Prof. Dr.-Ing. Fritz Gauß, Hannover, und Dr.-Ing. Günter Willmerding, München

DK 629.11.012.55 : 531.2

Die Normalkraftverteilung des Gürtelreifens

Mit einem räumlichen Ersatzmodell für einen Gürtelreifen konnten im Institut für Kraftfahrwesen der Technischen Universität Hannover die Kräfte im Reifenquerschnitt und die Normaldruckverteilung in der Aufstandsfläche des langsam rollenden, belasteten Rades berechnet werden. Es zeigte sich der beträchtliche Einfluß der Querschnittsform auf die Ausbildung von Spitzenbeträgen.

Normal Force Distribution of the Radial-Ply Tire

Abstract

Using a three-dimensional simulation model of a radial-ply tire it was possible to calculate the forces in the tire cross-section and the normal pressure distribution in the contact area of the slowly rolling loaded wheel. It was found that the cross-sectional shape is a determining factor for peak values.

1. Einleitung

Die Verteilung der Normalkräfte in der Aufstandsfläche von Reifen hat großen Einfluß auf seine Eigenschaften, insbesondere auf das Umfangs- und Seitenkraftverhalten, auf die Ausnutzung der Fahrbahngriffigkeit und auf den Laufflächenverschleiß. Aus diesem Grunde wurde die Normaldruckverteilung von Reifen bereits wiederholt meßtechnisch untersucht [1, 2, 5, 9]. Auch wurden Versuche an Modellen durchgeführt, um die Ursache des Verlaufs der Normaldruckverteilung zu klären [3] und insbesondere den Einfluß von Biegesteifigkeit, Luftdruck und Größe der Aufstandsfläche zu erfassen.

Zur rechnerischen Bestimmung der Normaldruckverteilung kann ein räumliches Ersatzmodell verwendet werden, das den Aufbau des Reifens hinreichend berücksichtigt. Bereits Böhm [4] berechnete anhand eines solchen Ersatzmodells mit Hilfe der Schalentheorie u. a. die Gleichgewichtsform des Kreuzkordreifens und versuchte dabei auch, zu Aussagen über die Abplattung des Reifens zu gelangen. Bei der mathematischen Behandlung einer nicht rotationssymmetrischen Schale, wie sie ein abgeplatteter Reifen darstellt, treten jedoch große Schwierigkeiten auf, so daß eine Berechnung der Bodendruckverteilung mit Hilfe der Schalentheorie bisher nicht gelang.

Durch Aufteilung des Reifens in einzelne Elemente, für die jeweils die Gleichgewichtsbedingungen erfüllt sein müssen, gelingt die mechanische Behandlung auf relativ einfache Weise. Ein derartiges Ersatzmodell wurde für den Gürtelreifen geschaffen und ermöglichte die Berechnung von Kräften und Verformungen des Gürtelreifens auch für den abgeplatteten Zustand.

Verwendete Formelzeichen

B	Breite des unverformten Querschnitts
CR	Drehsteifigkeit der Gelenke in den Querebenen
CG	Drehsteifigkeit der Gelenke in den Längsebenen
GK	Schnittkraft im Gürtelstab in Umfangsrichtung
H	Höhe des unverformten Reifenquerschnittes
p	Überdruck im Reifeninnern gegenüber dem Außendruck
R	Koordinate in radialer Richtung
BX	Koordinate in Rollrichtung des Reifens
BY	Koordinate quer zur Rollrichtung
BZ	Koordinate in Normalenrichtung zur Fahrbahnoberfläche
PN_{ges}	Gesamtnormaldruck in der Kontaktfläche zwischen Lauffläche und Fahrbahn
PN_{CR}	Normaldruck in der Kontaktfläche, der durch die Biegung in den Querebenen verursacht wird
PN_{CG}	Normaldruck in der Kontaktfläche, der durch die Biegung in den Längsebenen verursacht wird
χ_g, χ'_g	Querschnittskrümmung des Gürtels im unverformten bzw. verformten Zustand des Reifens
χ_L, χ'_L	Krümmung der Lauffläche des Querschnitts im unverformten bzw. verformten Zustand des Reifens
χ_F	Krümmung der Fahrbahnoberfläche

2. Ersatzmodell

Der Gürtelreifen ist gekennzeichnet durch biegeweiche Seitenwände und einen demgegenüber steiferen Laufflächenbereich, Bild 1. Die Seitenwände lassen sich durch radial gerichtete Stabelemente ersetzen, die durch Gelenke verbunden sind und in diesen Kräfte und Momente nur in der Querebene übertragen. Die Karkasse im Gürtelbereich und der Gürtel selbst werden gemeinsam durch ein orthogonales Netz von Stäben ersetzt, in dessen Gelenkpunkten Kräfte und Momente in Längs- und Querrichtung übertragen werden können.

Die Lauffläche wird durch undehnbare Vertikalstäbe ersetzt, von denen angenommen wird, daß sie im abgeplatteten Zustand des Reifenersatzmodells senkrecht auf der Fahrbahn stehen und somit auch den Abstand der zugehörigen Gelenkpunkte von der Fahrbahn festlegen.

Die Wirkung des Luftinnenüberdrucks p wird beim Ersatzmodell durch statisch äquivalente Einzelkräfte repräsentiert, die an den Gelenkpunkten angreifen.

Das beschriebene Ersatzmodell ermöglicht eine relativ einfache Berechnung der Querschnittsgeometrie und der mechanischen Größen für die in Bild 2 dargestellten Bereiche A und C.

Die Berechnung der Form des Übergangs zur Aufstandsfläche (Bereich B) würde einen sehr großen Aufwand erfordern. Von

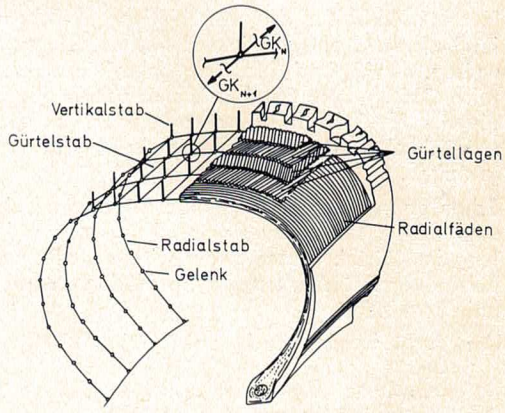


Bild 1. Schnittdarstellung des Gürtelreifens (rechte Seite) und des Ersatzmodells (linke Seite)

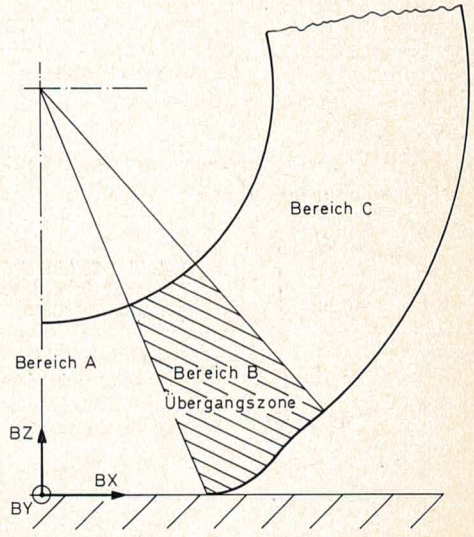


Bild 2. Seitenansicht des durch eine vertikale Radlast belasteten Gürtelreifens

ihr kann aber abgesehen werden, da die im wesentlichen interessierende Bodendruckverteilung durch die Form der Übergangszone nur in einem kleinen Bereich, dem Ein- und Auslauf, beeinflußt wird. Statt dessen wurde die Form der Übergangszone sinnvoll angenommen.

Bei dem beschriebenen Ersatzmodell wurden bis zu 60 000 Einzelstäbe verwendet; die Auswertung der Gleichgewichtsbedingungen mußte deshalb mit einer EDV-Anlage durchgeführt werden.

3. Ergebnisse

Berechnet wurde der Zusammenhang zwischen dem Herstellungsquerschnitt des Reifens und den mechanischen und geometrischen Größen (Kraftverteilung, Querschnittsgeometrien) des nur durch eine vertikale Radlast belasteten, langsam und frei rollenden Reifens. Der Einfluß der dabei auftretenden Reibungskräfte auf die Bodendruckverteilung ist, wie eine Abschätzung ergab, äußerst gering; zur Berechnung der Bodendruckverteilung war es deshalb nicht erforderlich, die Reibungskräfte zwischen Lauffläche und Fahrbahn zu berücksichtigen.

3.1. Verteilung der Gürtelkräfte im unverformten Bereich

Im unverformten Bereich C hängen die Gürtelkräfte ganz entscheidend von der Querschnittsgeometrie ab. Für die Verteilung der Umfangskraft GK nach Bild 1 im Gürtel sind zwei Faktoren von besonderer Bedeutung:

- der Winkel Δ an der Übergangsstelle von der Seitenwand zum Gürtel (späteres Bild 4)
- der Verlauf der Gürtelkrümmung χ_g des Querschnittes

In Bild 3 ist für drei verschiedene Reifenquerschnitte, die im Bereich C einen ellipsenförmigen Gürtelquerschnitt aufweisen, der Verlauf der Umfangskraft im Gürtel für den Bereich C dargestellt (Zugkräfte sind positiv gezählt). Durch geeignete Wahl der Ellipsenparameter gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, den Verlauf der Kraftverteilung im Gürtel zu gestalten.

Schon geringfügig erscheinende Änderungen der Gürtelquerschnittsform führen zu starken Änderungen der Kraftverteilung im Gürtel. Dieser Effekt wird allerdings bei wirklichen Reifen der Dehnbarkeit der Kordfäden entsprechend quantitativ vermindert.

Untersucht wurden auch kreisförmige Gürtelquerschnittsformen (χ_g = const), wobei sich herausstellte, daß für ein bestimmtes Verhältnis von H/B nur eine in relativ engen Grenzen veränderbare Gürtelkrümmung χ_g sinnvoll ist. Wird diese Krümmung nicht eingehalten, so treten, bedingt durch einen unzulässig großen Winkel Δ an der Übergangsstelle von der Seitenwand zum Gürtel, unerwünscht hohe Gürtelkräfte am Gürtelrand auf. Es erscheint allerdings möglich, durch geeignete Biegung der Seitenwand dem in begrenztem Umfang entgegenzuwirken.

Wie vielfältige Reifenberechnungen und Optimierungsversuche zeigten, wird durch die Wahl einer konstanten Gürtelkrümmung χ_g die Zahl der möglichen Querschnittsformen eingegrenzt. Demgegenüber bietet eine über dem Querschnitt veränderliche Gürtelkrümmung χ_g eine größere Zahl von Variationsmöglichkeiten der Querschnittsform und somit eine günstigere Ausgangsposition zur Optimierung der Querschnittsform.

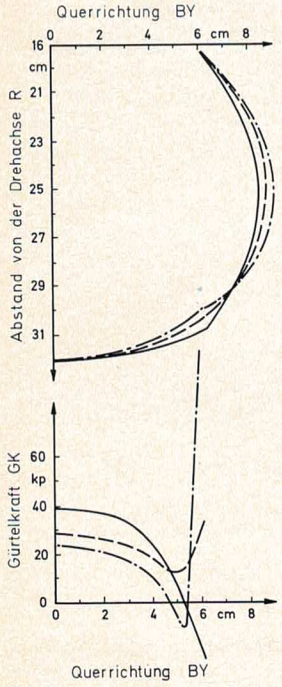
3.2. Normaldruckverteilung in der Aufstandsfläche

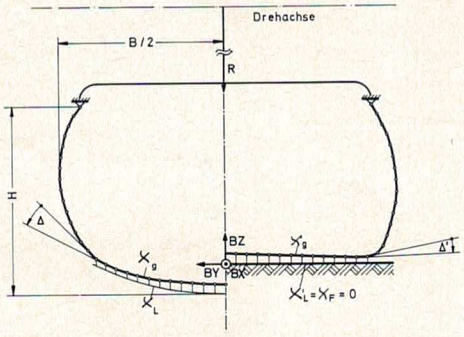
Zunächst sollen die Vorgänge bei der Abplattung des Gürtelreifens kurz erläutert werden, weil ihre Kenntnis das Verständnis für die Ursachen der Normaldruckverteilung erleichtert. Betrachtet wird dazu der senkrecht unterhalb der Drehachse befindliche Querschnitt Q_m, der sich in der BY-BZ-Ebene befindet. Da dieser Querschnitt bei der Abplattung eben bleibt, vereinfachen sich die Überlegungen. Bild 4 zeigt schematisch den Querschnitt Q_m des Reifens in unverformtem und verformtem Zustand.

Der unverformte Reifen (unter Innendruck) weist den Krümmungsverlauf des Gürtels χ_g und die Laufflächenbegrenzungskurve mit der Krümmung χ_L auf. Wird der Reifen abgeplattet, so paßt sich die Krümmung χ_L der Fahrbahnoberflächenkrümmung χ_F an, die für alle Berechnungen mit $\chi_F = 0$ angenommen wurde. Läßt man keine Längenänderung der Vertikalstäbe zu, so ist der Verlauf der Gürtelkrümmung χ'_g des verformten Reifens festgelegt.

Die Normaldruckverteilung wird entscheidend beeinflußt von dem Verlauf der Krümmungen χ_g und χ_L, den Biegesteifigkeiten CR und CG und von der Winkeldifferenz Δ an der Übergangsstelle Seitenwand–Gürtel.

Um den Einfluß der Biegung in den Längsebenen (Ebenen parallel zur BX-BZ-Ebene) und den Querebenen (Ebenen, in denen die Drehachse liegt) zu untersuchen, wurde die Bodendruckverteilung PN_{ges} als Summe der Bodendruckverteilungen PN_L, PN_{CR} und PN_{CG} aufgefaßt. PN_{CR} und PN_{CG} haben ihre Ur-





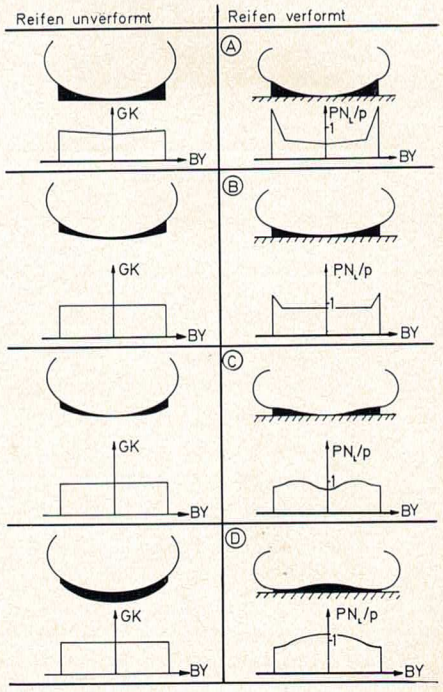


Bild 3. (links) Zusammenfassung zwischen Reifenquerschnitt (oben) und Kräften im Gürtel GK in Umfangsrichtung (unten)

Bild 4. (Mitte) Querschnitt des Ersatzmodells des Gürtelreifens in der BY-BZ-Ebene (Querschnitt Q_m) für den unverformten Zustand (Radlast = 0) und für den abgeplatteten Zustand

Bild 5. (rechts) Zusammenhang zwischen Querschnittsform, Umfangskraft im Gürtel GK und der auf den Luftüberdruck p bezogenen Normaldruckverteilung PN_L (Bodendruck ohne Berücksichtigung von Biegesteifigkeiten) in der BY-BZ-Ebene (Querschnitt Q_m)

sache in der Biegung in den Quer- bzw. Längsebenen, während PN_L den Anteil der Bodendruckverteilung darstellt, der ohne Biegesteifigkeit zustande kommt. Bild 5 zeigt schematisch verschiedene Reifenquerschnitte, für die der Zusammenhang zwischen dem unverformten Querschnitt des Reifens (Radlast = 0 ≙ Bereich C) und der auf den Luftüberdruck p bezogenen Normaldruckverteilung PN_L des abgeplatteten Reifens angegeben ist.

In dem Bild 5 sind der senkrecht unter der Drehachse befindliche Querschnitt Q_m und die dort vorhandene Normaldruckverteilung PN_L angegeben. Die Gürtelkrümmung wurde so gestaltet, daß die Verteilung der Umfangskraft im Gürtel des unverformten Reifens über der Breite des Querschnittes nahezu konstant ist. Diese Umfangskraftverteilung des Reifens ist ebenfalls in Bild 5 angegeben.

Einen Gürtelquerschnitt mit konstanter Gürtelkrümmung χ_g zeigt Fall A. Der Bodendruck ist in der Mitte des Querschnitts Q_m geringer als am Rand.

Durch geeignete Kombination der Laufflächenkrümmung χ_L und der Gürtelkrümmung χ_g kann eine gleichmäßige Bodendruckverteilung über der Breite der Aufstandsfläche erzielt werden, Fall B.

Fall C und D zeigen weitere Möglichkeiten der Querschnittsgestaltung, wobei ebenfalls Gürtel- und Laufflächenbegrenzungskurven Teile von Ellipsen sind.

Die Bodendruckverteilung PN_{CR}, die durch die Biegesteifigkeit CR verursacht wird, hat an der gesamten Bodendruckverteilung PN_{ges} wahrscheinlich nur einen verhältnismäßig geringen Anteil. Zuverlässige Zahlenwerte für CR lagen jedoch nicht vor, so daß nur qualitative Aussagen über PN_{CR} gemacht werden sollen.

Nimmt man CR als konstant über dem Querschnitt an, dann ergeben sich die in Bild 6 dargestellten Bodendruckverteilungen PN_{CR}.

Bei einer nicht gekrümmten Laufflächenbegrenzungskurve ($\chi_L = 0$) treten Auswirkungen der Biegesteifigkeit nur am seitlichen Rand auf, Fall A.

Liegen gekrümmte Laufflächenbegrenzungskurven vor, Fall B und C, so hängt der durch die Biegesteifigkeiten verursachte Bodendruck maßgeblich von den Krümmungen χ_g und χ_L ab. Möglich sind dann die für Fall B und C angegebenen Verläufe.

Beispiele für berechnete räumliche Bodendruckverteilungen

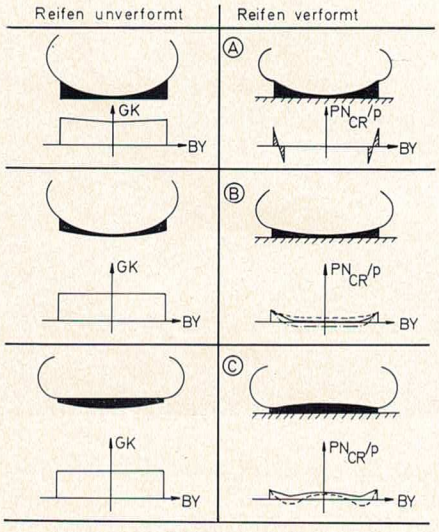


Bild 6. Zusammenhang zwischen Querschnittsform, Umfangskraft im Gürtel GK und der auf den Luftüberdruck p bezogenen Normaldruckverteilung PN_{CR} (Bodendruck infolge Biegung in der Querebene) in der BY-BZ-Ebene (Querschnitt Q_m)

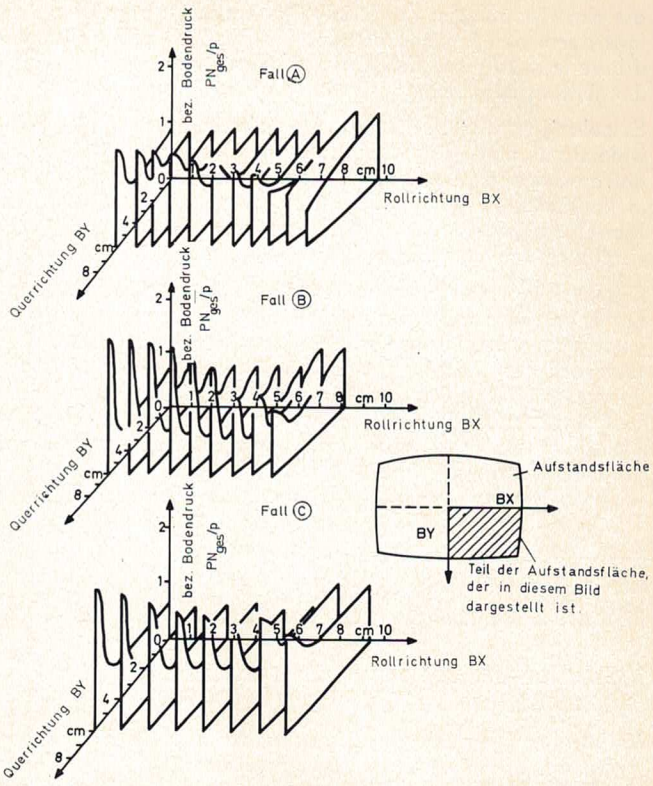


Bild 7. Auf den Luftüberdruck p bezogene Normaldruckverteilung PN_{ges} über dem vorderen rechten Teil der Aufstandsfläche für verschiedene Gürtelreifen A bis C

zeigt Bild 7. Den Berechnungen liegt ein Gürtelreifen ohne Biegesteifigkeit in den Querebenen (CR = 0) zugrunde.

Deutlich erkennbar ist der unterhalb der Drehachse am seitlichen Rand relativ hohe Bodendruck, der in Richtung Ein- und Auslauf abfällt. Ursache dieses Verlaufs des Bodendrucks am seitlichen Rand ist der Winkel Δ; aufgrund der geometrischen Verhältnisse ist er in der Mitte am größten und wird zum Ein- und Auslauf hin kleiner.

Am Ein- und Auslauf liegt ein höherer Bodendruck als im mittleren Bereich der Aufstandsfläche vor. Ursache hierfür ist die Biegung des Gürtels am Ein- und Auslauf in den Längsebenen.

Abgesehen von dem Bodendruck im Bereich der Randzonen der Aufstandsfläche ist der Bodendruck im mittleren Bereich relativ gleichmäßig.

Anzustreben ist ein möglichst gleichmäßiger Bodendruck über die gesamte Aufstandsfläche. Die in Bild 7 unter Fall B und C dargestellten Druckverteilungen sind daher ungünstig, da der Bodendruck innerhalb der Aufstandsfläche sehr ungleichmäßig ist. Günstig hingegen ist die unter Fall A dargestellte Bodendruckverteilung.

Die Reifen, deren Bodendruckverteilungen in Bild 7 dargestellt sind, unterscheiden sich nur in der Gürtel- und Laufflächenkrümmung χ_g und χ_L und dem Winkel Δ. Hier zeigt sich somit deutlich der große Einfluß dieser Parameter auf die Bodendruckverteilung.

Die Größe der Aufstandsfläche hängt von der Bodendruckverteilung und der Radlast ab. Eine „theoretische Aufstandsfläche", die sich aus Radlast und Reifeninnendruck errechnen läßt [10], wird von der tatsächlichen Aufstandsfläche im allgemeinen abweichen.

Schlußbemerkung

Zur rechnerischen Untersuchung an Gürtelreifen wurde ein räumliches Ersatzmodell aus stabförmigen, undehnbaren Elementen verwendet, die zur Übertragung von Kräften und Momenten durch Gelenke verbunden sind. Damit ließen sich

die Kraftverläufe im Festigkeitsträger des unbelasteten Reifens durch den Innendruck allein und weiterhin die Normaldrücke in der Aufstandsfläche des belasteten, langsam rollenden Reifens berechnen.

Es gelang noch nicht ganz, horizontale Kräfte, z. B. den Rollwiderstand, befriedigend zu berechnen. Es erscheint aber mit entsprechend größerem Rechenaufwand möglich, die Kräfte in Rollrichtung und Seitenkräfte zu erfassen. Dazu muß das Modell weitergehend unterteilt werden. Auch ist die Berücksichtigung von Dehnungen dann unumgänglich.

Die berechnete Normaldruckverteilung mit den Druckerhöhungen in den Randzonen der Aufstandsfläche stimmt mit bekanntgewordenen Meßergebnissen in der Tendenz überein. Der starke Einfluß der geometrischen Querschnittsform auf die Spannungsspitzen im Gürtel und auf die Normaldruckverteilung wurde erkennbar. Solche Ersatzmodelle eignen sich demnach für einen Beitrag zur Optimierung der Beanspruchungen im Reifen und der für die Übertragung horizontaler Kräfte wesentlichen Normaldruckverteilung in der Aufstandsfläche.

Schrifttum

[1] Borgmann, W.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Luftreifen bei Schräglauf. Diss. TH Braunschweig, 1963

[2] Martin, H.: Druckverteilung in der Berührungsfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. Kraftfahrtechn. Forschungsarbeiten 2/(1936)

[3] Clark, S. K.: Untersuchung der Verteilung des Auflagedrucks in Luftreifen. Kautschuk und Gummi (1969) 8, S. 433

[4] Böhm, F.: Zur Mechanik des Luftreifens. Habilitationsschrift TH Stuttgart, 1966

[5] Seitz, N.: Die Kräfte in der Berührungsfläche schnell rollender Reifen. VDI-Fortschrittsbericht 1968, Reihe 12, Nr. 19

[6] Kraft, P.: Untersuchung über die Größe der Berührungsfläche, der Bodendrücke und Horizontalkräfte an rollenden Luftreifen. Diss. TH Stuttgart, 1947

[7] Willmerding, G.: Die Normalkraftverteilung des Gürtelreifens. Diss. TU Hannover, 1974

[8] Hofferberth, W.: Zur Statik des Luftreifens. Kautschuk und Gummi (1955) 5, S. WT 124

[9] Gerresheim, M. und Hussmann, W.: Kräfte und Bewegungen in der Aufstandsfläche geradeaus rollender Reifen. ATZ 77 (1975) 6, S. 165–169

[10] Bussien: Automobiltechnisches Handbuch, Bd. 2, 1965

... Berichte ... Nachrichten ... Berichte ... Nachrichten ... Berichte ... Nachrichten ... Berichte ...

Vollhydraulische Bachert-Gelenkmastbühne System Simon-Snorkel

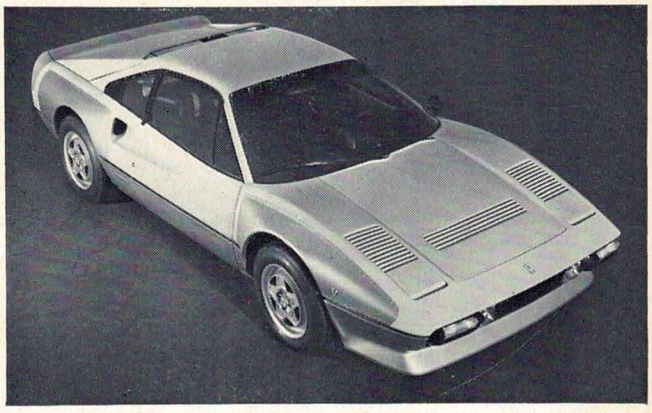
Im Rahmen ihrer Feuerwehrfahrzeuge stellte die Firma Gebrüder Bachert Feuerwehrgerätefabriken, Bad Friedrichshall, anläßlich der Hannover-Messe 1977 auch eine Bachert-Gelenkmastbühne, System Simon-Snorkel, vor, die gerade in Gemeinden mit Hochbauten der Aufgabe optimalen Löscheinsatzes und der Rettung von Menschenleben aus großer Höhe voll gerecht werden kann, Bild 1. Mit Rettungshöhen von 23,5 m bis 31,5 m, der seitlichen Ausladung von 12,6 m bis 16 m und einer Belastung im Korb von 365 kg bis 510 kg (je nach Modell), sind die Bachert-Gelenkmastbühnen für die vielfältigen Aufgaben der Feuerwehren ideal. Der patentierte, dreiteilige Gelenkarm ist um 360° schwenkbar, die volle Hubhöhe mit Schwenken um 90° einschließlich Abstützen erfolgt in knapp 100 s. Für den Löscheinsatz ist im Rettungskorb ein Monitor (Wendestrahlrohr) mit einer Leistung von 2270 l/min bei 8 bar installiert.

Bild 1. Bachert-Gelenkmastbühne Modell SS-263, Arbeitshöhe 27,8 m, seitliche Ausladung 14 m (links); Bachert-Tanklöschfahrzeug TLF 10 000 (Mitte); Bachert-Schaumtanklöschfahrzeug SCH-TF 5000 (rechts)

Weiter sind Anschlüsse vorgesehen für Schlauchleitungen, Atemluft, Strom und Hydraulikwerkzeuge. Eine starke Mannschutzbrause unter dem Korb schützt das Bedienungspersonal. Selbst bei schwierigsten Bedingungen erfolgt die vollhydraulische Steuerung exakt und einfach über die Zwei-Hebel-Bedienung. Parallel zu den drei Hubarmen sind jeweils Alu-Leitern mit Handlauf für den Notabstieg angebracht. Zur Unterbringung der feuerwehrtechnischen Ausrüstung ist ein geräumiger Karosserieaufbau mit entsprechenden Geräteräumen mit Schubzugverschlüssen und durchgehender Alu-Plattform angeordnet. IN

Karosserie-Studie von Pininfarina für den Ferrari 308 GTB

Pininfarina zeigte auf der Internationalen Automobilausstellung in Barcelona das neu bearbeitete Modell 308 GTB; im Windkanal wurde es strömungsgünstiger gestaltet und dabei mit größeren Spoilern vorn und hinten sowie einer hinteren Abreißkante versehen. Diese Arbeiten waren recht erfolgreich.



Auffällig sind ferner die an den Radausschnitten aufgesetzten Ausbuchtungen, die wegen der breiteren Michelin-Reifen TRX notwendig waren. Park- und Blinklichter sind über der vorderen Stoßstange; die versenkten Hauptscheinwerfer werden elektrisch gehoben. Auch im Inneren wurden das Instrumentenbrett und die Sitze verbessert und die Bedienung erleichtert.