Händen eines Fahrers befindet, der auf Veränderungen der Fahrtrichtung, auf Kraftwirkungen am Lenkrad und auf Lenkradbewegungen im Rahmen seiner physischen Möglichkeiten reagiert. Bei experimentellen Fahrzeuguntersuchungen zeigt sich nun, daß ein Fahrzeug wohl eine befriedigende Fahrtrichtungsstabilität haben kann und trotzdem keine ausreichende Lenkstabilität zeigt.

Infolge ungewöhnlicher Kraftwirkungen am Lenkrad kann ein Fahrzeug es dem Fahrer unmöglich machen, die zur Aufrechterhaltung der Fahrtrichtung erforderlichen Korrekturbewegungen am Lenkrad zu schätzen und zu dosieren. Der Fahrer eines derartigen Fahrzeuges gewinnt den Eindruck einer völlig unbefriedigenden Geradeausfahrtstabilität, obwohl dieser Mangel erst durch das Zusammenwirken von Fahrzeugeigentümlichkeiten und Fahrerverhalten erzeugt wird. Experimentelle Untersuchungen, die im folgenden noch beschrieben werden, geben den Anlaß, den Begriff Lenkstabilität auch allein vom Fahrzeug her zu definieren.

Als lenkstabil soll ein Fahrzeug bezeichnet werden, dessen Lenksystem nach einer Kurvenfahrt auf ebener störungsfreier Fahrbahn

bei losgelassenem Lenkrad selbsttätig ganz oder nahezu wieder in die Geradeausfahrtstellung zurückläuft. Dieses Verhalten zeigt heutzutage jedes Normalfahrzeug, wenn es einwandfrei in Ordnung ist. Im Gegensatz dazu steht ein Fahrzeug, das unter den gleichen Umständen seinen Lenkeinschlag nach einer Kurvenfahrt selbsttätig bis zum Volleinschlag vergrößert. Dieses Lenkverhalten soll als instabil bezeichnet werden. Auch diese Erscheinung zeigt nahezu jedes Normalfahrzeug, und zwar bei Rückwärtsfahrt. Daß das dem Fahrer kaum auffällt, liegt an der niedrigen Geschwindigkeit und an der kurzen Dauer der meisten Rückwärtsfahrten. Ein rückwärts fahrendes Normalfahrzeug ist ein hinten gelenktes Fahrzeug und zeigt instabiles Lenkverhalten.

2. Die Anteile des Lenkmomentes

Wenn sich nach einer Kurvenfahrt das losgelassene Lenkrad eines Fahrzeuges mit dem ganzen Lenksystem in Bewegung setzt, dann müssen Momente auftreten, die das bewirken. Deren Größe kann man zum Beispiel als Umfangskraft am Lenkrad oder auch als Summe der Lenkmomente an den Achsschenkeln bestimmen.

Versuche, dieses Lenkmoment zu berechnen [4], zeigen, daß das, was der Fahrer am Lenkradumfang als Kraftwirkung spürt, sich aus verschiedenen Anteilen zusammensetzt:

- Bei den meisten Radaufhängungen muß das auf der Lenkachse ruhende Fahrzeuggewicht beim Lenkeinschlag der Räder angehoben werden. Das daraus resultierende Lenkmoment wirkt rückdrehend in die Geradeausfahrtstellung unabhängig davon, ob das Fahrzeug vorne oder hinten gelenkt ist.
- Bei Kurvenfahrt treten in den Reifenauftandsflächen fliehkräftebedingte Seitenführungskräfte auf, welche an der Lenkachse an dem Hebelarm, der durch den geometrischen Nachlauf gegeben ist, Momente erzeugen, die ins Lenksystem eingeleitet werden. Die Größe der Seitenführungskräfte ist ge-

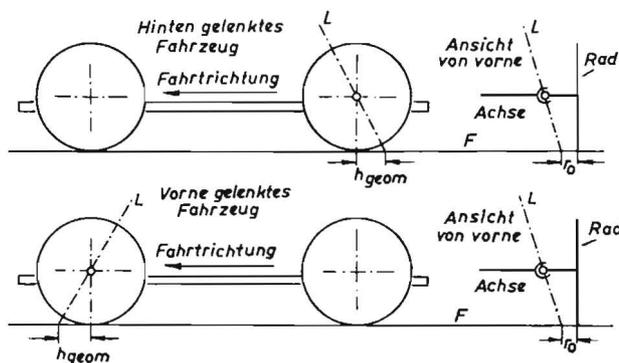


Bild 1: Darstellung von geometrischem Nachlauf und Lenkrollhalbmesser bei einem vorne und einem hinten gelenkten Fahrzeug

F = Fahrbahnebene L = Lenkzapfenachse r_n = Lenkrollhalbmesser
 h_{geom} = geometrischer Nachlauf, Nachlaufhebelarm

geben durch den Krümmungsradius der Bahnkurve und die Fahrgeschwindigkeit. Ihre Richtung ist immer die nach der kurveninneren Seite zum Krümmungsmittelpunkt. Bei entsprechendem Nachlauf wirken die erzeugten Momente deswegen bei Vorderachs- und bei Hinterachslenkung rückdrehend in die Geradeausfahrtstellung, also stabilisierend (Bild 1).

- c) Wenn ein luftbereiftes Rad Seitenführungskräfte auf die Fahrbahn übertragen muß, dann stellt sich gemäß den Reifenkennlinien ein Schräglaufwinkel ein; das Rad bewegt sich also nicht mehr in Richtung seiner Radmittelebene, sondern um einen gewissen Winkelbetrag schräg dazu. Für einen bestimmten Reifen besteht zwischen dem Schräglaufwinkel und der sich einstellenden Seitenführungskraft abhängig von der Radlast ein definierter Zusammenhang. Ein unter einem Schräglaufwinkel abrollendes Rad überträgt aber nicht nur eine Seitenführungskraft, sondern erfährt wegen der ungleichmäßigen Kraftverteilung in der Reifenaufstandsfläche auch ein Moment, welches so gerichtet ist, daß es den Schräglaufwinkel verkleinern will. Man nennt es das Rückstellmoment. In Bild 2 sind die Richtungen der Rückstellmomente bei Vorderachs- und bei Hinterachslenkung dargestellt.

Die Bilder 2a und 2b zeigen die beim Fahren einer Rechtskurve auftretenden Schräglaufwinkel für Vorderachslenkung und für Hinterachslenkung. Weil das Rückstellmoment immer so gerichtet ist, daß es den Schräglaufwinkel verkleinern möchte, wirkt es bei Vorderachslenkung geradeaus-drehend, also stabilisierend. Bei Hinterachslenkung wirkt es aus dem gleichen Grund vergrößend auf den Radeinschlagwinkel.

Wenn die unter a und b genannten Anteile des Lenkmomentes kleiner sind als das Rückstellmoment der Reifen, dann zeigt das hinten gelenkte Fahrzeug nach einer Kurvenfahrt die Tendenz den Einschlagwinkel des Lenksystems selbsttätig zu vergrößern, es verhält sich also instabil.

- d) Bei schnellen, vom Fahrer eingeleiteten Lenkbewegungen muß dem Fahrzeug eine Drehbeschleunigung um seine vertikale Schwerpunktsachse erteilt werden. Diese kann nur durch an den Reifenaufstandsflächen angreifende Seitenführungskräfte entstehen.

Bei Vorderachslenkung wirkt die zum Einleiten einer Kurvenfahrt an den Vorderrädern erforderliche Seitenführungskraft, die dem Fahrzeug eine Drehbeschleunigung erteilt, nach der kurveninneren Seite. Sie hat also die gleiche Richtung, wie die bei der folgenden Kurvenfahrt auftretende Zentripetalkraft. Bei Hinterachslenkung dagegen wirkt beim schnellen Lenkeinschlag die Beschleunigungskraft an der Lenkachse zunächst nach der kurvenäußeren Seite. Erst wenn das Fahrzeug einen gewissen Kurvenradius fährt und entsprechende Zentripetalkräfte wirksam werden, kehrt sich die Richtung der an der gelenkten Hinterachse angreifenden Seitenführungskraft nach der kurveninneren Seite um.

Dieser Wechsel der Richtung der Seitenführungskraft, der nur bei Hinterachslenkung in der hier beschriebenen Weise auftritt, wird unter Umständen dem Fahrer am Lenkrad als Kraftwirkung wechselnder Richtung fühlbar und verstärkt in diesem den Eindruck des nicht abschätzbaren instabilen Fahrzeugverhaltens.

- e) Diesen zahlenmäßig wenigstens näherungsweise berechenbaren Anteilen des Lenkmomentes überlagert sich bei allen Lenksystemen ein reibungsbedingtes Lenkmoment. Diese Reibung muß der Fahrer bei allen von ihm eingeleiteten Lenkbewegungen mit überwinden. Fahrzeugbedingte Eigenbewegungen des Lenkrades, wie nach einer Kurvenfahrt, werden durch die Reibung gehemmt, oder auch völlig unterdrückt. Bei sehr großer Reibung macht das Lenkrad keine Eigenbewegungen mehr, sondern bleibt in jeder einmal vorhandenen Einschlagstellung stehen. Dieses Lenkverhalten soll als indifferent bezeichnet werden.

Die Größe der Reibung ist selbst für ein bestimmtes Einzelfahrzeug kein konstanter Wert, sondern abhängig von Wartung, Verschleiß, Schmierung, Temperatur usw. verschieden. In experimentellen Untersuchungen zeigt sich, daß das Reibungsmoment beim Einschlagen der Räder ebensogroß oder sogar größer sein kann als die Anteile a bis d zusammen.

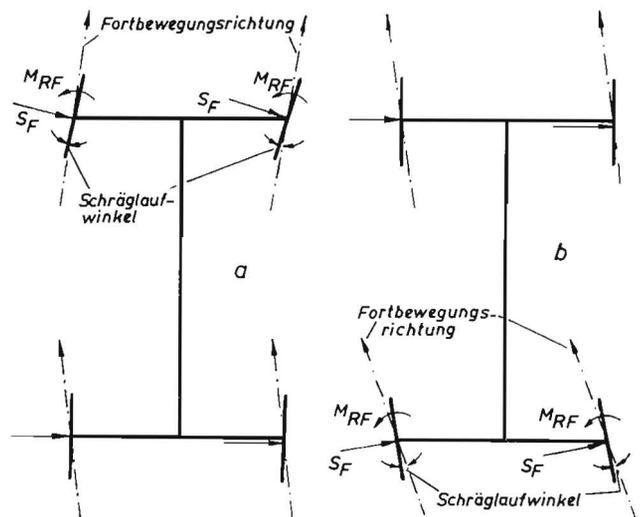


Bild 2: Richtungen der Rückstellmomente bei Vorderachs- und bei Hinterachslenkung

Bild 2a (links): Vorne gelenktes Fahrzeug beim Fahren einer Rechtskurve. Das Rückstellmoment M_{RF} wirkt rückdrehend in die Geradeausfahrt.
Bild 2b (rechts): Hinten gelenktes Fahrzeug beim Fahren einer Rechtskurve. Das Rückstellmoment M_{RF} wirkt einschlagvergrößernd.

Deswegen ist eine zuverlässige rechnerische Bestimmung des gesamten Lenkmomentes, das der Fahrer am Lenkrad aufzubringen hat, beziehungsweise dort spürt, nicht möglich.

3. Stabilität und Instabilität

Während also außer der grundsätzlich immer bewegungshemmenden Reibung bei Vorderachslenkung sämtliche Anteile des Lenkmomentes rückdrehend in die Geradeausfahrt, also stabilisierend wirken, trifft das bei Hinterachslenkung nur für einen Teil davon zu. Vor allem wirkt das Rückstellmoment der Reifen bei Hinterachslenkung einschlagvergrößernd und ist deswegen die Ursache des bei hinten gelenkten Fahrzeugen häufig auftretenden instabilen Lenkverhaltens bei Kurvenfahrt. Da hinten gelenkte Fahrzeuge meist Arbeitsmaschinen sind, stattet man sie mit Rücksicht auf ihren Einsatz im Gelände häufig mit sehr breiten Niederdruckreifen aus. Diese zeigen bei Straßenfahrt sehr große Rückstellmomente, was dann zu stark ausgeprägter Instabilität führt. Ein instabiles Lenkverhalten ist selbst bei niedrigen Lenkdrücken für den Fahrer eines derartigen Fahrzeuges unangenehmer und gefährlicher, als es auf den ersten Blick erscheinen möchte. Da niemand eine hinten gelenkte Arbeitsmaschine mit instabilem Lenkverhalten dauernd fährt, ist bei jedem Umsteigen vom Normalfahrzeug auf die Arbeitsmaschine und umgekehrt ein Ungewöhnen erforderlich, das den Fahrer unnötig beansprucht und auch im Normalfahrzeug auf der Rückfahrt von der Arbeitsstätte eine latente Unfallgefahr erzeugen kann.

Außerdem ist das Fahren eines Fahrzeuges mit instabilem Lenkverhalten auf der Straße für den Fahrer nervlich sehr anstrengend, weil es auch für einen geübten Fahrer fast unmöglich ist, geradeaus zu fahren. Wie bereits erwähnt, zieht ein instabiles Fahrzeug selbsttätig in die Kurve hinein, will also seinen Lenkeinschlag vergrößern. Selbsttätiger Rücklauf ist nicht vorhanden. Das Lenkrad muß vom Fahrer nach jeder Kurvenfahrt gegen den Widerstand des Fahrzeuges in die Geradeausfahrtstellung zurückgeholt werden. Eine notwendige kleine Korrekturbewegung im Geradeausfahrtbereich findet keinen Widerstand, sondern das Fahrzeug zieht in Richtung dieser Bewegung. Diese gerät dem Fahrer deswegen zu groß und erfordert sofortige Gegenkorrektur, bei der das gleiche geschieht. Bei Geschwindigkeiten von etwa 20 bis 30 km/h bewirken die dauernd zu groß geratenden Korrekturen, daß auch ein geübter Fahrer auf gerader, störungsfreier Straße eine mehr oder weniger ausgeprägte Wellenlinie fährt. Geschwindigkeiten in der Größenordnung von 40 km/h sind nur mit äußerster Konzentration überhaupt zu fahren und dann noch sehr gefährlich.

4. Das gemessene Lenkkraftdiagramm

Wegen der rechnerisch nicht erfaßbaren Reibung läßt sich die Lenkkraft, die der Fahrer am Lenkrad spürt, beziehungsweise dort

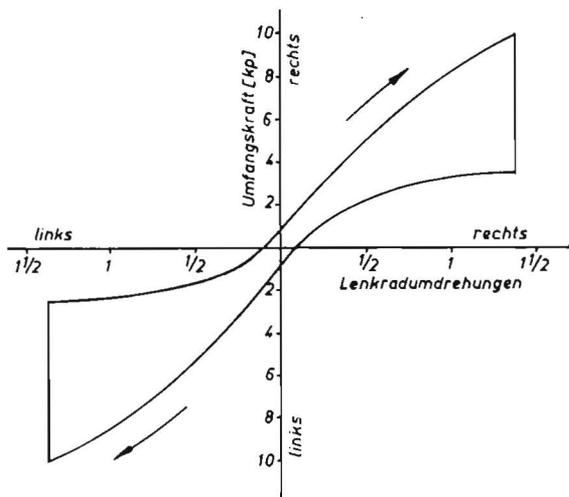


Bild 3: Lenkkraftdiagramm eines 1,5 l PKW bei 10 km/h

Gesamtgewicht	≈ 1000 kp	Lenkachslast	≈ 500 kp
Reifen 5,90 × 15"	1,4 atü	Lenkraddurchmesser	≈ 430 mm
Spurkreisdurchmesser	≈ 12 m	Spurweite vorne	1380 mm
Radstand	≈ 2500 mm		

aufbringen muß, nicht berechnen. Lediglich die Tendenz des Lenkverhaltens zur Stabilität oder zur Instabilität ist näherungsweise berechenbar. Dazu sind allerdings außer den Fahrzeugdaten die Reifenkennlinien erforderlich, die für die großen Geländereifen, mit denen gerade hinten gelenkte Arbeitsmaschinen häufig ausgerüstet werden, meist nicht bekannt sind.

Deswegen ist die experimentelle Bestimmung der Umfangskräfte am Lenkrad oder der Summe der Lenkmomente an den Achschenkeln meist vorzuziehen.

Mit einem als Drehmomentmeßgerät ausgebildeten Speziallenkrad läßt sich die Umfangskraft am Lenkrad abhängig vom Drehwinkel am Lenkrad während der Fahrt messen. Mit einer geeigneten Meßanlage kann man auch das Drehmoment an den Achschenkeln abhängig vom Radeinschlagwinkel messen.

Lenkkraftmessungen werden üblicherweise bei langsamer Fahrt (10–15 km/h) und niedriger Drehgeschwindigkeit am Lenkrad (0,4–0,8 U/s) durchgeführt. Die Darstellung der Meßwerte erfolgt in einem Diagramm, das vollständig aufgenommen und gezeichnet wegen der Reibung das Bild einer Hystereseschleife zeigt. Während der Meßfahrt auf einem ebenen trockenen Platz wird der Fahrer von der Geradeausfahrtstellung aus das Lenkrad zunächst langsam und stetig bis in den rechten oder linken Endeinschlag drehen und dann in gleicher Weise in die Geradeausfahrtstellung zurück lenken. Von dort lenkt er ebenso in den anderen Endeinschlag und zurück. Eine mechanisch oder elektrisch arbeitende Meßanlage schreibt während dieser Meßfahrt die interessierenden Größen. In Bild 3 und in allen folgenden Lenkkraftdiagrammen ist die Lenkkraft positiv aufgetragen, die der Fahrer aufbringen muß, wenn er das Lenkrad gegen den Widerstand des Fahrzeuges nach rechts drehen will. Sinngemäß ist der Drehwinkel am Lenkrad von der Geradeausfahrt nach rechts ebenfalls positiv. Ein Einschlagwinkel nach links und eine nach links gerichtete Umfangskraft am Lenkrad wird entsprechend negativ aufgetragen¹⁾.

Bild 3 zeigt ein stabiles Lenkkraftdiagramm. Um einen Rechts-einschlag zu erzeugen, muß der Fahrer eine nach rechts gerichtete Umfangskraft aufbringen. Wenn der Fahrer nach einer Kurvenfahrt das Lenkrad losläßt, dann setzt es sich selbsttätig in Richtung auf die Geradeausfahrt in Bewegung. Dieses Lenkkraftdiagramm gehört zu einem schnellen und sportlichen Fahrzeug, dessen Lenkeigenschaften voll befriedigten.

Das Lenkkraftdiagramm nach Bild 4 hat prinzipiell den gleichen Kurvenverlauf. Natürlich sind bei dem erheblich schwereren Fahrzeug die Lenkradkräfte viel größer. Auch in diesem Fahrzeug fühlte sich der Fahrer sicher, das Lenkverhalten wurde als gut beurteilt.

¹⁾ Sämtliche Messungen wurden in der Versuchsabteilung der Zahnradfabrik Friedrichshafen AG, Werk Schwäbisch Gmünd, durchgeführt

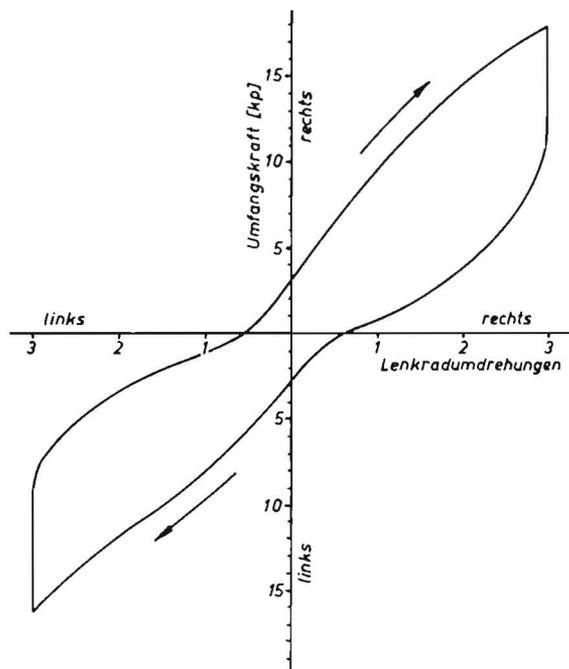


Bild 4: Lenkkraftdiagramm eines LKW mit 10000 kp Gesamtgewicht bei 10 km/h

Lenkachslast	≈ 3400 kp	Reifen 8,25 × 20"	5,25 atü
Lenkraddurchmesser	500 mm	Radstand	4200 mm
Spurweite vorne	1900 mm	Spurkreisdurchmesser	≈ 14,5 m

Der etwas leichtere LKW nach Bild 5 hat einen ungünstigeren Lenkkraftverlauf. Die Reibung, welche sich in der Breite der Hystereseschleife ausdrückt, ist erheblich größer als in Bild 4. Der Fahrer muß entsprechend höhere Kräfte im Geradeausfahrtbereich aufbringen, der Rücklauf reicht von rechts und von links nur bis etwa 1/4 Lenkradumdrehungen. In diesem Fahrzeug kann der Fahrer wegen der Reibung nicht deutlich fühlen, was an den gelenkten Rädern vorgeht. Für ein schnelles Straßenfahrzeug ist dieser Lenkkraftverlauf unbefriedigend. Eine Verringerung der Reibung ist sehr wünschenswert. In vielen Fällen kann dazu bereits regelmäßiges gutes Schmieren von Vorderachse und Lenksystem genügen. Es ist möglich, daß mangelhafte Wartung des Fahrzeuges die Form des Lenkkraftdiagramms stark verschlechtert, auch wenn die Konstruktion des Lenksystems günstig ist. Noch größere Reibung zeigt das Lenkkraftdiagramm nach Bild 6. In jeder einmal vorhandenen Einschlagstellung wird das Lenkrad durch die Reibung festgehalten. Die Umfangskräfte am Lenkrad sind unzumutbar hoch, selbsttätiger Rücklauf ist nicht vorhanden. Um nur aus der Geradeausfahrt herauszulenken, muß der Fahrer bereits 10 kp Umfangskraft aufbringen. Das entspricht etwa der

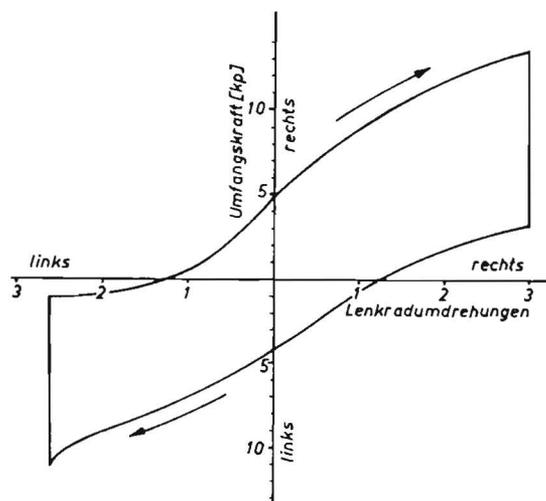


Bild 5: Lenkkraftdiagramm eines LKW mit 7800 kp Gesamtgewicht bei 10 km/h

Lenkachslast	≈ 2400 kp	Reifen 7,50 × 20"	4,5 atü
Lenkraddurchmesser	500 mm	Radstand	4800 mm
Spurweite vorne	1800 mm	Spurkreisdurchmesser	≈ 16 m

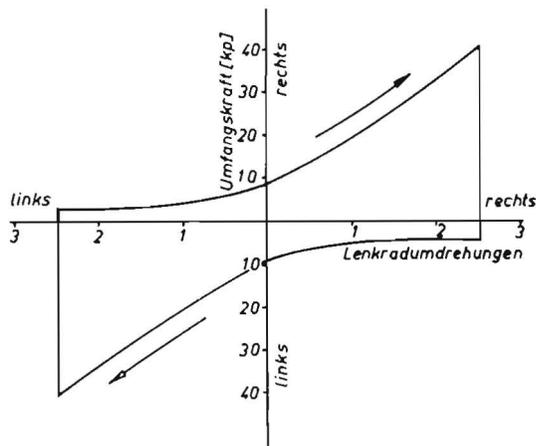


Bild 6: Lenkkräftediagramm eines LKW mit 15000 kp Gesamtgewicht bei 10 km/h

Lenkachlast	≈ 5000 kp	Reifen 11,00 × 20"	6,75 atü
Lenkraddurchmesser	550 mm	Radstand	5200 mm
Spurweite vorne	2000 mm	Spurkreisdurchmesser	≈ 20 m

bei einem Durchschnitts-PKW zum Fahren der vollen Kurve erforderlichen Höchstkraft. Es handelt sich in diesem Beispiel um ein veraltetes Fahrzeug, das nach heutigen Begriffen wegen dieses Lenkkräftediagramms als verkehrsunsicher gelten muß. Die Tendenz des Lenkkräftediagramms zeigt deutlich Stabilität, wenn auch das Diagramm selbst wegen der großen Reibung als indifferent bezeichnet werden muß.

Im Gegensatz zu den bisherigen Diagrammen zeigt Bild 7 einen grundsätzlich anderen Lenkkräfteverlauf. Die Umfangskräfte am Lenkrad fallen mit wachsendem Lenkeinschlag. Bei etwa 0,6 Lenkradumdrehungen nach rechts oder links beträgt die Lenkkräft null. Bei größerem Lenkeinschlag zieht dieses Fahrzeug von selbst in die Kurve hinein, zeigt also deutliche Instabilität. Selbsttätiger Rücklauf ist nicht vorhanden. Das Lenkrad muß gegen den Widerstand des Fahrzeuges vom Fahrer in die Geradeausfahrstellung zurückgeholt werden. Diese Rückdrehkräfte sind deutlich höher als die Einlenkkräfte. Wegen der eingebauten Servolenkung liegen die Maximalkräfte am Lenkrad bei etwa 3 kp. Das ist erheblich weniger als im modernen PKW ohne Hilfskraftlenkung, wo Maximalkräfte von rund 12 kp oft vorkommen. Trotz des niedrigen Kraftniveaus empfindet der Fahrer diese Form des Kraftverlaufs als äußerst unangenehm. Kleine Korrekturlenkbewegungen finden einen abnehmenden oder keinen Widerstand. Bei größeren Lenkeinschlägen will das Fahrzeug selbsttätig seinen Radeinschlagwinkel vergrößern. Der Fahrer hat nicht den gewohnten gefühlsmäßigen Kontakt mit Fahrzeug und Fahrvorgang. Es ist nur bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten möglich, dieses Fahrzeug geradeaus zu fahren. Geschwindigkeiten auf der Straße von 30 bis 40 km/h sind vom Fahrer nur noch mit Mühe lenkungsmaßig zu beherrschen.

5. Die günstige Form des Lenkkräftediagramms

Aus diesen und vielen anderen Messungen und Fahrversuchen ergaben sich bestimmte Forderungen für den Verlauf der Lenkkräfte, der ein sicheres und leichtes Lenken eines Kraftfahrzeuges ermöglicht. Natürlich muß man dabei die Fahrzeugart, sein Einsatzgebiet und seine Höchstgeschwindigkeit berücksichtigen. Im schnellfahrenden Personen- und Lastkraftwagen ist ein Lenkkräfteverlauf gemäß Bild 3 und 4 wünschenswert. Je kleiner die Reibung im Geradeausfahrtbereich ist, desto feinfühlicher läßt sich das Fahrzeug auf gerader Strecke lenken und desto sauberer zentriert sich das Fahrzeug selbst. Mit abnehmender Reibung wird ein Lenksystem aber auch stoßempfindlicher, deswegen kann bei zu geringer Reibung auf welliger Fahrbahn störende Lenkradunruhe auftreten. Nach einer Kurvenfahrt soll das Lenksystem möglichst bis in die Nähe der Geradeausfahrstellung selbsttätig zurücklaufen. Durch die am Lenkradumfang auftretenden Höchstkräfte soll der Fahrer nicht angestrengt werden; die Kräfte sollten aber so hoch sein, daß ein gutes Lenkgefühl gewährleistet ist. Normal ist heute im europäischen PKW eine Höchstkraft von 5 bis 15 kp am Lenkradumfang. In Lastkraftwagen kommen auch die doppelten Kräfte vor. Allerdings sind gerade im Nutzfahrzeugbau diese

Werte wegen der immer häufiger verwandten Hilfskraftlenkungen dauernd im Fluß. Und wenn man schon die Kosten für eine Servolenkung aufwendet, dann kann man auch die Kräfte so niedrig bemessen, wie sich gerade mit Rücksicht auf ein angemessenes Lenkgefühl des Fahrers noch vertreten läßt. Eine gute Hilfskraftlenkung sollte beispielsweise das Lenkkräftediagramm des LKW nach Bild 4 ähnlich verkleinern, ohne den prinzipiellen günstigen Lenkkräfteverlauf zu verändern. Vor allem muß die Breite der Hystereseschleife mit verkleinert werden, sonst leidet das Lenkgefühl. Wie niedrig man die maximale Lenkkräft dann wählen kann, hängt von der Eingewöhnungszeit ab, die man dem Fahrer zubilligt. Natürlich gibt es dabei individuelle Unterschiede, doch dürfte sich wahrscheinlich jeder nach einiger Zeit auch an maximale Umfangskräfte von nur 3 bis 5 kp gewöhnen können.

Für den Lenkkräfteverlauf bei einer Arbeitsmaschine sind grundsätzlich andere Überlegungen maßgebend. Den weitaus größten Teil der Betriebszeit fährt eine Arbeitsmaschine im Einsatz im Gelände. Bei bestimmten Maschinentypen, wie beispielsweise Schaufelladern, muß dabei sehr häufig gewendet werden oder sind Kurven des engstmöglichen Radius zu fahren. Eine maximale Lenkkräft, wie sie im Personenwagen vorkommt, kann man für derartigen Einsatz schon als hoch bezeichnen. Da man in schweren Arbeitsmaschinen auf jeden Fall eine Hilfskraftlenkung vorsehen muß, sollte diese so ausgelegt sein, daß die noch vom Fahrer aufzubringenden Kräfte keine Anstrengung mehr bedeuten. Schon das Manövrieren mit einem normalen Mittelklasse-PKW kann anstrengend sein, deswegen wird man die maximalen Lenkradkräfte in einer Arbeitsmaschine dieser Art möglichst noch niedriger legen. Eine Lenkradkräft von etwa 3 kp, wie die Arbeitsmaschine nach Bild 7 zeigt, ist für den Fahrer zumutbar, auch wenn er häufig wenden muß.

Nun müssen selbstfahrende Arbeitsmaschinen auf öffentlichen Straßen im normalen Verkehr mit angemessener Geschwindigkeit ihren Einsatzort erreichen und verlassen können. Dazu ist unbedingt erforderlich, daß die Arbeitsmaschine bei Straßenfahrt zu lenken ist und an den Fahrer keine ungewöhnlichen Anforderungen stellt.

In einer vorne gelenkten Arbeitsmaschine wird ohne Schwierigkeiten ein stabiler Lenkkräftverlauf zu erreichen sein, der dem anderer vorne gelenkter Fahrzeuge entspricht. Bei Hinterachslenkung kann ein Lenkkräftediagramm wie in Bild 7 vorkommen, was bei Straßenfahrt die erwähnten Lenkschwierigkeiten ergibt. Man muß nun an eine Arbeitsmaschine nicht die Anforderungen stellen, die bei einem schnellfahrenden Straßenfahrzeug selbstverständlich sind. In Experimenten zeigte sich, daß zum sicheren Lenken auf der Straße bei etwa 40 km/h in einem derartigen Fahrzeug selbsttätiger Rücklauf des Lenksystems in die Geradeausfahrt nicht unbedingt erforderlich ist. Schon ein indifferentes Lenkverhalten etwa gemäß den in Bild 8 dargestellten Kurven reicht für sichere Straßenfahrt unter 40 km/h aus. Die Höchstgeschwindigkeit der Maschine soll nicht durch ein Verbot begrenzt, sondern durch die Bauart gegeben sein. Gegen ein stabiles Lenkkräftediagramm mit selbsttätigem Rücklauf ist natürlich nichts einzuwenden, wenn keine störenden Nebeneffekte auftreten.

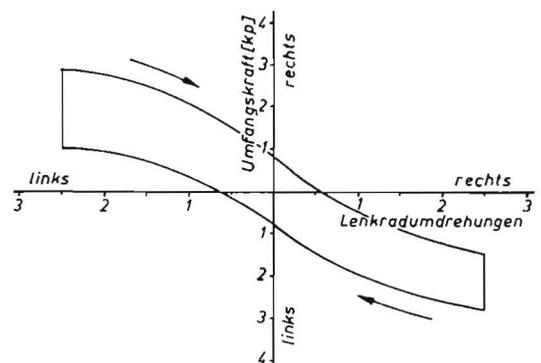


Bild 7: Lenkkräftediagramm einer hinten gelenkten Arbeitsmaschine bei 5 km/h

Gesamtgewicht	10000 kp	Lenkachlast	4350 kp
Reifen 19,5 × 24"	1,5 atü	Radstand	2000 mm
Spurweite	1900 mm	Spurkreisdurchmesser	10 m
Lenkraddurchmesser	500 mm		

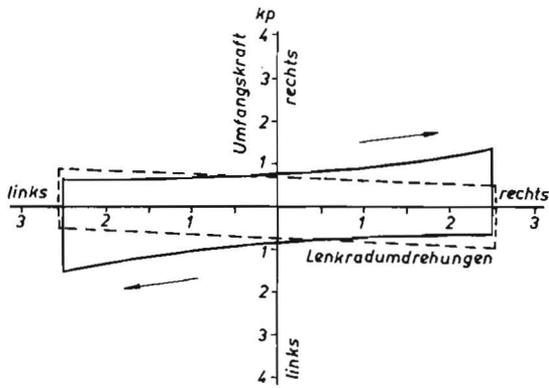


Bild 8: Zwei indifferente Lenkkraftdiagramme, mit denen sich die Arbeitsmaschine gemäß Bild 7 bei Straßenfahrt befriedigend lenken läßt

6. Das Lenkverhalten des hinten gelenkten Fahrzeuges

In der Praxis steht man nun vor der Aufgabe, eine hinten gelenkte Arbeitsmaschine, die vielleicht starke Instabilität zeigt, mit einem wenigstens indifferenten oder sogar stabilen Lenkkraftverlauf zu versehen.

Wie schon anfangs erwähnt, wird der instabile Verlauf durch das Rückstellmoment der Reifen erzeugt, wenn dieses größer ist als die stabilisierenden Anteile des Lenkmomentes. Wenn die großen Reifen mit Rücksicht auf den Einsatz im Gelände erforderlich sind, dann kann man dieses Rückstellmoment nicht verkleinern. Man muß also die anderen stabilisierenden Anteile des Lenkmomentes vergrößern oder künstlich eine neue stabilisierende Kraft einführen.

Stabilisierend wirkt zum Beispiel das durch die Hubarbeit erzeugte Lenkmoment. Wenn man einen großen Spreizungswinkel und gleichzeitig großen Lenkrollhalbmesser wählt, dann wird auch die beim Einschlag der gelenkten Räder zu leistende Hubarbeit groß, wodurch ein zusätzliches stabilisierendes Moment entsteht. Die praktisch möglichen Höchstwerte für Spreizung und Lenkrollhalbmesser liegen jedoch relativ niedrig, so daß die Hubarbeit allein nicht ausreicht, das Rückstellmoment zu kompensieren. Außerdem ist der Lenkrollhalbmesser der Hebelarm, an welchem Stöße, die von der Fahrbahn her das Rad treffen, Momente in das Lenksystem einleiten. Deswegen hat man ein gewisses Interesse daran, den Lenkrollhalbmesser nicht übertrieben groß zu machen. Eine Vergrößerung der Spreizung erfordert bei den verwendeten Starrachsen eine völlige Neukonstruktion. Für experimentelle Variationen ist deshalb die Spreizung wenig geeignet.

Stabilisierend wirkt auch die vorne unter b genannte, am Nachlaufhebelarm angreifende Seitenführungskraft. Über die Reifenkennlinien sind Rückstellmoment und Seitenführungskraft für einen bestimmten Reifen bei festliegender Radlast einander eindeutig zugeordnet. Die einzige Variationsmöglichkeit besteht in der Wahl der Größe des Nachlaufs. Dieser läßt sich aber in einer Starrachse normalerweise verhältnismäßig einfach verändern. Wenn man den Nachlauf nur groß genug wählt, dann kann das Moment der am Nachlaufhebelarm angreifenden Seitenführungskraft so groß werden, wie das Rückstellmoment der Reifen und dieses kompensieren.

Es hängen aber Rückstellmoment und Seitenführungskraft in verschiedener Weise von der Größe des Schräglaufwinkels ab, so daß eine völlige Kompensation für alle Schräglaufwinkel nicht möglich ist. Für den Bereich kleiner Schräglaufwinkel, der für die normalen Fahrzustände einer Arbeitsmaschine allein in Frage kommt, gelingt diese jedoch mit praktisch befriedigender Genauigkeit. Um den erforderlichen Betrag des Nachlaufs zu finden, wird man stufenweise den Nachlaufwinkel vergrößern und jeweils das Lenkkraftdiagramm aufnehmen, bis man den Wert gefunden hat, bei dem sich ein indifferenter Lenkkraftverlauf ergibt. Man könnte auf den Gedanken kommen, den Nachlaufhebelarm noch weiter zu vergrößern, bis das Moment der Seitenführungskraft das Rückstellmoment überwiegt und dadurch einen stabilen Lenkkraftverlauf erzeugt. Abgesehen von den Schwierigkeiten, die ein so großer Nachlaufbetrag konstruktiv bereitet, tritt ein störender Nebeneffekt auf, der diese Auslegung unmöglich macht.

Wenn man den Nachlaufhebelarm so groß wählt, dann kann der Fahrer die an den gelenkten Rädern auftretenden Seitenführungskräfte am Lenkrad fühlen. Eine nach der kurveninneren Seite wirkende, fliehkraftbedingte Seitenführungskraft wird ein in die Geradeausfahrt rückstellendes, stabilisierendes Lenkmoment erzeugen. Die unter d eingangs erwähnte Seitenführungskraft, welche durch die Drehbeschleunigung des Fahrzeuges um die Hochachse entsteht, wirkt nun bei Hinterachslenkung nach der kurvenäußeren Seite. Während einer Kurvenfahrt wird diese durch die fliehkraftbedingte Seitenführungskraft überdeckt und dem Fahrer am Lenkrad nicht fühlbar. Im Geradeausfahrtbereich dagegen spürt der Fahrer die aus der Drehbeschleunigung entstehende Seitenführungskraft als in Bewegungsrichtung ziehende Umfangskraft am Lenkrad. Das Fahrzeug verhält sich also im Geradeausfahrtbereich wieder instabil. Deswegen wird man den Nachlaufhebelarm nur so groß wählen, daß das Rückstellmoment gerade kompensiert wird. Wenn die Reifenkennlinien bekannt sind, dann ist dieser Betrag berechenbar. Anderenfalls muß man den Nachlauf experimentell bestimmen. Durch geeignete Wahl des Nachlaufs ist also bei Hinterachslenkung bestenfalls ein indifferentes Lenkkraftdiagramm zu erreichen. Ein stabiles Lenkkraftdiagramm kann man erzwingen, wenn man zusätzlich die durch die Hubarbeit entstehende Lenkradkraft groß genug macht.

Wenn das hinten gelenkte Fahrzeug mit einer Servolenkung ausgerüstet ist, dann besteht grundsätzlich noch eine andersgeartete Möglichkeit. Bei einer normalen Servolenkung wird die Lenkkraft durch die Handkraft des Fahrers und die Servokraft gemeinsam aufgebracht. Häufig sind die Lenkungen so ausgelegt, daß der Fahrer einen bestimmten Anteil der Lenkkraft, beispielsweise 10%, selbst aufbringt. Dadurch wird das Lenkgefühl ermöglicht. Wenn man diesen Anteil sehr klein macht, dann spürt der Fahrer am Lenkrad nur noch die Reibung der Lenkspindellagerung und der mit dem Lenkrad von ihm bewegten Lenkungsteile. Die an der Achse auftretenden Momente werden vollkommen von der Servokraft, zum Beispiel von der Lenkhydraulik, aufgenommen. Es ist dadurch möglich, ohne irgendwelche konstruktive Maßnahmen an der Lenkachse ein indifferentes Lenkkraftdiagramm zu erzwingen (vgl. Bild 8).

Sehr nahe liegt nun der Gedanke, das sehr leichtgängige Lenkrad einer so ausgerüsteten Maschine durch eine Fremdkraft, zum Beispiel durch eine Feder, immer in die Geradeausfahrtstellung zurückzuführen. Um einen Lenkeinschlag zu erzielen, muß dann der Fahrer das Lenkrad gegen diese Federkraft in die gewünschte Einschlagstellung drehen. Der Fahrer spürt ein stabiles Lenkverhalten und fühlt sich am Steuer subjektiv sicher. Die Servolenkung muß dann bei Geradeausfahrt die gelenkten Räder in einer labilen Lage genau führen. Dazu ist ein steifes, spielfreies Lenksystem und eine präzise arbeitende Servolenkung erforderlich. Wenn die Hilfskraft durch irgendeinen Schaden einmal ausfällt, dann läßt sich das Fahrzeug nicht nur erheblich schwerer lenken, sondern zeigt dem Fahrer auch plötzlich seine bisher von der Hilfskraft unterdrückte Instabilität, wodurch dieser in sehr gefährliche Situationen kommen kann. Ähnlich gefährlich kann bei allen Fahrzeugen ein plötzlicher Ausfall der Hilfskraftlenkung sein, besonders wenn es sich um Fahrzeuge handelt, die wegen ihres übergroßen Gewichtes von Hand nicht gelenkt werden können. Man muß dann durch geeignete Maßnahmen, zum Beispiel eine Hilfskraftreserve, dafür sorgen, daß das Fahrzeug vom Fahrer wenigstens noch an den Straßenrand gelenkt und zum Stehen gebracht werden kann. Trotz dieser Schwierigkeit ist die Stabilisierung durch eine Fremdkraft eine mögliche Lösung.

Zusammenfassung

Fahrzeuge mit Hinterachslenkung sind häufig lenkungsmäßig instabil. Sie laufen dann im Gegensatz zum vorne gelenkten Normalfahrzeug nicht von selbst geradeaus. Wenn man auf ebener störungsfreier Fahrbahn das Lenkrad eines instabilen Fahrzeugs losläßt, dann vergrößert sich ein einmal vorhandener Einschlagwinkel der gelenkten Räder selbsttätig bis zum Volleinschlag. Ursache dieser Erscheinung ist das Rückstellmoment der Reifen, welches bei Hinterachslenkung einschlagvergrößernd wirkt. Andere Anteile des Lenkmomentes wirken dagegen auch bei diesen Fahrzeugen rückdrehend in die Geradeausfahrtstellung, also stabilisierend. Durch die am Nachlaufhebelarm angreifende

Seitenführungskraft kann man das Rückstellmoment der Reifen kompensieren, wenn man den Nachlauf groß genug wählt. Bei noch größerem Nachlauf empfindet der Fahrer das Fahrzeug wieder als instabil. Bei schnellen Lenkbewegungen im Geradeausfahrtbereich werden dann nämlich die Seitenführungskräfte, die zur Drehbeschleunigung des Fahrzeuges um seine vertikale Schwerpunktachse erforderlich sind, am Lenkrad störend fühlbar. Stabiles Lenkverhalten kann man erreichen, wenn man zusätzlich die Lenkachse so auslegt, daß beim Radeinschlag das auf der Lenkachse ruhende Fahrzeuggewicht angehoben werden muß. Ein hinten gelenktes Fahrzeug mit Hilfskraftlenkung kann man schließlich noch durch eine Fremdkraft stabilisieren. Dazu kann beispielsweise eine Feder dienen, die das Lenkrad aus jeder Einschlagstellung in die Geradeausfahrtstellung zurückführt. Die Hilfskraft stellt dann, dem Lenkrad folgend, auch die gelenkten Räder geradeaus.

Hinterachslenkung kann bei manchen Sonderfahrzeugen, wie zum Beispiel einigen selbstfahrenden Arbeitsmaschinen, zweckmäßig sein. Es ist möglich, durch konstruktive Maßnahmen das instabile Lenkverhalten zu vermeiden, das derartige Fahrzeuge sonst häufig zeigen. Hinten gelenkte Fahrzeuge mit stabilem oder wenigstens indifferentem Lenkverhalten lassen sich ebenso sicher lenken wie vergleichbare Fahrzeuge mit Vorderachslenkung.

Schrifttum

- [1] BAIER, H.: Vehicle Steering Fundamentals. SAE Transactions 1961, S. 246—268
- [2] FIALA, E.: Zur Fahrdynamik des Straßenfahrzeugs unter Berücksichtigung der Lenkungselastizität. ATZ 62 (1960), S. 71—79
- [3] MITSCHKE, M.: Fahrtrichtungshaltung und Fahrstabilität von vierrädrigen Kraftfahrzeugen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 135. Düsseldorf 1960
- [4] PERRET, W.: Lenkkräfte und Lenkwege am Lenkrad von Kraftfahrzeugen und ihr Einfluß auf die Lenksicherheit. Diss. TH. Stuttgart 1964

Résumé

Wolfgang Perret: "Steering Stability of Rear-Steered Vehicles".

Rear-steered vehicles are often instable as to steering. In contrast to the front-steered normal vehicle they do not run straightahead themselves. If the steering wheel of an instable vehicle is released on a level and trouble-free roadway, the once existing angle of lock of the steered wheels increases automatically until its extreme limit, which is due to the restoring moment of the tires. Other components of the steering moment cause however also these vehicles to turn back and drive straightahead, i. e. they stabilize. By means of the lateral load acting on the lever arm for track alignment the restoring moment of the tires can be compensated if the track alignment is great enough. With a still greater track alignment the vehicle seems to be instable again; for with quick steering moments in the straightahead range the same lateral loads, which are required for the torsional acceleration of the vehicle around its vertical neutral axis, are felt as troublesome at the steering wheel. A stable steering behaviour can be reached, if in addition the steering axle is constructed thus that at steering the weight of the vehicle resting on the steering axle must be decreased. Finally, a rear-steered vehicle with auxiliary steering force can be stabilized by an external force. For this a spring can be used turning the steering wheel back from each angle of lock until it has reached the straightahead position. Following the steering wheel the auxiliary force turns then also the steered wheels straightahead.

Patenterteilung dauert zu lange

Der Gemeinschaftsausschuß der Technik (GdT), in dem die technisch-wissenschaftlichen Vereine, die berufsständischen Ingenieurverbände, die Wirtschaftsverbände, die Sozialpartner und die Behörden zusammenarbeiten, hat sich mit der Geschäftslage des Deutschen Patentamtes befaßt und dem Vorsitzenden des Haushaltsausschusses des Deutschen Bundestages, Bundestagsvizepräsident ERWIN SCHOETTLE, die Sorge über die außerordentlich lange Dauer des Patenterteilungsverfahrens vorgetragen, die der technischen Entwicklung in der Bundesrepublik und damit unserer Wettbewerbslage auf dem internationalen Markt abträglich ist. Nach Ansicht des GdT ist für die dringend erforderliche schnelle Erledigung der Anmeldungen eine Vermehrung der Planstellen im Deutschen Patentamt unerläßlich. Der GdT stützt sich dabei auf Ergebnisse einer Erhebung über die Geschäftslage im Deutschen Patentamt, die soeben als VDI-Information Nr. 11/1964 vorgelegt wurde. (VDI)

Rear-steering may be recommendable for some special vehicles, e. g. with some self-driving machines. Instable steering frequently shown by these vehicles can be avoided by constructive measures. Rear-steered vehicles with stable or at least indifferent steering behaviour can be steered as safely as comparable vehicles with front-axle steering.

Wolfgang Perret: «La stabilité de conduite de véhicules à direction arrière».

La direction des véhicules à essieu arrière directeur est souvent instable. Ils ne se déplacent pas automatiquement en ligne droite comme les véhicules à direction avant. Si l'on lâche le volant de direction d'un véhicule instable sur une piste plane et sans obstacles, un angle de virage des roues directrices déjà entamé augmente automatiquement jusqu'à l'angle de braquage complet. La cause de ce phénomène est le «couple de recub des pneumatiques qui accroît l'angle de braquage sur les véhicules à essieu arrière directeur. D'autres grandeurs du couple de conduite ont par contre un effet stabilisant et ramènent le véhicule instable en position de marche droite. En choisissant une chasse suffisamment importante, le couple de recul des pneumatiques peut être compensé par la force de conduite latérale qui agit sur le bras de levier de la chasse. Quand la chasse dépasse une certaine valeur, le conducteur a l'impression que le véhicule redevient instable, car les forces de conduite latérales nécessaires à l'accélération de la rotation du véhicule autour de son axe de stabilité vertical, se font sentir désagréablement au volant de direction pendant les manoeuvres rapides en marche droite. On peut en outre obtenir une conduite stable en calculant l'essieu directeur de telle sorte que le poids du véhicule reposant sur l'essieu directeur soit soulevé lors du braquage des roues. Un véhicule à direction arrière pourvu d'une conduite assistée peut en outre être stabilisé par une force extérieure. On peut se servir par exemple d'un ressort qui ramène le volant de direction de toute position de braquage dans la position de marche droite. Le dispositif auxiliaire de conduite suit alors le mouvement du volant de direction et ramène les roues directrices dans la position de marche droite.

L'essieu arrière directeur peut être utile pour certains véhicules spéciaux comme par exemple pour certaines machines automotrices. L'instabilité de conduite manifestée souvent par ces véhicules peut être supprimée par des mesures constructives appropriées. Les véhicules à direction arrière dont la conduite est stabilisée ou au moins indifférente, peuvent être conduits avec une sécurité aussi grande que les véhicules comparables à direction avant.

Wolfgang Perret: «Estabilidad de la dirección de vehículos con dirección trasera».

Los vehículos con eje de dirección trasero carecen con frecuencia de estabilidad de la dirección, apartándose automáticamente de la recta, en contra de lo que sucede a los vehículos de dirección delantera normales. Soltándose el volante de un vehículo de dirección inestable en una vía de rodadura plana, libre de obstáculos, el ángulo de oblicuidad de las ruedas de dirección que exista, va aumentando automáticamente hasta llegar al ángulo máximo, e. d. al tope. La causa de este fenómeno consiste en el momento de retroceso de los bandajes que da lugar al aumento del ángulo de oblicuidad en la conducción por el eje trasero. Sin embargo existen otras componentes del momento de dirección que ejercen una influencia estabilizadora contraria en dirección derecha, también en esta clase de vehículos. El momento de retroceso de los bandajes se puede compensar con la fuerza de conducción lateral que obra sobre el brazo de la palanca de inercia, ajustando la marcha en inercia bastante amplia. Siendo ésta todavía más grande, el conductor vuelve a sentir la inestabilidad. Haciendo movimientos de conducción rápidos dentro del margen de marcha rectilínea, se notan en el volante de forma desagradable las fuerzas de conducción laterales, necesarias para la velocidad de giro del vehículo alrededor del eje de gravedad vertical. Se puede conseguir la estabilización del comportamiento de la dirección, construyendo además el eje de dirección de tal forma que en posición oblicua de las ruedas haya que levantar el peso del vehículo que descansa sobre el eje de dirección. También puede estabilizarse un vehículo de dirección trasera con fuerza de dirección auxiliar, por una fuerza extraña, p. e. por un muelle que restablezca la dirección rectilínea desde cualquier ángulo de oblicuidad. Siguiendo la fuerza auxiliar el movimiento del volante, coloca también las ruedas en posición de marcha rectilínea.

La dirección por el eje trasero puede convenir para muchos vehículos especiales, por ejemplo para varias máquinas de propulsión propia. Con varios recursos constructivos es posible evitar la inestabilidad de dirección, tan frecuente en estos vehículos. Los vehículos de dirección trasera con comportamiento estable, o por lo menos indiferente, se conducen con la misma seguridad como los vehículos comparables de dirección por el eje delantero.