

Friedberger Hochschulschriften

Stefan Zima

Das rollende Rad

Friedberger Hochschulschriften Nr. 12

© Stefan Zima

Friedberger Hochschulschriften

Herausgeber:

Die Dekane der Fachbereiche des Bereichs Friedberg der FH Gießen-Friedberg

Wilhelm-Leuschner-Straße 13, D-61169 Friedberg

<http://www.fh-friedberg.de>

Alle Rechte vorbehalten, Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung und Quellenangabe.

Friedberg 2002

ISSN 1439-1112

Das rollende Rad

Stefan Zima

Einleitung

In der Vorlesung *Tribologie* des Fachbereichs *Maschinenbau, Mechatronik, Materialtechnologie (M)* der *Fachhochschule Gießen-Friedberg, Bereich Friedberg*, werden elementare Vorgänge von Reibung, Verschleiß und Schmierung behandelt. In diesem Zusammenhang wird auch auf Fragen der Kraftübertragung mit dem und durch das Rad eingegangen. Dabei zeigt sich, dass das rollende Rad ein vielschichtigeres Maschinenelement ist, als man bei oberflächlicher Betrachtung vermuten möchte. Ungeachtet dessen findet man kaum eine zusammenfassende Darstellung der Eigenschaften und des Verhaltens des rollenden Rades in einschlägiger Fachliteratur. Deshalb soll mit dieser Abhandlung auf verschiedene Aspekte des Rades eingegangen werden, wobei der Bogen auch über das „rein“ Technische gespannt wird.

Das Rad, allgegenwärtig in unserem Leben, dem Kinde schon von seinem Spielzeug vertraut, als Mittel der Fortbewegung in der Jugend im wahren Sinne des Wortes *erfahren*, ist eine der wichtigsten Erfindungen des Menschen, eine der Grundlagen unserer zivilisatorischen und kulturellen Entwicklung. Dennoch wissen nur die wenigsten, wie ein Rad „funktioniert“, was seine Besonderheiten sind und welche vielfältigen Eigenschaften es hat. Das gilt nicht nur für technische Laien, denen ein Desinteresse an Grundlagen selbst von fundamentalen Maschinenteilen nachgesehen werden könnte, sondern auch für die einschlägige Fachliteratur, in der man oft vergebens nach Einzelheiten über das rollende Rad sucht. Nachfolgend soll deshalb auf Grundlagen der „Funktion“ des Rades eingegangen werden und auf die konstruktive Lösungen, die es befähigen, seine verschiedenartigen Aufgaben zu erfüllen. Es soll gezeigt werden, in wie vielen Schritten das Rad in Hinblick auf seine vielfältigen Funktionen entwickelt worden ist.

Die „Erfindung“ des Rades ist eine der großen intellektuellen Leistungen des Menschen. In der belebten Natur gibt es kein unmittelbares Beispiel dafür, dass sich ein Pflanzen- oder

Körperteil fortlaufend um 360° drehen kann¹⁾, weil unter diesen Umständen eine Verbindung mit einem versorgenden Kreislauf nicht möglich wäre. Betrachtet man die menschlichen Beine als „Speichen“ eines Rades, dann ergibt sich ein Drehwinkel von nur 60° bis 100° .

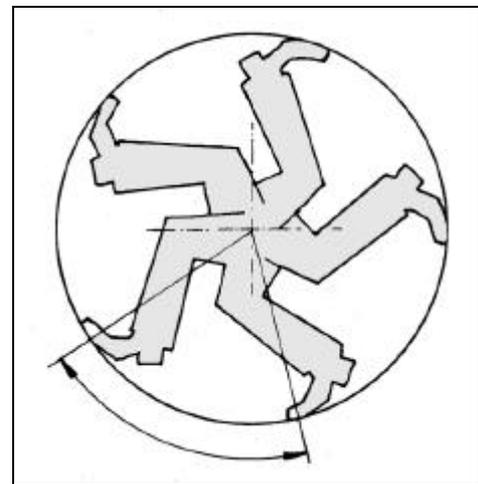


Bild 1 Der Abstand der "Speichen" eines von menschlichen Beinen gebildeten fiktiven Rades verdeutlicht den begrenzten Drehwinkel menschlicher Gliedmaßen.

¹⁾ Der Nachtgreifvogel Uhu kann seinen Kopf immerhin um 270° drehen.

Die Vorstellung von den menschlichen Gliedmaßen als Speichen eines Rades ist so absurd nicht, vergewärtigt man sich der radschlagenden Jungen, wie sie in Düsseldorf zum städtischen Selbstverständnis gehören. Das Motiv der Radschläger ist dort mittlerweile zum Gegenstand mehrerer Denkmäler geworden. Eine „Weiterentwicklung“ dieser Art des „Rades“ stellt das Rhönrad dar, ein Sportgerät aus zwei Stahlrohrreifen von 1,60 bis 2,20 m Durchmesser, die durch Querstangen miteinander verbunden sind. Der Sportler bzw. die Sportlerin stützt sich mit den Händen und mit den Füßen an diesen Querstangen ab und bewegt das Rad im gewünschten Sinne durch Verlagerung des Körpergewichtes. Das Rhönrad wurde 1925 von O. FEICK aus Schönau in der Rhön – daher diese Bezeichnung – erfunden. Das Rhönrad mag auch die Militärs im England des zweiten Weltkrieges zu Überlegungen angeregt haben, ein solches überdimensioniertes Rad als Waffe einzusetzen, nämlich das *Great Panjandrum* (engl. *Wichtigtuert*), ein Doppelrad, das mit zwei Tonnen Sprengstoff in der Achse von tangential am Umfang angebrachten Raketen angetrieben von Landungsbooten auf die von den Deutschen besetzte Küste rollen und die dortigen Befestigungen zerstören sollte.

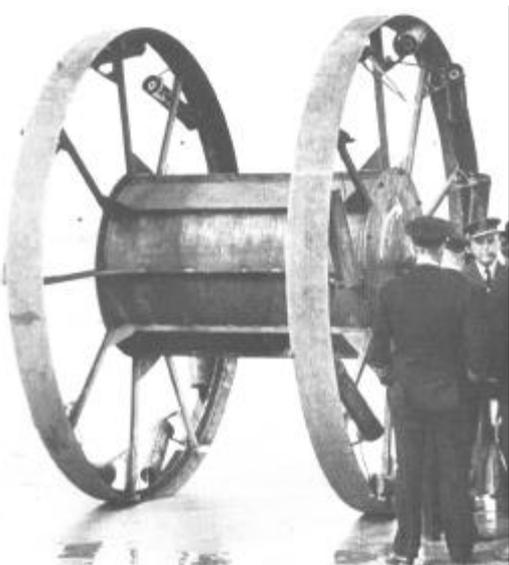


Bild 2 "Rhönrad" als Waffe: Das *Great Panjandrum* als Transportgerät für Sprengstoff

Bei Probeläufen wurden etwa 100 km/h erreicht. Da die Raketen nicht den gleichen Schub exakt und symmetrisch erzeugten, neigte das Rad zum Ausbrechen und torkelte unkontrollierbar durch das Gelände, die eigenen Mannschaften gefährdend, so dass es als Waffe nicht zu gebrauchen war.

Allenfalls die Bewegung kugelförmiger Samen, Früchte oder Dornbüsche im Wind, das Rollen der durch Bewegung im Wasser rundgeschliffenen Steine im Bachbett oder von Schnellbällen im Gefolge einer Lawine könnte die Vorstellungskraft unserer frühen Vorfahren beflügelt haben. Dennoch war der Kreis - Grundform des Rades - allgegenwärtig: In Gestalt von Sonne und Mond, aber auch in der Flora, denn als kleinstmöglicher Umfang für eine gegebene Fläche ist er bei den meisten Pflanzen, vom dünnen Halm bis zum dicken Baumstamm eine von der Natur bevorzugte Form. Man mag nun rätseln, durch welche Vorbilder angeregt, wann und aus welchen Anlass die Menschen in der Vorzeit den Einfall hatten, das Rad zu ‚erfinden‘, das heißt die Möglichkeiten zu erkennen und auszunutzen, die in einer kreisförmigen Scheibe stecken.

Die Bedeutung des Rades für die technische, wirtschaftliche und auch für die militärische - und damit in ihrer Gesamtheit - für die kulturelle Entwicklung der Menschheit kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden. Schon die Etymologie des Wortes *Rad* lässt den (kultur-)geschichtlichen Hintergrund erahnen, vor dem sich das Rad in seinen mannigfaltigen Ausführungs- und Anwendungsarten entwickelt hat:

Aus dem indogermanischen *roto* (= Rad, Wagen), dem altindischen *ratha* (= Streitwagen), dem lateinischen *rota* (= Rad), über das westgermanischen *rad* und das mittelhochdeutsche *rat* entstand schließlich unser heutiges *Rad* [1; 2].

In der Vorstellungswelt des Menschen nimmt das Rad eine besondere Stelle ein. Als Metapher für raschen Wandel, für die Umkehr von

Verhältnissen dient das Rad, vornehmlich in der Allegorie²⁾ von *Fortuna auf dem Glücksrad* ganz allgemein als Sinnbild für die Unwägbarkeiten des Schicksals.



Bild 3 Mit dem Bild "Jagd nach dem Glück" hat der schwedische Maler Robert Högfeldt eine komisch-satirische Darstellung der Fortuna auf dem Glücksrad gegeben

Mit Flügeln versehen als *geflügeltes Rad* wurde es zum Symbol der Eisenbahn, deren Geschwindigkeit im 19. Jahrhundert weit über das bis dahin Erlebte und Erfahrene hinausging.



Bild 4 Das Flügelrad - einst allgegenwärtiges Symbol für die Geschwindigkeit der Eisenbahn

Nun gibt es nichts, sei es noch so segensreich, womit der Mensch nicht Missbrauch triebe. Das gilt leider auch für das Rad: Die Redensart, man fühle sich *wie gerädert* erinnert an die

²⁾ Bildhafte Darstellung eines Begriffs mit deutlich erkennbarem Bezug zu diesem Sinnbild..

Funktion des Rades als Folterinstrument: Bis Anfang des 19. Jahrhunderts (!) wurden Mörder, Brandstifter, Straßen- und Kirchenräuber gerädert, d.h. mit gespreizten Gliedmaßen auf ein Wagenrad gebunden, worauf der Folterknecht dem Deliquenten die Gliedmaßen mit einer Eisenstange zerschlug. Im übertragenen Sinn bedeutet *radebrechen* ‚eine Sprache übel zurichten‘. Zur Verdeutlichung von Verhaltensweisen tauchen Rad und Rollvorgang in vielen Sprichwörtern und Redensarten auf: *Ein kleines Rädchen sein, das Rad neu erfinden, fünftes Rad am Wagen sein, ein großes Rad drehen, umgangssprachlich: ein Rad ab haben und ein Rad lose haben oder gar unter die Räder kommen* u.a. mehr. Ebenfalls in Appellen findet die Bedeutung des Rades Ausdruck, mit Zielrichtung

- sowohl auf die Bewegung, mit der zwar sachlich richtigen, aber ungunstigen Parole aus dem zweiten Weltkrieg: *Räder müssen rollen für den Sieg*
- als auch auf den Stillstand mit einem Spruch der Gewerkschaftsbewegung: *Alle Räder stehen still, wenn Dein starker Arm es will*³⁾

In der Musik findet man das Rad, ob in klassischen Werken [HAYDN: Die Jahreszeiten: "...schnurre Spinnrad schnurre..."], im Volkslied ["...aber der Wagen, der rollt..."] oder im Schlager ["...wer hat denn den Käse zum Bahnhof gerollt..."]. Und schließlich darf in dieser Aufzählung die Werbung nicht fehlen: Mit dem Werbespruch einer Spielbank *Zum Glück wurde das Rad erfunden* wird geschickt die Doppeldeutigkeit von Worten genutzt.

³⁾ *Mann der Arbeit aufgewacht! Und erkenne deine Macht! Alle Räder stehen still, wenn dein starker Arm es will!* Dieser Vers stammt von dem Dichter GEORG HERWEGH, 1817 bis 1875, einem aufrechten, wenn auch etwas weltfremden Demokraten, der sich sein Leben lang für die Schaffung von Republik und Demokratie in Deutschland eingesetzt hatte.

Was ist ein Rad?

Gerade weil das Rad so allgegenwärtig ist, verschwendet man keine Gedanken darauf, was ein Rad eigentlich ist, was seine Charakteristika sind, wie es funktioniert und welche Aufgaben es zu erfüllen hat. Einen guten Einstieg in Fragen solcher Art bieten Definitionen in Lexika, wobei man in sogenannten Konversationslexika, älteren zudem, oft ausführlichere Erläuterungen findet als in Fachbüchern oder Fachlexika, in denen Grundbegriffe wie das *Rad* - axiomatisch gebraucht - als bekannt vorausgesetzt werden. In der *Allgemeinen Realienencyclopädie für das katholische Deutschland* aus dem Jahre 1848 heißt es:

„...Rad nennt man im weitesten Sinne eine Maschine, wodurch etwas in Bewegung gesetzt und erhalten wird; im engeren Sinne eine Maschine zur Bewegung der Wagen und Fuhrwerke aller Art...“ [3].

In *Meyers Konversationslexikon* von 1889 stützt sich die Aussage vornehmlich auf die Form des Rades:

„...Rad, eine massive oder durchbrochene Scheibe mit glatter oder gefurchter Peripherie, welche stets in Verbindung mit einer zu ihrer Ebene senkrechte Achse oder Welle und zwar entweder auf ihr festsitzend oder drehbar zur Anwendung kommt. Nach ihrer Wirkungsweise sind die Räder in zwei Hauptgruppen zu zerlegen, nämlich in solche, welche zur Kraftübertragung dienen (Transmissionsräder), und in solche, welche zwischen zwei gegeneinander unter Druck bewegte Körper eingeschaltet werden, um gleitende Reibung unter Krafterparnis in eine teilweise rollende zu verwandeln (Antifrikionsräder)...“ [4].

Wohingegen in der Ausgabe von 1977 des selben Lexikons die Funktion im Vordergrund steht:

„Maschinenelement zur Kraft- und Drehmomentübertragung, insbesondere zur rollenden Fortbewegung, ferner von Richtungsänderungen von Seilen und Ketten u.a.: besteht gewöhnlich aus Nabe (die Verbindung zur Achse, Welle oder einem Zapfen herstellt), dem je nach Verwendungszweck unterschiedlich ausgebildetem Radkranz und der beide Teile verbindenden Radscheibe (beim Scheibenrad),

deren Funktion auch durch Speichen (Speichenrad) übernommen werden kann“ [5].

Die Grundform des Rades ist der Kreis, genauer gesagt der Kreiszyylinder. Ob seiner - bezogen auf den Durchmesser - geringen Breite ist das Rad eine Scheibe. Diese Grundform wurde durch Zusammenfügen von Einzelteilen dargestellt. Hiervon ausgehend baute man leichtere Räder mit einer Massenanordnung entsprechend den funktionalen und festigkeitsmäßigen Erfordernissen.

Die Wirkungsweise des Rades besteht darin, dass es mit dem Fahrzeug verbunden auf der Fahrbahn frei rollen kann. Die Verbindung mit dem Fahrzeug ist durch die Lagerung gegeben, wobei entweder das einzelne Rad auf der Achse drehbar gelagert (Kutschen, Pferdewagen, Handwagen, aber auch Motorfahrzeuge) oder als Radsatz (zwei durch eine Achse fest miteinander verbundene Räder) im Fahrzeug gelagert (Eisenbahnwagen) ist. Diese Achsen sind im Achskörper gelagert, auf den sich das Fahrzeug abstützt.

Der Kreis bzw. Kreiszyylinder als Grundform des Rades zeichnet sich durch eine Reihe von Eigenschaften aus:

- Geometrische Ökonomie: Er hat bei gegebener Fläche den kleinst möglichen Umfang bzw. bei gegebenem Umfang den größten Flächeninhalt,
- beim Rollen hält der Schwerpunkt konstanten Abstand zur Fahrbahn ein,
- optimales Festigkeitsverhalten (Kreiszyylinder) bei Druck von außen wie von innen und

- Kreisscheiben haben den größten Widerstand gegenüber Fliehkräftenbeanspruchung.

Das Rad kann verschiedene Bewegungsarten, Rotation (Drehung) und Translation (parallel verschiebende Bewegung), durchführen, entweder die eine oder die andere oder auch beide gleichzeitig. Aus diesen Bewegungsabläufen ergeben sich unterschiedliche Funktionen von Rädern, deren übergeordnete die ist, Bewegung zu ermöglichen:

- Energieübertragung (Getrieberäder, Antriebsräder)
- Drehmoment- und Drehzahlwandlung (Unter- und Übersetzungsgetriebe)
- Dreh- bzw. Bewegungsrichtungsumkehr (Wendegetriebe, Seilrolle)
- Energieumwandlung (Pumpen- und Turbinenräder)
- Energiespeicherung und -Vergleichmäßigung (Schwungrad)

Das rollende Rad dient insbesondere der

- Kraftübertragung (Abstützen der Fahrzeugmasse auf der Fahrbahn)
- Energieübertragung (Antreiben und Bremsen des Fahrzeuges)
- Energieeinsparung (Reibung verringern)
- Lenkung und Seitenführung (von Fahrzeugen)
- Massen abfedern (Vollgummi- und Luftreifen)
- Schwingungen dämpfen (Vollgummi- und Luftreifen)
- Geräusch dämpfen (Vollgummi- und Luftreifen)
- Massenausgleich (bei [Dampf] Lokomotivrädern)
- Wärme abführen (Reibungswärme aus Bremsen; Wärme aus der Walkarbeit der Reifen)
- Arbeit leisten, Beispiele:
 - Kollergang: Ein Kollergang ist eine Zerkleinerungsmaschine, bei der sich auf einer kreisförmigen Bodenplatte

(Mahlbahn) zwei oder mehrere scheibenförmige Körper (Läufer) abwälzen und dabei das auf der Mahlbahn liegende Mahlgut erfassen und mittels ihres Gewichtes - und zusätzlich noch durch eine Kraft zur Erzeugung des Drehmomentes - zerkleinern.

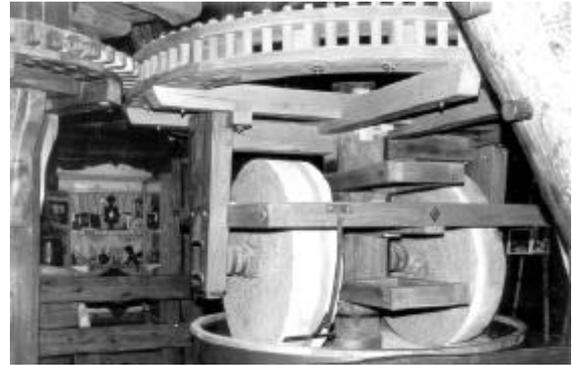


Bild 5 Kollergang, von einer Windmühle angetrieben

- Planierwalze: Zum Ebnen von Wegen und Straßen, aber auch von Feldern und Anbauflächen bedient man sich sogenannter Planierwalzen, die früher von Ochsespannen gezogen wurden, später mit Dampftrieb arbeiteten und heute ausschließlich mit Dieselmotoren.



Bild 6 Einfache Planierwalze aus Holz zum Ebnen von Feldern (Australien)

Diese mannigfaltigen Aufgaben lassen sich natürlich nicht mit einer ‚Einheitskonstruktion‘ erfüllen, sondern sie erfordern speziell auf die einzelnen Teilaufgaben abgestimmte Konstruktionen und Werkstoffe.

Kinematik

Die geometrische Grundstruktur des Rades ist der Kreis als Orts- oder Bestimmungskurve, auf der alle Punkte liegen, die von einem festen Punkt M (*Mittelpunkt*) den gleichen Abstand r (*Radius*) haben. Der Gleichgewichtszustand einer kreisförmigen Scheibe, des Rades also, ist indifferent. Beim Rollen auf einer ebenen Unterlage ändert sich die Höhenlage des Schwerpunktes nicht, die potentielle Energie des Rades bleibt konstant. Wenn das Rad über eine Unterlage rollt, dann dreht es sich um seinen Berührungspunkt mit der Unterlage. Dieser Drehpunkt ist „momentan“ (augenblicklich, vorübergehend) in Ruhe; er wird deshalb als *Momentanpol* bezeichnet. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass sich in ihm alle Bahnnormalen⁴⁾ schneiden. Die Lage des Momentanpols ist ein charakteristisches Merkmal für die Bewegungsart des Rades. Die Geschwindigkeit der einzelnen Punkte ergibt sich als (Vektor-)Produkt von Abstand zum Momentanpol und der Winkelgeschwindigkeit. Der Geschwindigkeitsvektor⁵⁾ steht immer senkrecht zu seinem Abstandsvektor. Man unterscheidet drei Möglichkeiten [6]:

- Der Momentanpol liegt im Radmittelpunkt, das Rad führt dann - ohne seine Lage im Raum zu verändern - eine reine Drehbewegung aus (*Rotation*). Für ein Fahrzeugrad würde das ein Durchrutschen bedeuten, für das *Maschinenelement* Rad ist das jedoch die häufigste Bewegungsart. Alle Punkte des Radumfanges haben, da vom Momentanpol gleich weit entfernt - nämlich um den Radius r - die selbe Geschwindigkeit $v = \omega * r$ [mit $\omega = 2 * \pi * n$]. Die Bewegung dieser Punkte und ihre Geschwindigkeitsvektoren sind - im Drehsinn - tangential gerichtet. Das bedeutet, dass sich im Durchmesser eines Rades gegenüberliegenden Punkte entgegengesetzt bewegen, erkennbar am Beispiel einer Seilrolle, bei der das Seil auf der einen Seite auf- und auf der anderen abläuft. Diesen Effekt hatten schon im 14. Jahrhundert Uhrenbauer intuitiv für die Spindelhemmung zunutze gemacht.

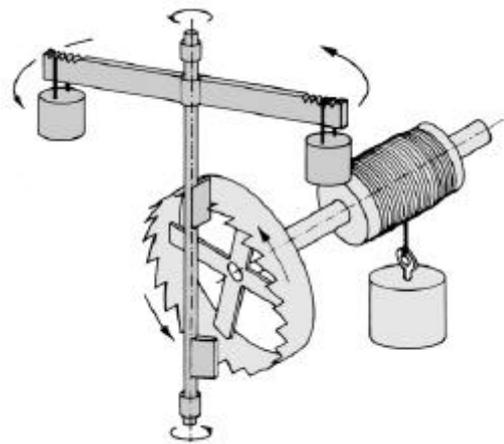


Bild 7 Spindelhemmung einer alten Uhr

Dieser Bewegungsablauf ist bei Fahrzeugrädern zu beobachten, wenn die Antriebskraft die Reibungskraft übersteigt und das Rad ‚schleudert‘: Lokomotive beim Anfahren auf schmierigen Schienen oder Kfz bei Glatteis!

- Wenn das Momentanzentrum im Unendlichen liegt, haben alle Punkte des Rades die selbe Geschwindigkeit; das Rad führt eine reine Translation aus, es *gleitet* ohne Drehung auf seiner Auflagefläche, wie z.B.

⁴⁾ Jeder Punkt eines bewegten Körpers verändert seine Lage auf einer Bahnkurve. Die Senkrechte in diesem Punkt auf die Bahnkurve ist die *Bahnnormale*.

⁵⁾ *Vektoren* sind gerichtete Größen, also solche, die nicht nur durch ihren Betrag (Zahlenwert), sondern auch durch die Richtung bestimmt sind. So sind z.B. Kräfte Vektoren, ebenso Geschwindigkeiten.

beim Bremsen mit blockierten Rädern. Für ein Rad ist das keine technisch sinnvolle Bewegung.

- Befindet sich das Momentanzentrum im Auflagepunkt des Rades auf der Ebene, dann *rollt* das Rad (‘reines Rollen’), es

führt eine Kombination von Rotation und Translation durch. Die Drehachse des rollenden Rades liegt senkrecht in der Ebene, auf der es abrollt. Der Drehpunkt, der Momentanpol, ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Bahnnormalen.

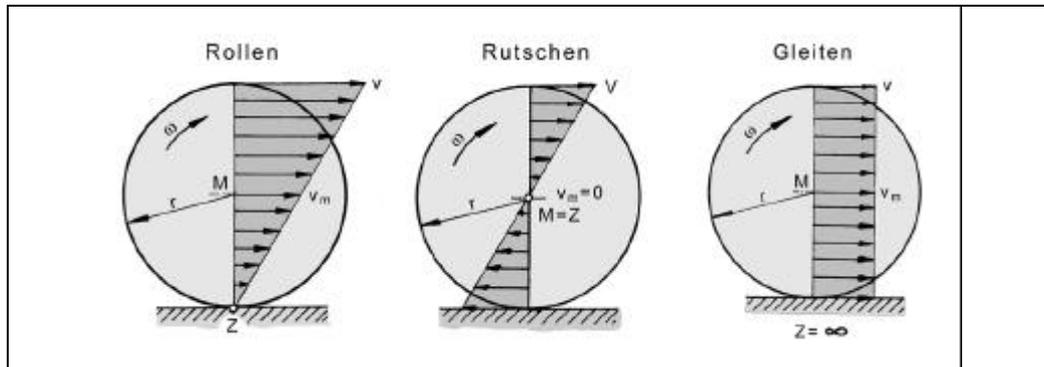


Bild 8 Der Bewegungszustand eines Rades ist durch die Lage seines Momentanpols Z gekennzeichnet. Ein Rad auf der Ebene kann rollen (Z ist der Auflagepunkt des Rades), gleiten (Z liegt im Unendlichen) und rutschen (Z liegt im Radmittelpunkt M)

Jeder Punkt des rollenden Rades hat der Größe und der Richtung nach eine andere Geschwindigkeit. Die Translationsgeschwindigkeit (Geschwindigkeit des Radmittelpunktes) ist $v = \omega * r$, die maximale Geschwindigkeit am Rad ist doppelt so groß, nämlich $v_{max} = 2 * r * \omega$.

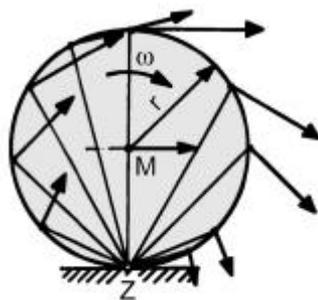


Bild 9 Jeder Punkt eines rollenden Rades hat eine andere Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsrichtung. Die Bahnnormalen schneiden sich im Momentanpol Z.

Aus diesen kinematischen Eigenschaften ergeben sich die unterschiedlichen Funktionen von Rädern. Bei einem rollenden Rad ist die Verbindungslinie (‘geometrische Ort’) aller Momentanpole in der ruhenden Ebene die Rastpolbahn, eine Gerade. In der bewegten Ebene,

dem Rade also, ist es die Gangpolbahn. Wenn die (bewegliche) Gangpolbahn auf der mit dem Koordinatensystem (fest) verbundenen Rastpolbahn ohne Gleiten abrollt, dann beschreibt ein mit der Gangpolbahn fest verbundener Punkt P eine Rollkurve⁶⁾. Im Falle des rollenden Rades, bei dem die Gangpolbahn eine Gerade und die Rastpolbahn ein Kreis ist, ist die Rollkurve eine Zykloide, die durch die Funktionen $x = r (\varphi - \sin\varphi)$ und $y = r (1 - \cos\varphi)$ beschrieben wird. Hierbei sind r der Radradius und φ der Rollwinkel. Die Periodenlänge der Kurve ist $2\pi r$. Liegt der betrachtete Punkt innerhalb der Radscheibe ($a < r$), z.B. das Ventil eines Rades, so bewegt sich dieser Punkt auf einer verkürzten Zykloide, liegt er außerhalb des Rades ($a > r$), z.B. die Spikes eines Reifens, dann durchläuft er eine verlängerte Zykloide.

⁶⁾ Rollkurven entstehen, wenn ein Kreis ohne zu gleiten an einer zweiten Kurve entlang rollt. Dabei werden die Koordinaten eines zum Kreis feststehenden Punktes innerhalb bzw. außerhalb der Kreisscheibe aufgetragen.

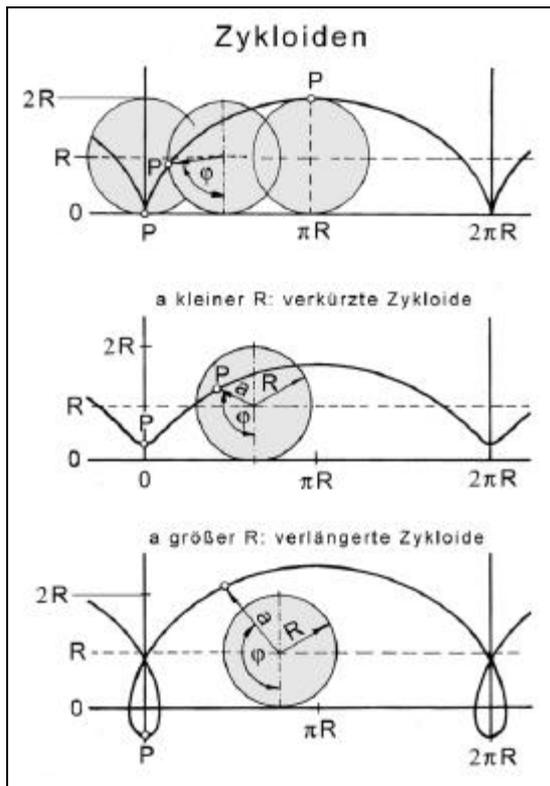


Bild 10 Wenn ein Kreis ohne zu gleiten auf einer Geraden abrollt (rollendes Rad auf der Ebene), dann beschreibt ein Punkt dieses Kreises als Rollkurve eine Zyklide

Das rollende Rad hat eine Reihe interessanter Eigenschaften, die - nicht nur - dem technischen Laien nicht ohne weiteres ersichtlich sind. In Übungen und Klausuren zu Physik- und Mechanik-Vorlesungen an Hochschulen sind Aufgaben über das rollende Rad ein unverzichtbares Mittel, das Verständnis der Studenten für grundlegende physikalische Vorgänge zu entwickeln und zu überprüfen. Bekanntes und immer wieder gerne angeführtes Beispiel ist das der *folgsamen* und der *unfolgsamen* Garnrolle. Je nach Anstellwinkel des Fadens lässt sich eine unter ein Sofa oder einen Schrank gerollte Garnrolle durch Ziehen am Faden aufrollen und damit wieder zum Vorschein bringen oder auch nicht. Die Begründung für dieses scheinbar widersprüchliche Verhalten ergibt sich durch Betrachtung der Bewegungsverhältnisse. Entsprechend dem

Angriffswinkel der Zugkraft ändert das Drehmoment seine Richtung [7].

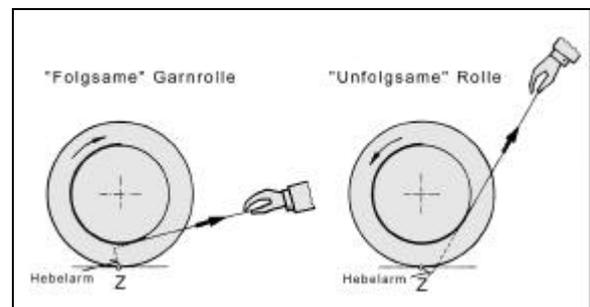


Bild 11 Je nach Angriffswinkel der Zugkraft am Faden einer Garnrolle rollt sich diese auf oder ab: "Folgsame" und "unfolgsame" Garnrolle

In diesem Zusammenhang sind auch die Probleme mit dem Transport von Tempelsäulen zu sehen, wie sie von dem römischen Architekten und Ingenieur VITRUV⁷⁾ beschrieben worden sind [8]:

Ein Unternehmer namens KTESIPHON (andere Schreibweise: CHERSIPHON) übernahm den Auftrag, die Säulenschäfte vom Marmorbruch zum *Diana-Tempel* in Ephesus zu schaffen. Da es sich hierbei um sehr schwere Lasten handelte, die der Untergrund wohl kaum tragen konnte, sah KTESIPHON davon ab, die Säulen mit einem Wagen zu transportieren, sondern lagerte die Säulen in Zapfen so in einem viereckigen Gestell aus Holzbalken, dass man Ochsen davor spannen konnte. Die Säulen rollten - sich um ihre Mittelachse drehend - auf dem Untergrund, wobei sich das Säulengewicht auf eine relativ große Auflagefläche verteilte und somit der Bodendruck in Grenzen hielt (Bild 12).

⁷⁾ VITRUVIUS MARCUS POLLIO, römischer Baumeister und Architekt, 1. Jahrhundert v. Chr. (genaues Geburts- und Sterbedatum unbekannt) war Militärtechniker im Heer von CÄSAR und AUGUSTUS. Er verfasste zehn Bücher *De Architectura* über die Technik und Architektur seiner Zeit.

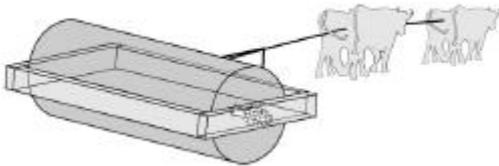


Bild 12 Transport der Tempelsäulen zum Diana-Tempel in Ephesus

Später übernahm KTESIPHON's Sohn METAGENES den Transport der (rechteckigen) Unterbalken für den Säulentempel, wobei er eine andere Lösung für den Transport finden musste, da die rechteckigen Unterbalken nicht auf dem Untergrund abrollen konnten. METAGENES lagerte die Enden der Unterbalken mittels Zapfen und Futter in großen Scheibenrädern, die er ebenfalls in einem vier-eckigen Gestell aus Balken so fasste, dass Ochsen gespanne die Last ziehen konnten.

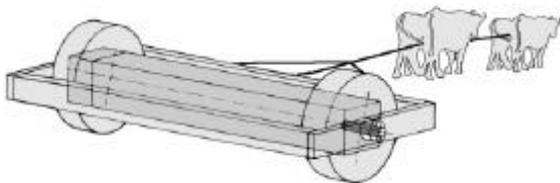


Bild 13 Transport der Unterbalken nach Vorschlag von Metagenes

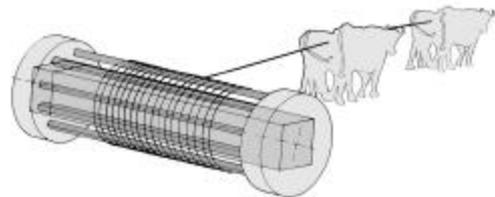


Bild 14 Transport der Unterbalken nach Vorschlag von Paconius

Als wiederum ein solcher Transport durchzuführen war, schlug ein PACONIUS eine, wie er glaubte, einfachere und deshalb billigere Lösung vor. Er lagerte die Enden der Unterbalken gleichfalls in großen Holzrädern, die er durch lange Vierkanthölzer miteinander verband. Um diese Vierkanthölzer wickelte er das Seil, an dem die Ochsen gespanne ziehen sollten. Es zeigte sich, dass solchermaßen kein kinematisch „sauberer“ Bewegungsablauf zu erzielen ist. Zum einen wickelte sich das Seil am oberen Umfang mit doppelter Translationsgeschwindigkeit der „Rolle“ ab, zum anderen ließ sich so kein befriedigender Geradlauf erzielen, weshalb das „Gefährt“ immer wieder in die richtige Richtung gebracht werden musste. Das alles verzögerte den Transport und ließ die Kosten so ansteigen, dass PACONIUS an diesem Auftrag bankrott ging.

Reibung

Voraussetzung für das Rollen ist Vorhandensein von Reibung, scheinbar paradox, denn jeder weiß, dass Reibung Bewegung be- und verhindert. In der Tat hat die Reibung ein Janus-Gesicht⁸⁾: Ohne Reibung gäbe es keinen Halt, aber ohne Reibung gäbe es auch keine Bewegung. Durch ausgeklügelte Konstruktionen sucht man allenthalben Reibung zu verringern, sei es, dass man durch Schmierung den Gleitvorgang erleichtert, sei es durch Übergang von der Gleit- zur Rollreibung, durch Verwendung des Rades also. Der energetische Vorteil des Schienentransportes gegenüber dem auf der Straße beruht auf der geringen Reibung zwischen Rad und Schiene. Andererseits muss der Lokomotivführer bei nassen oder schmierigen Schienen, sanden, d.h. Sand vor die Triebräder streuen, um einen schweren Zug überhaupt anfahren zu können. Reibung ist also ein vielschichtiger Vor-

⁸⁾ JANUS: Römischer Gott der Eingänge und Durchgänge (zeitlich und örtlich). Wegen der zwei Seiten von Durchgängen wird dieser Gott doppelgesichtig dargestellt. Der (doppelgesichtige) Januskopf gilt allgemein als Symbol das Zwiespaltes.

gang, der sich eben deshalb - auch heute noch - schwer dem Verständnis erschließen will: Haftreibung, Gleitreibung, Rollreibung, Trockenreibung, Flüssigkeitsreibung, Mischreibung usw. usf. Diese mannigfaltigen Erscheinungsformen von Reibung haben immer wieder zu Missverständnissen und Fehldeutungen geführt. Der Wissenschaftler GEORG VOGELPOHL⁹⁾ hat sich intensiv mit dem Phänomen der Reibung befasst hat und ihr Wesen mit wenigen Worten prägnant (kurz und treffend) beschrieben:

"...Die Reibung ruft weder eine Bewegung hervor, noch leistet sie Arbeit: Sie überträgt oder vermittelt Bewegung oder Arbeitsleistung, ohne selbst aktiv zu sein...Zur Übertragung von Bewegung und Energie ist Reibung jedoch notwendig, ihr kommt dieselbe Aufgabe zu wie den Zähnen eines Zahnradgetriebes..." [9].

So wie beim Drehen eines Kaleidoskopes das Bild zerfällt und dessen Elemente sich zu einer neuen Ansicht zusammenfügen, stellt sich Reibung vielschichtig dar, abhängig vom Blickwinkel, unter dem man sie betrachtet: Unter dem

- der Wirkung von Reibung in Gestalt von Kräften, Momenten und Prozessen der Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme,
 - der von ihr betroffenen Werkstoffe und Bauteilvolumina ("Zuordnung des geometrischen und stofflichen Bereiches der Reibungswirkung"),
- der Betrachtungstiefe: makroskopischer/ mikroskopischer Bereich,
- des Bewegungsablaufes: Ruhereibung/ Bewegungsreibung,
 - des Reibungszustand: Festkörper-, Flüssigkeits- und Gasreibung,
 - des Reibungsprozesses: stationäre/ instationäre Reibungsvorgänge und
 - der Reibungsart: Gleit-, Roll- und Bohrreibung [10; 11].

Um wieder auf das rollende Rad zu kommen: Voraussetzung für einen Rollvorgang ist Reibung, und zwar Haftreibung. Man stelle sich ein Rad auf einer schiefen Ebene - ohne Reibung - vor: Das Rad würde - ohne sich zu drehen - die Ebene herabgleiten. Reibung lässt das Rad gleichsam im Berührungspunkt an seiner Auflagefläche „haften“, sie stellt sozusagen einen archimedischen Fixpunkt dar. Dadurch rollt das Rad, sich um seinen Berührungspunkt mit der Ebene - dem Momentanpol - drehend, ab. Diese Vorstellung beruht darauf, dass Haften eine Folge der Oberflächenrauheiten von Rad und Auflagefläche ist. Je rauher diese sind, desto besser ist die Haftung. In gewissem Sinne trifft das zu, aber die Umkehrung, je glatter die Oberflächen, desto geringer die Haftreibung, stimmt nicht. So werden z.B. Kupplungsscheiben außerordentlich fein bearbeitet. Es müssen also noch andere Effekte wirksam sein. Nach heutigem Erkenntnisstand machen vor allem drei Erscheinungen die Haftreibung aus [12]:

- „Fortlaufende Bildung und Zerstörung von Schweißbrücken“: Infolge ihrer Rauheiten berühren sich die Teile nur punktuell, was zu sehr hohen Drücken führt. Dadurch verformen sich die Spitzen der Berührungsflächen plastisch und verschweißen (kalt) miteinander. Die darunter liegenden Partien haben sich elastisch verformt und „federn“ wieder zurück, was die Kaltschweißstellen wieder aufreißt.

⁹⁾ GEORG VOGELPOHL, 1900 bis 1975, Professor für *Maschinenelemente und Strömungslehre* an der TU Clausthal-Zellerfeld, war Leiter der Abteilung *Reibungsforschung* am *Max-Planck-Institut* und hat sich insbesondere auf dem Gebiet der Tribologie einen Namen gemacht.

- Die „Rauheitsgebirge“ der Berührungsflächen „verhaken“ sich ineinander, so dass es zu einer Art Formschluss der Oberflächen kommt, der immer wieder getrennt werden muss.
- Die ineinander „verhakten“ Rauheitsspitzen „fräsen“ sich bei Relativbewegung der Teile ihren Weg durch das Material.

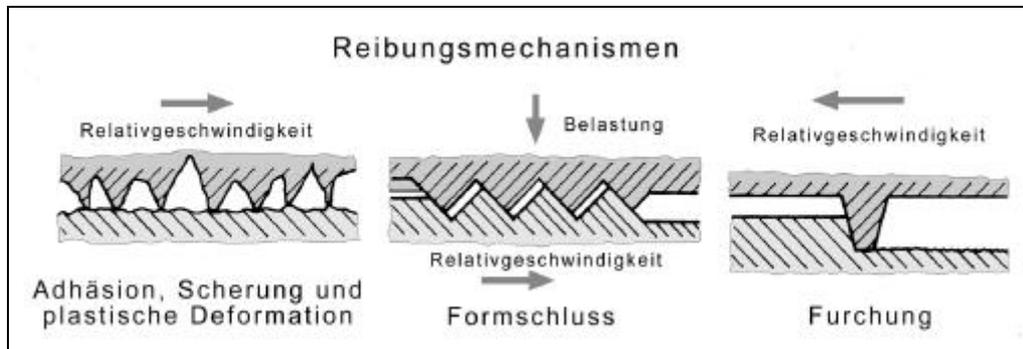


Bild 15 Reibung zwischen festen Körpern kommt durch unterschiedliche Mechanismen zustand: Adhäsion, Scherung und plastische Deformation, Formschluss und Furchung

Der erste dieser (mikroskopischen) Effekte ist kraftschlüssig, die anderen beiden formschlüssig. Bei makroskopischer Betrachtung hingegen werden harte und unverformte Berührungsflächen vorausgesetzt. In Wirklichkeit verformen sich Rad und Ebene gegenseitig: Das Rad drückt sich in den Untergrund ein, der Untergrund verformt die Auflage des Rades zu einer ellipsenförmigen Fläche. Die Berührungsfläche zwischen Rad und Untergrund verschiebt sich entgegen dem Drehsinn des Rades, wobei die Resultierende des Bodendruckes - nun gegen die Senkrechte geneigt - vor dem theoretischen Auflagepunkt des Rades angreift.

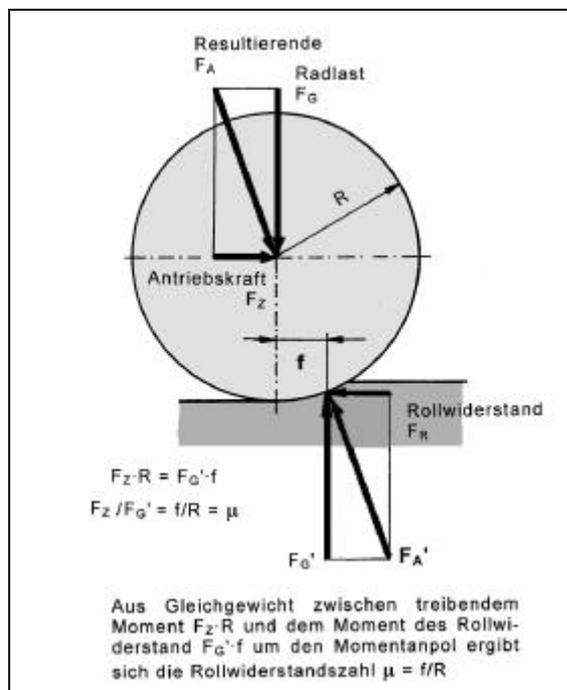


Bild 16 Kräfte am Rad

Das Moment dieser Kraft bezüglich des ideellen Momentanpoles ist das Moment des Rollwiderstandes. Aus dem Gleichgewicht zwischen treibendem Moment ($M_T = F_Z \cdot R$) und Moment des Rollwiderstandes ($M_{RW} = F_G \cdot f$) erhält man den Koeffizienten der Rollreibung $\mu_R = f/R$. Aus dieser Formel ist zu ersehen, dass dieser Koeffizient von der Radgröße beeinflusst wird. Diese Erkenntnis wurde schon früh aus der Praxis gewonnen. Tiergezogene Fahrzeuge hatten um so größere Räder, je weicher der Boden war, auf dem sie laufen mussten.



Bild 17 Diese Wasserbüffelkarre aus Thailand (Amphur Panasnikom, Provinz Chonburi) dient zum Transport von Ackergeräten und Reis. Wegen des weichen Untergrundes mussten die Räder groß genug gestaltet werden, um ein Vorwärtskommen überhaupt zu ermöglichen. Dieses Exemplar ist im Classic Center der Mercedes-Benz in Fellbach ausgestellt.

Das Rad erfährt somit einen Widerstand, den *Rollwiderstand*. Dieser hängt von Größe und Konstruktion des Rades ebenso wie von den Werkstoffen des Rades und seiner Unterlage ab. Bei der Paarung von Eisenrad und Eisenschiene ist er weniger ausgeprägt als bei elastischen Rädern (Luftreifen) auf nachgiebigem Untergrund.

Der Rollwiderstand nimmt mit der Geschwindigkeit zu. Um einen Eindruck der Größenordnungen von Rollwiderstandszahlen bei verschiedenen Verhältnissen zu vermitteln, sind nachfolgend einige Werte aufgeführt:

Beschaffenheit von Rad und Fahrbahn	Rollwiderstandszahl μ_R
Luftreifen auf Betonfahrbahn	0,015
Luftreifen auf festem Feldweg	0,05
Luftreifen auf Ackerboden	0,1 bis 0,35
Luftreifen auf weichem Untergrund	1,9
Stahlrad auf Stahlschiene	0,001 bis 0,002

Die Umfangskräfte infolge von Antriebs- oder Bremsmoment verformen das Rad – insbesondere das luftbereifte Rad - in Umfangsrichtung. Es bildet sich ein Wulst, beim treibenden Rad an der auflaufenden, beim bremsenden Rad an der ablaufenden Seite. Die Aufstandsfläche des treibenden Rades wird gestaucht, die des bremsenden gedehnt.

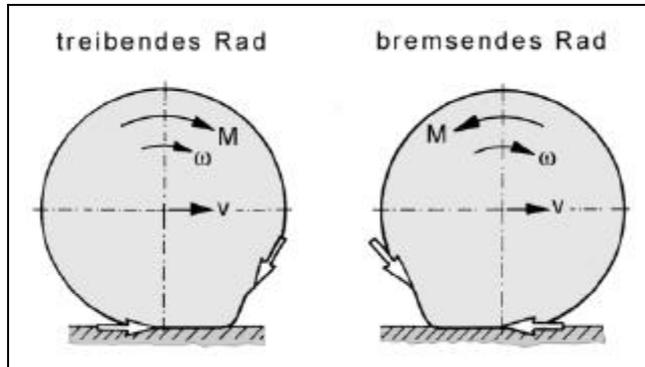


Bild 18 Die vom Brems- bzw. Beschleunigungsmoment herrührende Umfangskraft ist der von der Fahrbahn auf das Rad wirkenden Kraft jeweils entgegengerichtet, so dass der Radumfang beim Beschleunigen auf der auflaufenden, beim Bremsen auf der ablaufenden Seite gestaucht wird.

Als Folge dieser Verformungen legt das Rad pro Umdrehung eine andere Strecke zurück als seinem rechnerischen Umfang entspricht. Den Quotienten aus der Differenz von theoretischer und wirklicher Strecke zur theoretischen Strecke bezeichnet man als den Schlupf des Rades. Das Rad führt also keine „reine“ Rollbewegung aus, es rollt und gleitet, letzteres natürlich nur geringfügig; es vollführt eine *Wälzbewegung* [13].

Die Dampflokomotive und die von ihr gezogenen Eisenbahnwagen mit ihren großen Massen waren auf eine entsprechend tragfähige Fahrbahn angewiesen. Nur Eisenschienen („Eisenbahn“), später solche aus Stahl, waren in der Lage, die hohen Raddrücke aufzunehmen. Eben die hohe Tragfähigkeit der Eisenwerkstoffe ist Grund für die niedrigen Rollreibungswerte der Rad-Schiene-Paarung. Unter der Radlast verformen sich Eisenbahnrad und Schiene nur geringfügig. Andererseits begrenzt die niedrige Haftreibung zwischen Rad und Schiene die übertragbaren Zug- und Bremskräfte.

Kinetik

Am rollenden Rad treten verschiedene Kräfte auf, wobei hier lediglich ein Überblick über die statisch direkt am Rad angreifenden Kräfte gegeben werden soll. Diese Kräfte resultieren aus den primären Aufgaben des Rades:

- Abstützen des Fahrzeuges,
- Verringern der Reibung,
- Antreiben des Fahrzeuges,
- Bremsen des Fahrzeuges und
- Lenken und Spurhalten des Fahrzeuges.

Die Stützkkräfte sind das auf die Räder verteilte Fahrzeuggewicht. Gemäß *actio = reactio* gehören dazu die gleichgroßen, aber entgegengesetzten Normalkräfte („Auflagerkräfte“ der Fahrbahn). Stützkkräfte und ihre Reaktionen sind immer wirksam, ob das Fahrzeug in Bewegung ist oder ob es steht. Das

Rad ist auf der Achse oder mit der Welle [14]¹⁰⁾ im Achskörper in Wälzlagern oder Gleitlagern gelagert. Wälzlager übertragen die Stützkkräfte formschlüssig über Rollen, Kugeln oder kegelförmige Wälzkörper, Gleitlager kraftschlüssig über den Druck im Schmiermittel. Zusätzlich treten durch die Bewegung des Fahrzeuges Kräfte und Momente auf, es sind:

- die Zugkraft, von der das Rad in Fahrtrichtung gezogen wird,
- die (Haft-)Reibungskraft,
- das Rollreibungsmoment bzw. der Rollreibungswiderstand und
- das Lagerreibungsmoment.

Beim treibenden Rad kommt noch das Antriebsmoment hinzu. Da nun das Rad den Wagen zieht, kehrt die Zugkraft ihre Richtung gegenüber dem getriebenen Rad um. Entsprechend verhält es sich beim Bremsen [15;16].

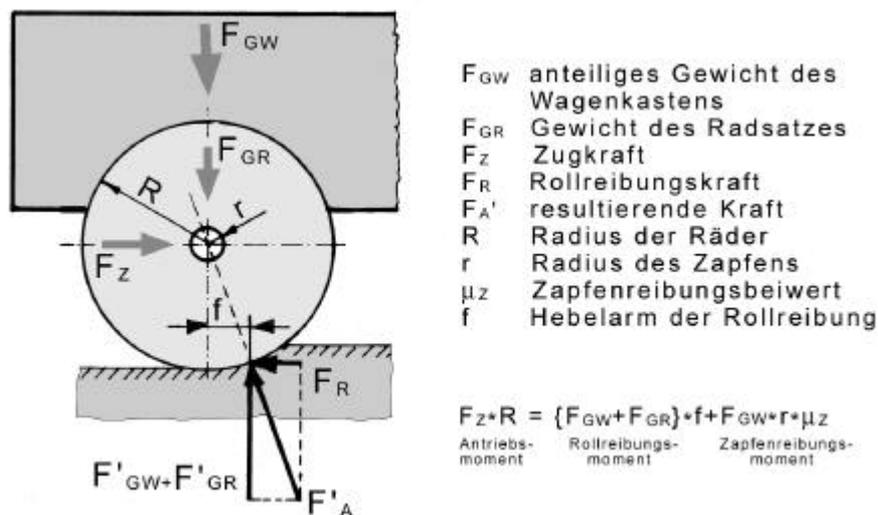


Bild 19 Die Zugkraft an der Achse eines Wagens muss den Rollwiderstand und die Zapfenreibung im Lager überwinden.

Wenn das Fahrzeug einen Anhänger zieht, dann werden die Räder zusätzlich durch ein Moment bzw. entlastet werden, das sich aus der Zughakenkraft des Anhängers und deren Abstand von der Fahrbahn ergibt.

Richtungsänderungen werden dem Fahrzeug entweder formschlüssig durch den Spurkranz des Rades und die Schiene aufgezwungen („spurgebundene Fahrzeuge“, vulgo: Schienenfahrzeuge) oder aber kraftschlüssig („ungeführtes Rad“) durch den Schräglauf des Rades. Hierzu muss ein wenig weiter ausgeholt werden: Ein (ungeführtes) Rad kann nur dann kraftschlüssig Seitenkräfte übertragen, wenn es um einen (kleinen) Winkel schräg zur Fahrtrichtung läuft (*Schräglaufwinkel*). Bei Betätigung der Lenkung vergrößert sich dieser Schräglaufwinkel, die hieraus erwachsende Seitenkraft führt das Fahrzeug in die gewünschte Richtung. Die übertragbare Radkraft ist durch Radlast und Reibungsbeiwert vorgegeben. Bei Geradeausfahrt wird hiervon nur ein kleiner Teil benötigt, so dass der Rest der Reibungskraft für die Seitenführung, insbesondere zum Lenken, zur Verfügung steht.

¹⁰⁾ Achsen dienen der Lagerung von ruhenden oder rotierenden Maschinenteilen, wobei sie sich selbst drehen oder aber stillstehen. Wellen hingegen dienen zur Übertragung von Drehmomenten; sie sind stets drehbeweglich.

Beim Bremsen hingegen soll ja eine möglichst große Bremskraft übertragen werden, dem entsprechend verringert sich die übertragbare Seitenführungskraft bis hin zum Extrem Null: Das Fahrzeug bricht aus der Spur aus. Im sogenannten Kraftschluss-Kreis (Kamm'scher Kreis¹¹⁾) lassen sich diese grundlegenden Zusammenhänge leicht erkennen.

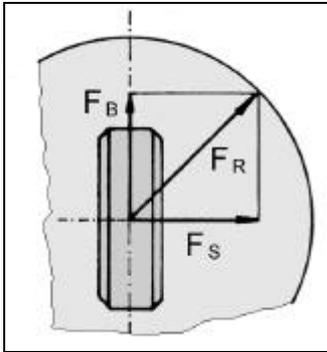


Bild 20 Der Radius des Kraftschlusskreises entspricht der unter den jeweiligen Bedingungen auf die Fahrbahn übertragbaren Kraft F_R . Diese setzt sich aus der Brems- bzw. Beschleunigungskraft F_B und der Seitenführungskraft F_S zusammen.

Die am Rad wirksamen Kräfte müssen - wie es in der Diktion der Techniker heißt - „in das Rad eingeleitet“ werden, und das kann an verschiedenen Stellen erfolgen.

- zentrisch, wenn die Kräfte bzw. Momente über eine Achse bzw. Welle eingeleitet werden. Das ist bei Rädern von Kraftfahrzeugen, Diesel- und Elektrolokomotiven und Eisenbahnwagen der Fall.
- exzentrisch: Die Antriebskräfte greifen an den Rädern in Gestalt der Treib- und Kuppelstangen in einem bestimmten Abstand zum Radmittelpunkt an und erzeugen so das Antriebsmoment (Dampflokomotiven; Elektro- und Diesellokomotiven älterer Bauart).
- am Radumfang: Zug- und Bremskräfte werden über den Radumfang auf die Fahrbahn übertragen; ebenso greifen der Rollwiderstand wie auch mittels Klotzbremsen erzeugte Bremskräfte am Umfang an.

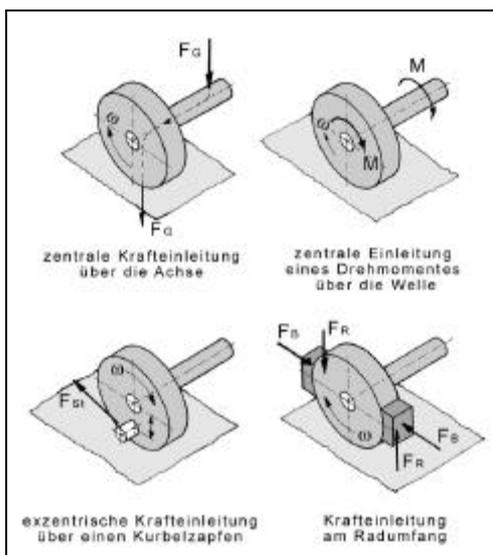


Bild 21 Krafteinleitung in das rollende Rad. Die Kräfte können zentral, peripher (am Umfang) oder exzentrisch in das Rad eingeleitet werden.

¹¹⁾ Benannt nach Prof. Dr.-Ing. E.h. WUNIBALD KAMM (1893 bis 1966). Prof. KAMM leitete das *Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren (FKFS)* an der TH Stuttgart

Der Kraftfluss innerhalb des Rades ist einleuchtend: Die Achskraft wirkt von der Radmitte, die Reaktionskraft der Fahrbahn (Normalkraft) wirkt von unten, das Rad wird „zusammengedrückt“. Sie wird auf Druck beansprucht. Ganz anders hingegen verhält es sich bei Drahtspeichenrädern. Die dünnen Drähte können weder Druck noch Biegung aufnehmen, sie würden sofort ausknicken, einzig auf Zug sind sie belastbar. Um bei vereinfachender Darstellung zu bleiben: Die Achslast „zieht“ an den oberen Speichen. Dieser Zug wird in den Radkranz eingeleitet. Von unten wirkt die Reaktionskraft („Normalkraft“), das Rad würde zusammengedrückt, wenn nicht die über den ganzen Radumfang konzentrisch angeordneten Speichen dieses verhinderten.

Rollende Räder haben wie alle bewegten Objekte eine kinetische Energie. Auf Grund seiner zweifachen Bewegung, Rotation und Translation, setzt sich die kinetische Energie des rollenden Rades aus der Translationsenergie $E_1 = (m/2) \cdot v^2$ und der Rotationsenergie $E_2 = I \cdot \omega^2$ zusammen. Die Radform beeinflusst über das Trägheitsmoment I das Verhalten des rollenden Rades. Lässt man von einer schiefen Ebene aus gleicher Höhe zwei Rollen gleichen Durchmessers und gleicher Masse, die eine ein Voll-, die andere ein Hohlzylinder, losrollen, dann kommt der Vollzylinder eher unten an. Er hat das kleinere Trägheitsmoment, so dass das in beiden Fällen gleiche Antriebsmoment, Hebelarm mal Rollengewicht, den Vollzylinder stärker beschleunigen kann.

Auf die Fahrbahn werden die Antriebs- und Bremskräfte übertragen entweder,

- **kraftschlüssig:** Darunter versteht man Kraftübertragung durch eine äußere Kraft, meist Reibkraft - aber auch Magnetkraft usw. Anschauliches Beispiel: Die Hose wird durch einen Gürtel gehalten. Technische Anwendung in Falle des Rades: Räder von Eisenbahn- und Straßenfahrzeugen (bei Straßenfahrzeugen werden auch die Lenkkräfte kraftschlüssig übertragen).



Eisenbahnrad auf Schiene

Kfz-Rad auf Straße

Bild 22

Kraftschlüssige Kraftübertragung

- **formschlüssig:** Formschluss erfolgt mechanisch durch „Mitnehmer“: Die zu verbindenden Teile sind durch korrespondierende (einander entsprechende) Gestalt (Klauen, Zähne, Passfedern) so ausgebildet sind, dass eine Bewegung beider Teile gegeneinander nicht möglich ist und infolge dessen Kräfte oder Drehmomente von einem auf das andere Teil übertragen werden können. Beispiel: Die Hose wird durch Hosenträger gehalten.

Technische Anwendung im Falle des Rades: Zahnradbahnen und Übertragung der Seitenführungs- und Lenkkräfte von Eisenbahnradern durch Schiene und Spurkranz sowie Räder mit Greifern. Die ersten schienengeführten Räder dürften die von Grubenhunten¹²⁾ gewesen sein,

¹²⁾ *Hunt* oder *Hund*: Wagen für den Transport im Bergbau. Angeblich rührt die Bezeichnung von dem knarrenden Geräusch dieser Wagen her, das dem Gebell von Hunden ähneln soll. Die Bezeichnung *Hund* hat zu Missverständnissen geführt, als man nach einem Bergwerksunglück leichtgläubigen Journalisten erzählte, die Katastrophe sei vorhersehbar gewesen, den ‚schließlich seinen die Hunde ganz unruhig gewesen und hätten warnend gebellt‘.

wie sie ab dem 15. Jahrhundert u.a. in transsylvanischen Bergwerken eingesetzt worden waren. Beim Rollen auf den Holzschienen nutzten sich die Holzräder der Hunte in der Mitte so ab, dass sich eine gewisse Führung des Rades dadurch ergab.



Transportfahrzeug mit Antrieb durch Zahnrad und Zahnstange an einem Weinberg an der Mosel.

Bild 23
Formschlüssige Kraftübertragung durch Zahnrad und Zahnstange



Bild 24
Formschlüssige Kraftübertragung durch Gleitschutzrad mit aufgesteckten "Schuhen" einer Zugmaschine im ersten Weltkrieg



Bild 25
Das erste schienengeführtes Rad eines Grubenhunts aus dem 15. Jahrhundert.

- kraft- und formschlüssig: Räder von Geländefahrzeugen. Der Formschluss zusätzlich zum Kraftschluss ist durch das grobstollige Profil der Geländereifen gegeben.



Bild 26 Kraft- und formschlüssige Kraftübertragung: Geländereifen eines Kfz mit Stollenprofil

- Schließlich gibt es noch den Stoffschluss mit Hilfe sich mit den zu vereinigenden Grundwerkstoffen unlösbar verbindender Zusatzwerkstoffe: durch Angießen z.B. im AlFin-Verfahren, Löten oder Schweißen. Für das Rad stellt der Stoffschluss keine Möglichkeit zur Kraftübertragung dar.

Da bei den meisten Rädern die Kräfte kraftschlüssig, d.h. durch (Haft-)Reibung übertragen werden, ist die übertragbare Kraft durch das Produkt aus Fahrzeuggewicht und Reibwert, begrenzt. Die Zugkraft am Radumfang beträgt $F_U = \mu_H \cdot (m \cdot g)$. Hierbei ist μ_H der Haftreibungskoeffizient und $m \cdot g$ das *Reibungsgewicht*, die Summe der Gewichte, mit denen sich die angetriebenen Räder auf der Fahrbahn abstützen. Der Haftreibwert μ_H hängt von der Materialpaarung von Rad und Unterlage, den tribologischen Bedingungen (Schmierung: Nässe, Glätte etc.), aber auch von der Geschwindigkeit ab. So nimmt bei der Paarung Eisenbahnrad/Schiene der Haftreibwert mit der sinkender Geschwindigkeit im Bereich kleiner Geschwindigkeiten zu. Das erklärt, warum ein Eisenbahnzug beim Anhalten bisweilen so stark ruckt: Auch wenn der Lokomotivführer gleichmäßig bremst, lässt mit abnehmender Geschwindigkeit der stark zunehmende Haftreibwert zwischen Klotzbremse und Rad die Bremskraft kräftig ansteigen. Übersteigen die Zug- oder Bremskräfte die Haftreibungskraft (*Reibungsgrenze*), dann drehen die Räder durch bzw. sie gleiten.

Welcher Autofahrer hätte das nicht schon selbst bei Glatteis in peinvollen Sekunden erlebt! Nun wäre es ein Leichtes, das Reibungsgewicht durch Vergrößern des Fahrzeuggewichtes zu erhöhen. Das tut man natürlich nicht: Größere Fahrzeugmassen bedeuten höhere Herstell- und Betriebskosten, zudem müssen diese Massen ja beschleunigt und abgebremst werden. Eleganter ist da das Erhöhen des Reibwertes, z.B. durch profilierte Luftreifen statt Vollgummireifen, was zwar infolge des etwas höheren Rollwiderstandes größere Antriebleistungen verlangt, wenngleich nicht in dem Maße, als wenn man das Fahrzeuggewicht vergrößert. Hier zeigt sich wieder die Ambivalenz (Zwiespältigkeit) der Reibung als Voraussetzung und gleichzeitig Hemmnis von Bewegung. Die Radlast, d.h. die von einem Rad auf den Boden übertragbare Kraft, richtet sich nach dem zulässigen Bodendruck. Wird dieser überschritten, dann sinkt das Rad ein, der Rollreibungswert nimmt stark zu, außerdem wird die Fahrbahn beschädigt. Um das zu vermeiden, vergrößert man die Auflagefläche des Rades durch:

- breite Räder: Eine naheliegende Lösung, die man schon bei Eisenrädern von Schwerlastwagen im 19. Jahrhundert (Museum Coalbrookdale Blist Hill) angewendet hatte.



Bild 27
Vergößerung der Auflagefläche des
Rades durch große Radbreite

Auch bei Traktoren, die auf besonders weichem Boden arbeiten müssen, vergrößert man die Radbreite, um den Bodendruck zu verringern.



Bild 28
Überbreites Traktorrad

- besondere konstruktive Maßnahmen wie am Rad angelenkte Bodenplatten, so dass die (theoretische) Linienberührung des Rades mit dem Untergrund in eine Flächenberührung umgewandelt wird. Dieser Lösung bediente man sich im ersten Weltkrieg bei schweren Geschützen wie der *Dicken Berta*¹³⁾, aber auch für friedlichere Anwendungen wie für einen überschweren 70-t-Traktor in Australien, der *Big Lizzie*.



Bild 29
Rad mit angelenkten
Bodenplatten: 70-t-Traktor Big
Lizie (1916)

Die konsequente Weiterentwicklung dieses Prinzips findet man bei den Laufwerken von Kettenfahrzeugen, bei denen nicht nur die Raddrücke durch die Kette auf eine große Fläche verteilt werden, sondern die sich solchermaßen ihren eigenen Fahrweg schaffen.

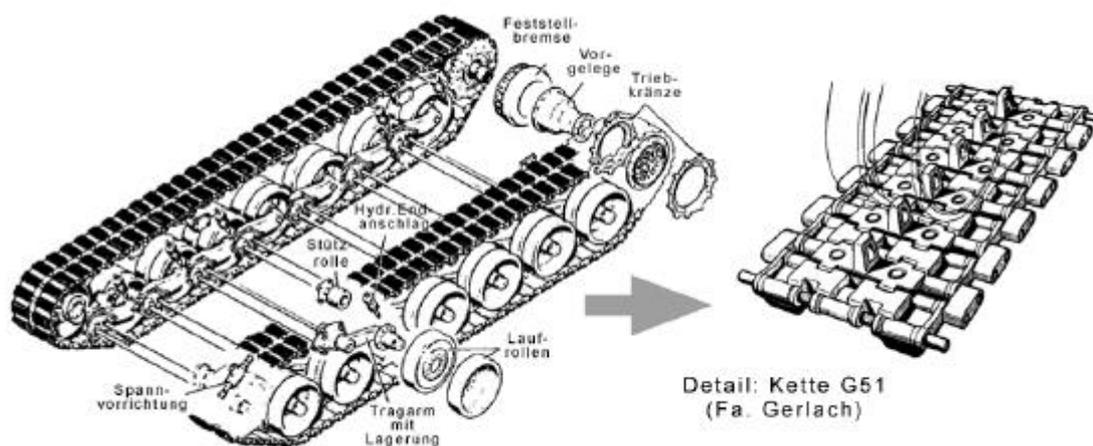


Bild 30 Verteilung der Raddrücke auf eine große Fläche: Panzerkette (Leopard 2)

¹³⁾ *Dicke Berta*: Spitzname für ein 42 cm-Steilfeuergeschütz (Mörser) der Firma *Krupp*, mit dem im ersten Weltkrieg schwer armierte Festungswerke sturmreif geschossen wurden.

- Zwillingsräder wie heute bei Nutzfahrzeugen allgemein üblich
- Absenken des Luftdruckes in den Reifen militärischer Geländefahrzeuge (Reifendruckregelanlage), wie erstmalig bei Fahrzeugen in der *Roten Armee* angewendet.
- Die Radlast wird bei großer Fahrzeugmasse durch Verteilung dieser auf viele Räder auf das zulässige Maß begrenzt. Insbesondere in den USA mit den in den einzelnen Bundesstaaten sehr unterschiedlichen gesetzlichen Vorgaben kann man solche Fahrzeuge, regelrechte Tatzelwürmer¹⁴⁾, bewundern.



Bild 31 Verteilung des Fahrzeuggewichtes auf viele Räder: US-amerikanischer Sattelzug

Für eine selbstangetriebene Schwerlasttransporter-Kombination mit einer Tragfähigkeit von 5.000 t entwickelte die schwäbische Firma *Scheuerle* Anfang der 1990er Jahre einen Modultransporter aus 28 selbstangetrieben vier- und fünfschigen Schwerlastfahrzeugen.



Bild 32 Scheuerle-Schwertransporter

¹⁴⁾ Tatzelwurm: Im Volksglauben der Alpenvölker: Lindwurm, Drachen.

Weil in den meisten Fällen die Radlast durch die Tragfähigkeit der Fahrbahn begrenzt, der Reibwert durch die jeweilige Materialpaarung (Stahl auf Stahl, Gummi auf Beton usw.) vorgegeben ist, versucht man die Zugkraft des Fahrzeuges durch konstruktive Maßnahmen zu beeinflussen und zu vergrößern.

Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Addition der Zugkräfte mehrerer Zugmaschinen



Bild 33

Addition der Zugkräfte mehrerer Zugmaschinen zum Transport überschwerer Lasten (hier: Transport eines Gasbehälters auf dem Stewart-Highway in Australien)

- Verteilung der Zugkraft auf mehrere Räder: Mehradantrieb. Die Zugkräfte der einzeln angetriebenen Räder addieren sich. Das einzelne Rad braucht insgesamt weniger Zugkraft zu übertragen, somit kann es mit größerem Abstand zur Reibungsgrenze „arbeiten“. Die Zugkraftverteilung kann auf verschiedene Weise erfolgen:
 - Kuppelung von Rädern mit dem Antriebsrad durch Kuppelstangen (Dampflokomotiven, Elektro- und Diesellokomotiven älterer Bauart.) Die Zugkraft der Lokomotive hängt von ihrem Reibungsgewicht ab, das sich auf die einzelnen Räder verteilt. Bei Antrieb von einem Radsatz kann man nur dessen Reibungsgewicht ausnutzen. Treibt man hingegen alle Räder an, dann erhöht sich die Zugkraft entsprechend. Ein solcher „Allradantrieb“ wird bei Dampflokomotiven durch Verbindung mehrerer Räder mittels Kuppelstangen erreicht.



Bild 34

"Allradantrieb" einer Dampflokomotive, Baureihe 52, durch Verbindung mehrerer Räder mittels Kuppelstangen.

- Mehrrad- bzw. Allradantrieb von Kraftfahrzeugen. Heute werden Kraftfahrzeuge vielfach aus modischen Gründen - unabhängig von einer tatsächlichen Notwendigkeit - mit Allradantrieb versehen (*Off-Roader; Utility Fun Vehicles*).



Bild 35

Bei Kraftfahrzeugen nutzt man das Reibungsgewicht aller Räder durch Einzelradantrieb ("Allradantrieb") aus.

- Belastung der antreibenden Hinterräder eines Fahrzeuges durch den Anhänger: Die angreifende Last des Hängers (Anhängerkraft F_Z) greift in der Höhe h über der Fahrbahn (und damit über dem Momentanpol der Räder) am Zughaken des Fahrzeuges an und übt dadurch das Moment M auf das Zugfahrzeug aus, das die Vorderräder ent- und die Hinterräder belastet.

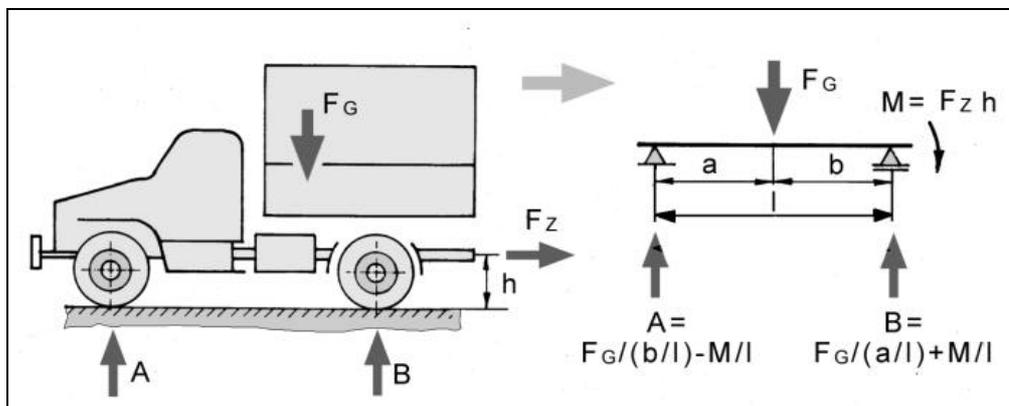


Bild 36 Zusätzliche Belastung der antreibenden Hinterräder eines Nutzfahrzeuges durch den Anhänger

- Die vorangehend beschriebene ungleichmäßige Achslastverteilung infolge einer Anhängelast ist bei allradangetriebenen Diesel- und Elektrolokomotiven unerwünscht, weil sie insgesamt die Zugkraft verringert. Abhilfe schaffen kann man durch eine „Tiefanlenkung“ des Lokomotivwagenkastens auf den Drehgestellen¹⁵⁾ [17]. Darunter versteht man, dass sich die Drehzapfen des Wagenkastens auf den Drehgestellen möglichst tief, also niedrig über der Schienenoberkante

¹⁵⁾ Diese Maßnahme wird aber nur bei langsamlaufenden Lokomotiven (z.B. Rangierlokomotiven) angewendet, weil das Fahrzeugverhalten auch durch dynamische Effekte beeinflusst wird und diese die positive Wirkung der Tiefanlenkung zunichte machen.

abstützen. Solchermaßen lassen sich die Achslasten vergleichmäßigen und die Zugkraft der Lokomotive erhöhen.

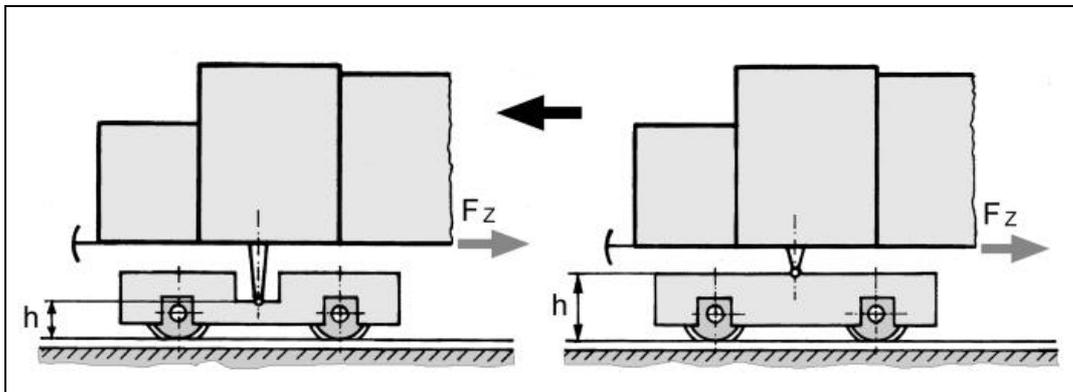


Bild 37 Tiefanlenkung einer Lokomotive

- Ausnutzen des Gewichtes des zu ziehenden Fahrzeuges zur Erhöhung des Reibungsgewichtes der Zugmaschine. Diese elegante Lösung beruht auf dem *Prinzip der Selbstverstärkung* [18] ¹⁶⁾: Zugmaschinen für große Flugzeuge („Jumbo“, Gewicht ca. 350 t) müssten entsprechend schwer sein, um das nötige Reibungsgewicht aufzubringen. Man nutzt nun das Flugzeuggewicht für das Reibungsgewicht der Zugmaschine aus, indem die Zugmaschine das Bugrad des Flugzeuges hydraulisch anhebt, so dass ein Teil des Flugzeuggewichtes über die Zugmaschine in die Fahrbahn geleitet wird [19]. Mit anderen Worten: Die zu ziehende Masse trägt zum Reibungsgewicht der Zugmaschine bei!



Bild 38 Flugzeugschlepper: Selbstverstärkende Lösung des Zugkraftproblems. Die zu ziehende Last trägt zum Reibungsgewicht der Zugmaschine bei.

¹⁶⁾ „Bei der selbstverstärkenden Lösung wird bereits unter Normallast die Hilfswirkung in fester Zuordnung aus einer funktionsbedingten Hauptgröße und/oder Nebengröße gewonnen, wobei sich eine verstärkte Gesamtwirkung ergibt...“

Auch Sattelschleppern liegt dieses Prinzip zu Grunde.



Bild 39 MAN-Panzerschlepper. Auch hier trägt die zu ziehende Last zum Reibungsgewicht der Zugmaschine bei

Konstruktive Entwicklung

Die konstruktive Entwicklung des Rades bezüglich seiner Funktionen lässt sich an Hand verschiedener Kriterien aufzeigen; den roten Faden durch die Entwicklungsgeschichte liefert jedoch der „Stand der Technik“. Dieser hat sich gleich zweifach auf den Werdegang des Rades ausgewirkt, nämlich durch

- die technischen Möglichkeiten einer Zeit, bestimmte Aufgaben zu lösen, durch
 - die Art der verwendeten Werkstoffe: Holz, Bronze, Eisen, Stahl und
 - die beherrschten Bearbeitungsverfahren: Drechseln, Gießen, Schmieden, Walzen etc.
 Werkstoff und Bearbeitungsverfahren beeinflussen sich gegenseitig, denn man kann nur solche Werkstoffe verwenden, die man auch bearbeiten kann. Umgekehrt ermöglichen neue Bearbeitungsverfahren auch den Einsatz anderer Werkstoffe. Wie sehr die Ausführung einer Konstruktion an den Stand der Technik, somit an eine bestimmte Zeit gebunden ist, kann man am Beispiel LEONARDO DA VINCIS sehen, dessen technische Phantasie seiner Zeit so weit voraus war, dass seine Entwürfe z.T. erst in unserem Jahrhundert verwirklicht werden konnten.
- Mit der Entwicklung neuer Antriebe und Fahrzeuge (Eisenbahn, Automobil), letztlich also wieder mit dem „Stand der Technik“, stiegen nicht nur die Anforderungen an das Rad, es kamen auch weitere hinzu:
 - Eisenbahn: höhere Geschwindigkeiten und Belastungen,
 - Fahrrad (Veloziped): geringe Masse bei großem Raddurchmesser, geringe Radlasten, genügende Federung und Dämpfung,
 - Kraftfahrzeuge: höhere Geschwindigkeiten bei Pkw, größere Radlasten bei Nkw, bessere Haftung, Verringerung des Geräusches, Verbesserung von Federung und Dämpfung zur Schonung von Fahrzeug, Ladung und Verkehrswegen.
 - Flugzeuge: hohe Beschleunigung des Rades: Wenn das Flugzeug beim Landen auf die Rollbahn aufsetzt, muss die Umfangsgeschwindigkeit der Räder des Fahrgestelles in kürzester Zeit auf die Landegeschwindigkeit des Flugzeuges gebracht werden.

- Rad und Fahrbahn als „kinematische Partner“ haben sich - unter der Prämisse jeweiliger Randbedingungen - gegenseitig beeinflusst.

Die geringe Geschwindigkeit der Pferdefuhrwerke, eine niedrige Verkehrsfrequenz unter den Randbedingungen unsicherer politischer, militärischer und wirtschaftlicher Verhältnisse waren Ursachen für schlechten Zustand der Verkehrswege bis weit in das 19. Jahrhundert hinein¹⁷⁾. Damit die Räder nicht zu tief einsanken, mussten sie eine gewisse Breite haben; in Hinblick auf den Rollwiderstand musste der Raddurchmesser groß genug sein. Massiv als Scheibenrad aus Brettern gefertigt, waren große und breite Räder schwer. Ungeachtet dessen waren sie einfach und überall herzustellen und konnten große Lasten aufnehmen. Deshalb wurden solche Räder noch bis in das 19. Jahrhundert hergestellt. Das gilt besonders für Auswanderer in Amerika, Afrika und Australien, wo man sich oft mit einfachsten Mitteln behelfen musste. Dementsprechend „roh“ sind auch die Räder für Schubkarren, Handwagen und Pferdefuhrwerke geraten.



Bild 40 Wo man sich mit einfachsten Mittel behelfen musste, entstanden solche ein- oder mehrteilig aus Holz gefertigte Räder. Links: Einteiliges Holzrad mit Eisenbandage, rechts: mehrteiliges Holzrrd (unbandagiert) im argentinischen Hochland (Molinos, Provinz Salta)



Bild 41
Schubkarre im Goldgräber-Museum
(Australien)



Bild 42
Einfache Schubkarre mit Scheibenrad

Aber auch im Europa in der Notzeit nach dem zweiten Weltkrieg begnügte man sich notgedrungenweise mit einfachsten Radbauarten (Bild 42).

¹⁷⁾ Andererseits haben gerade kriegerische Ereignisse, die Vorbereitung auf sie oder ihre Folgen, den Straßenbau gefördert: Man denke nur an die unter der napoleonischer Herrschaft in deutschen Ländern angelegten Chaussees mit ihren Baumreihen beiderseits oder an die im dritten Reich gebauten Autobahnen.

Natürlich suchte man deshalb nach Wegen, das Rad konstruktiv zu erleichtern, so z.B. durch Bohrungen in der Rad-scheibe, dann dadurch, dass man die Räder mehrteilig so zusammensetzte, dass sich gewichtssparende Zwischenräume zwischen den Radkomponenten ergaben oder aber dass man die Rad-scheibe dünner gestaltete als Kranz und Nabe. Der Schnitt durch ein solches Rad zeigt ein klassisches Doppel-T-Profil, bei dem die Scheibe den Steg, Radkranz und Nabe die Querbalken darstellen. Damit man sich zunutze, dass das Widerstandsmoment mit der Breite nur linear, mit der Höhe aber zum Quadrat zunimmt. Gleichzeitig gab es das Speichenrad, bestehend aus Nabe, Speichen und Radkranz.

Diese Bauweise ermöglichte größere Raddurchmesser und senkte damit den Rollwiderstand, zudem stellt das Speichenrad eine bezüglich Funktion, Festigkeit und Fertigung nachgerade optimale Konstruktion dar, deren Prinzip auch heute noch angewendet wird. Weil Radkränze aus Holz selbst bei den niedrigen Geschwindigkeiten eines Pferdeantriebes schnell verschlissen und häufig brachen, wurden sie armiert, in der Frühzeit des Rades mit Nägeln, später mit Eisenreifen, die gleichzeitig aus den mehreren Segmenten gefertigten Radkränzen Zusammenhalt gaben.

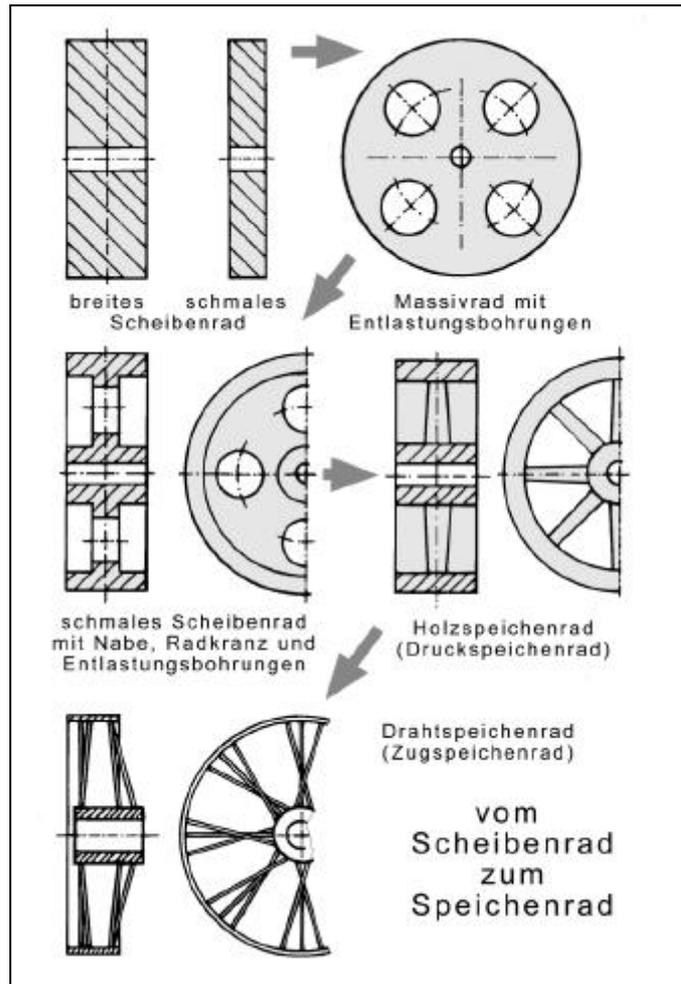


Bild 43 Die Entwicklung zum Speichenrad stellt sich - wie abgebildet - dar. Allerdings entspricht diese logische Reihenfolge nicht dem zeitlichen Werdegang. Speichenräder hatte es schon früh, Massivräder noch lange gegeben.



Bild 44

Holzspeichenrad eines Pferdewagens aus mehreren Segmenten mit Eisenbandage

In der Regel wurden die Räder drehbar auf der Achse befestigt und konnten so bei Kurvenfahrt mit unterschiedlicher Geschwindigkeit laufen. Nun treten überall dort, wo Teile relativ zueinander bewegt werden, Reibung und Verschleiß auf. Im Falle des Rades nicht nur an der Lauffläche, sondern auch in der Radlagerung. Deshalb wurde die Nabenbohrung mit Holz, Bronze-, Eisen- oder Messingbuchsen „gefuttert“ und die Lager geschmiert. Betrachtet man ein solches Rad aus dem Blickwinkel moderner Konstruktionstechnik, dann findet man in ihm eine Reihe aktueller Konstruktionsprinzipien verwirklicht:

- Prinzip der Aufgabenteilung: Die unterschiedlichen Funktionen des Rades lassen sich mit einfachen Konstruktionen nicht mehr erfüllen, so dass man sich Verbundkonstruktionen bedient, bei denen einzelne Funktionen durch hierfür speziell ausgelegte Komponenten bzw. besonders geeignete Werkstoffe wahrgenommen werden („Modulbauweise“). Die Funktionen *Verschleiß mindern* und *Zusammenhalt geben* wurden der Bandage (Eisenreifen) und der Lagerbuchse in der Nabenbohrung zugewiesen; Radkranz, Radstern und Nabe dienen der *Kraftübertragung* und die Funktion *Federung* wird von Gummireifen erfüllt.
- Prinzip der kurzen und direkten Kraftleitung: Kraftübertragung vom Radkranz über die der Radauflage nächsten Speichen zur Nabe,
- Prinzip des Kraftausgleiches durch zentral-symmetrische Anordnung der Speichen,
- Prinzip einfacher Fertigung und Montage: Das Speichenrad ließ sich „disloziert“ aus dem praktisch überall vorhandenen Werkstoff Holz herstellen und leicht reparieren.

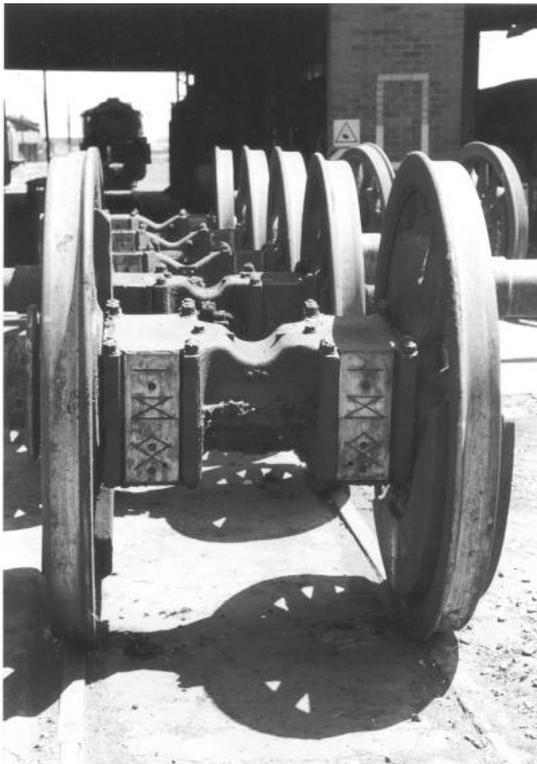


Bild 45 Die Spurkränze der Eisenbahnräder stellen sicher, dass die Räder auf den schmalen Schienen laufen und deren Richtungsänderungen folgen können.

Mit dem Aufkommen der Eisenbahn stiegen die Anforderungen an das Rad ganz erheblich. Es musste wesentlich größere Lasten aufnehmen und mit einem Vielfachen der bis dahin üblichen Geschwindigkeiten laufen. Mit Holzrädern das war nicht mehr möglich. Die Räder wurden jetzt aus Eisen gegossen, wie auch die Verwendung von Eisen für den Antrieb, die Lokomotive, diesem Verkehrsmittel seinen Namen, *Eisenbahn*, gab. Voraussetzung hierfür war ein entsprechender Fahrweg: hoch belastbar, aber so eben, dass Eisenräder mit ihrer geringen Elastizität, geringen Schluckvermögen für Stöße also, darauf laufen konnten, ohne dass Fahrzeug, Fahrgäste und Ladung unzumutbar durchgeschüttelt wurden.

Wegen der hohen Radlasten ist man auf entsprechend tragfähige Fahrbahnen aus Eisen bzw. Stahl für die Räder angewiesen, was dazu zwingt, diese nur so breit zu machen, wie es das Rad erfordert: Schienen! Bei so einer schmalen Radaufstandfläche ist natürlich ein Lenken im herkömmlichen Sinn, also durch Drehen der Achse oder der Räder einzeln, nicht mehr möglich.

Außerdem muss sichergestellt werden, dass die Räder auf ihrer schmalen Fahrbahn bleiben. Das erreicht man formschlüssig durch die Spurkränze jeweils innen am Rad. Damit

werden Schienenfahrzeuge (*spurgebundene Fahrzeuge*) von der Schiene über die Radkränze der Räder gelenkt.

Bei den Rädern hielt man sich zunächst an die gewohnte Bauart, nämlich die des Speichenrades.



Bild 46 Dieses verrostete Eisenbahn-Speichenrad aus dem 19. Jahrhundert vor dem Betriebsschuppen im Bahnhof Gernrode, einem Endpunkt der Selketalbahn im Harz, unmittelbar nach der Wende 1989 fotografiert, symbolisiert eindrucksvoll den Niedergang einer Eisenbahnepoche

(Dampf-) Lokomotiven bot das Speichenrad noch den konstruktiven Vorteil, dass man den für die Unwucht von Kurbelzapfen und Treibstangenanteil nötigen Massenausgleich durch Ausfüllen der Zwischenräume an geeigneter Stelle zwischen den Speichen vornehmen konnte.

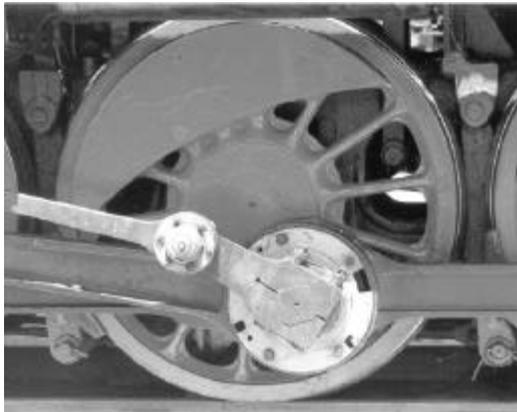


Bild 47 Die Speichenräder der Dampflokomotiven ermöglichen auf einfache Art den gewünschten Massenausgleich durch Ausfüllen von Zwischenräumen zwischen den Speichen.

Wiewohl aus Eisen, damit ungleich fester und härter als Holz, zeigte sich an den Eisenbahnradern bald erheblicher Verschleiß, so dass man auch deren Lauffläche mit einem verschleißfesterem Radreifen „bandagieren“, d.h. bewehren musste. Hierzu verwendete man Radreifen (Bandagen; alter Ausdruck aus dem Englischen: *Tyres*) aus Schweißeisen oder Puddelstahl, deren Stoß durch Feuer-schweißung verbunden wurde. Diese Schweißung erwies sich als Schwachstelle, es gab Verschleiß, es gab Brüche - oft mit katastrophalen Folgen! So war es ein großer Fortschritt, als es ALFRED KRUPP 1853 gelang, Radreifen nahtlos herzustellen¹⁸⁾. Heute sind Eisenbahnräder durchweg gerade oder gewellte Scheibenräder, aus Stahl gegossen oder geschmiedet, mit aufgeschrumpften nahtlosen

¹⁸⁾ Die drei schräg übereinanderliegenden Ringe des KRUPP'schen Markenzeichens sollen eben diese Radreifen symbolisieren. Das KRUPP'sche Verfahren bestand darin, einen rechteckigen Gussstahlblock aufzuspalten, und mit Keilen zu einem Ring aufzutreiben, der dann zum Reifen ausgewalzt wurde.

Radreifen. Eine ausgefallene Variante stellen hier Hohlspeichenräder für (Dampf-)Lokomotiven dar, wie sie in den USA Anwendung fanden.

Spurungebundene Fahrzeuge fahren auf unebenen Fahrbahnen und erleiden dabei - zunehmend mit der Geschwindigkeit - Stöße, die Passagiere durchschütteln, Fahrzeuge mechanisch beanspruchen, Fahrbahnen in Mitleidenschaft ziehen und störende Geräusche verursachen. Außerdem ist ein höherer Rollwiderstand zu überwinden. Bei den Geschwindigkeiten der Pferdefuhrwerke war das hinnehmbar, zudem man ohnehin keine Alternativen hatte.

Als Mitte des vorigen Jahrhunderts das Fahrrad entwickelt wurde, entstand der Wunsch, deren Fahrverhalten durch Eigenfederung der Räder zu verbessern. So ließ sich ein gewisser MEYER in Paris 1869 das „Suspensionsrad“ (Drahtspeichenrad) mit Vollgummireifen patentieren [20]. Die Vorteile einer Gummibereifung: gute Feder- und Dämpfungseigenschaften, ein Verformungsvermögen, dass kleinere Unebenheiten schluckt - waren so überzeugend, weil direkt spürbar, dass sich Gummireifen rasch durchsetzten.

Die Entwicklung von Drahtspeichenrädern für Fahrräder erklärt sich daher, dass es bei dieser Anwendungsart auf eine extrem leichte Bauweise ankommt, denn das Großrad von Hochrädern im vorigen Jahrhundert erreichte Durchmesser bis zu 2,30 m! Leichte Räder erhält man, wenn man das Prinzip des Speichenrades bis zum Extrem hin verwirklicht, d.h. die Speichen immer dünner macht.



Bild 48 Speichenrad eines Dreirad-Fahrrades

Das führt dann allerdings dazu, dass die Speichen die Druckbelastung nicht mehr aufnehmen können und ausknicken. Man muss deshalb das Wirkungsprinzip normaler Speichenräder, Kraftübertragung durch Druck, umkehren und die extrem dünnen Speichen auf Zug beanspruchen. Die Nabe des Rades wird mit den Speichen gleichsam am Radreifen aufgehängt¹⁹⁾. Da neben der Stützkraft auch Umfangskräfte, Beschleunigungs- und Bremskräfte, übertragen werden müssen, sind die Speichen in Umfangsrichtung gekreuzt. Drahtspeichenräder sind nicht nur leicht, sondern sie haben auch eine Eigenelastizität. Übrigens, um noch einmal auf LEONARDO DA VINCI und seine seiner Zeit vorausseilende Phantasie zu kommen: Es existiert von ihm die Skizze eines (Draht-)speichenrades aus dem Jahre 1490!

¹⁹⁾ Daher auch die Bezeichnung *Suspensionsrad* : *suspendere* (lat.) aufhängen

Die ersten Kraftfahrzeuge von GOTTLIEB DAIMLER/WILHELM MAYBACH und CARL BENZ waren motorisierte Kutschen; sie hatten noch Holzspeichenräder mit Eisenreifen. Doch schon der *Daimler-Stahlradwagen* von 1889 hatte - in Anlehnung an die Fahrrad-Räder - Drahtspeichenräder mit Vollgummireifen, der *Benz-Viktoria-Wagen* von 1893 war mit (voll-) gummibereiften Holzspeichenrädern versehen.

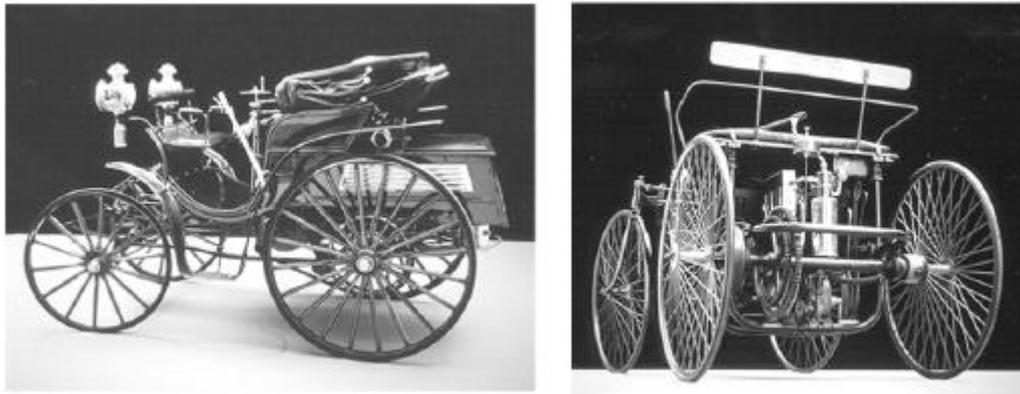


Bild 49 Räder früher Kraftfahrzeuge: Vollgummibereifte Holzspeichenräder (Benz-Viktoria-Wagen; 1893) und vollgummibereifte Drahtspeichenräder (Daimler-Stahlradwagen; 1889)

Wesentliches Entwicklungsziel bei Kraftfahrzeugen war die Geschwindigkeit. Da Kraftfahrzeugräder - selbst bei guten Straßenzustand - auf unebenen Fahrbahnen laufen, erwiesen sich die vom Kutschenbau übernommene Holzspeichenräder mit Eisenbandage als ungeeignet: Haftung und Spurhaltevermögen waren schlecht, ebenso das Federungsverhalten zum Ausgleich der Fahrbahnunebenheiten. Da die kinetische Energie mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt, mussten beim Automobil schon früh Maßnahmen ergriffen werden, die Fahrzeuge besser abzufedern. Wer sich von den Älteren noch an das Rumpeln von Pferdefuhrwerken mit stahlbereiften Holzrädern erinnert, kann sich unschwer vorstellen, welche Kakophonie (Missklang) tonnenschwere Nutzfahrzeuge schon bei geringen Geschwindigkeiten um 20 km/h verursachten. Außerdem beanspruchten die Stöße unelastisch bereifter Räder gleichermaßen Fahrzeug, Ladung und Fahrbahn. Mit der Fahrzeuggeschwindigkeit nahmen die Anforderungen an Verschleißwiderstand, Federung, Geräuschdämpfung und Seitenführung zu. Diese waren mit herkömmlichen Rädern nicht mehr zu erfüllen. Die Aufgaben mussten verschiedenen Komponenten des Rades aus für diese Aufgaben besonders geeigneten Werkstoffen zugewiesen werden. Der erste Schritt auf einem langen Entwicklungsweg bestand darin, dass man die Räder mit (Voll-)Gummi bandagierte.

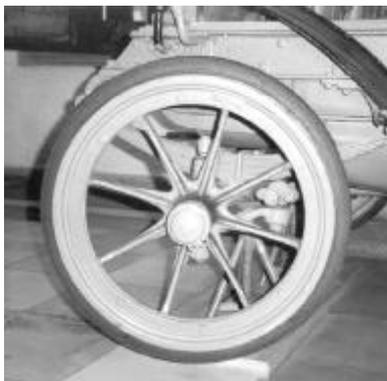


Bild 50 Modular, d.h. bestehend aus mehreren Komponenten aufgebautes Rad eines Lastkraftwagens der frühen 1920er Jahre, bestehend aus Radnabe mit Radstern, Radreifen mit Felge und Vollgummireifen

Der Vorteil von Gummireifen bestand darin, dass sie weicher sind, d. h. beim Überrollen von Unebenheiten, bei Stößen etc. einfedern und diese Arbeit in Wärme umwandeln. Damit liefen sie ruhiger, Stöße wurden gedämpft und die Haftung besser. Wenngleich (voll-) gummibereifte Räder das Fahrverhalten gegenüber eisenbandagierten Holzrädern wesentlich verbessert hatten, so waren die damit erreichbaren Geschwindigkeiten begrenzt, weil immer nur ein kurzer Reifenabschnitt als „stoßminderndes Kissen“ wirkte. Sollten die Kraftfahrzeuge schneller werden, musste das Fahrverhalten der Räder weiter verbessert werden. Eben in diese Richtung hin waren die Bemühungen des schottischen Tierarztes JOHN BOYD DUNLOP gegangen, als er für das Dreirad seines Sohnes Luftreifen, „luftgefüllte Kreisringkörper aus Geweben und Gummi“ [21], entwickelte. 1888 konnte DUNLOP ein diesbezügliches Patent anmelden, allerdings hatte schon 1845 ROBERT WILLIAM THOMSON einen Luftreifen erfunden, was aber in Vergessenheit geraten war.



*Bild 51
Replika des ersten Versuchsexemplars des
Luftreifens von John Boyd Dunlop (ausge-
stellt im British National Motormuseum in
Beaulieu*

Die Brüder EDOUARD und ANDRÉ MICHELIN trieben die Entwicklung des Luftreifens weiter und setzten ihn 1894 zum ersten Mal bei einem Kraftfahrzeug ein, ab 1897/98 wurden Luftreifen serienmäßig für Kraftfahrzeuge, d.h. Personenwagen und Krafträder verwendet. Die Vorteile von Luftreifen sind:

- gute Federung
- gute Haftung, d.h. bessere Übertragung von Umfangs- und Seitenkräften
- Geräuschdämpfung
- Schonung der Verkehrswege
- gute Wärmeabfuhr

Und wieder wird das Prinzip der Aufgabenteilung in der Auswahl von Werkstoff und Konstruktion erkennbar:

- Federung durch Luft und Dämpfung durch das Gummi
- kraftschlüssige Kraftübertragung durch Gummi
- formschlüssige Kraftübertragung durch Drahtspeichen-, Stahlblech- oder Aluminiumradscheiben und
- Wärmeabfuhr durch die Radscheibe bzw. das Speichenrad.

Das modulare Bauprinzip wurde nun bei Kraftfahrzeugrädern konsequent angewendet, was dazu führte, dass sich die Entwicklung und Fertigung der Radkomponente *Reifen* von denen des „eigentlichen“ Rades löste. Der Reifen bestimmte mit seiner Geometrie und seinen Eigenschaften immer mehr das Rad.



Bild 52 Kfz-Rad, demontierbar

Voraussetzung natürlich war, dass der Reifen die Luft hielt. Damit stand es anfangs aber schlecht. Empfindliche Reifen, unbefestigte Straßen und Hufnägel machten die Mitnahme von Ersatzrädern zu einem unbedingten *Muss!* Beiderseits in Einschnitten in den vorderen Kotflügeln untergebracht, verliehen sie den Fahrzeugen bis in die 1930er Jahre ein charakteristisches Aussehen; sie wurden auch ganz bewusst als Stilmittel eingesetzt.



Bild 53
Empfindliche Reifen und die vielen Hufnägel auf Straßen und Wegen verursachten häufig Reifenpannen, die zur Mitnahme von mindestens zwei Reserverädern zwangen.

Pannensicherheit und Lebensdauer waren deshalb vorrangige Entwicklungsziele der Reifenentwicklung. Dann wurden die Laufeigenschaften verbessert, einmal indem man die Reifen „weicher“ machte, d.h. das Reifenvolumen vergrößerte und den Luftdruck verringerte (von 4 bis 5 bar [Überdruck] auf etwa 3 bar), zum anderen dadurch, dass die Kraftübertragung durch Profilierung der Lauffläche verbessert wurde. Sicherere Führung, gleichmäßigere Abnutzung und weniger Geräusch waren die Ergebnisse. Die Reifengeometrie wurde stufenweise geändert, vom kreisförmigen Querschnitt über die sogenannten Ballonreifen zu Niederquerschnittreifen, zahlenmäßig ausgedrückt durch das Höhen-/Breiten-Verhältnis, das erst bei Werten knapp unter 1 liegend bis auf 0,5 verkleinert wurde [22].

Zuerst nur für Pkw und Zweiräder eingesetzt, wurden Luftreifen mit steigendem Entwicklungsstand auf für Nutzfahrzeuge interessant. Weil die Nfz-Räder durch den Luftreifen erheblich im Durchmesser größer wurden, sprach man auch von *Riesenluftreifen*.



Bild 54
"Riesenluftreifen" eines Mercedes-Benz N56 Nutzfahrzeugs von 1930

Die hohen Radlasten der Nutzfahrzeuge verlangten höhere Luftdrücke (um 7 bar). Diese wiederum ließen sich nur mit entsprechenden Wanddicken realisieren. Luftreifen sind nicht anderes als Luftfedern, deren Federcharakteristik von dem Luftdruck und damit von der Festigkeit des Hüllkör-

pers abhängt. Das Rad federt also entsprechend der jeweiligen Radlast und dem Luftdruck ein, was ihm eine größere Aufstandsfläche und gibt und seine Haftung verbessert. Die Tragfähigkeit eines Luftreifenrades hängt vom Luftdruck und von der Festigkeit der Karkasse ²⁰⁾ ab. Nun neigen Feder-Masse-Systeme wie Fahrzeug und Luftreifenrad bei Anregung durch die Unebenheiten der Fahrbahn zum Schwingen. Das beeinflusst das Eigenlenkverhalten des Fahrzeuges, auch mindert es den Kraftschluss zwischen Rad und Fahrbahn. Dem wirkt die Dämpfung ²¹⁾ des Luftreifens in gewissem Maße entgegen; die Dämpfungsarbeit wird in Wärme umgewandelt.

²⁰⁾ *Karkasse* (ital.) Gerippe, Gestell: Gewebeunterbau von Fahrzeug-Luftreifen

²¹⁾ Die Dämpfung ist auf Hysterese zurückzuführen, nämlich dass der Reifen beim Ein- und Ausfedern unterschiedliche Federwege hat. Die solchermaßen erzeugte Dämpfungsarbeit wird in Wärme umgewandelt.

Um die Reifenbeanspruchung zu verringern, senkte man die Radlasten durch Zwillingsräder oder/und eine dritte Achse („Dreiachser“) oder sogar vierte Achse. Der „Kampf“ zwischen Vollgummi- und Luftreifen beim Nutzfahrzeug verlief bis Mitte der 1920er Jahre unentschieden. Vollgummireifen erfuhren auf ebenen Fahrbahnen geringeren Rollwiderstand, bei unebenen liefen sie aber erheblich unruhiger. Eine ausgeprägte Profilierung („Elastikreifen“) sollte die Elastizität steigern. Da nun die Wärmeleitfähigkeit von Gummi vergleichsweise niedrig ist, erwärmten sich die Reifen bei Geschwindigkeiten über 25 km/h stark und zerstörten sich dadurch selbst.

Doch letztlich konnte sich die Luftbereifung auch im Nkw durchsetzen, weil sie Fahrzeug, Ladung und Verkehrswege schonte. Vergleichsmessungen, in den 1920er Jahren durchgeführt, ergaben, dass Erschütterungen, hervorgerufen durch einen ein Hindernis überfahrenden Lastwagen, bei Vollgummibereifung das Zweieinhalbfache der bei Luftbereifung betragen [23]. Nachdem schon in der „Vor-Luftreifen-Zeit“ (vergeblich) versucht wurde, das Federungsverhalten von Eisenrädern durch in Umfangsrichtung angeordnete Spiralfedern zu verbessern, zwang die als Folge der alliierten Blockade in Deutschland herrschende Notlage

Ermöglichten die Luftreifen höhere Fahrzeuggeschwindigkeiten, so führten Fortschritte im Kfz-Bau zu leichteren Fahrzeugen mit niedrigeren Radlasten. Dennoch haben heute selbst schwerste Fahrzeuge wie Muldenkipper im rauen Bergbaubetrieb Luftreifen.

im und nach dem ersten Weltkrieg zu Behelfslösungen solcher Art, die durch unzureichende Wirksamkeit und kurze Lebensdauer gleichermaßen gekennzeichnet waren [23; 24].



Bild 55
"Verbesserung" des Federungsverhaltens von Kfz-Rädern durch mechanische Federelemente



Bild 56
Muldenkipper in einer Uranmine bei Windhoek (Namibia)

Die Radabmessungen konnten verkleinert, der Fahrzeugschwerpunkt tiefer gelegt und die ungefederten Massen verringert werden. Rad, Reifen und Fahrzeug beeinflussten sich wechselseitig, dabei hat das Kfz-Rad verschiedene Entwicklungsstufen durchgemacht. Das leichte Drahtspeichenrad mit Vollgummibereifung war den Beanspruchungen der schneller werdenden Fahrzeugen nicht mehr gewachsen. Deshalb ging man zum Druckspeichenrad über, bestehend aus Holz-nabe und -Speichen mit aufgeschraubter Stahlfelge. Letztere nahm ihrerseits die eigentliche Reifenfelge auf. Weil sich bei diesen Rädern die Massen am Umfang konzentrierten, wiesen sie ein großes Trägheitsmoment auf. Da waren in dieser Hinsicht Drahtspeichenräder weit günstiger, ihre geringe Masse und ihr niedriges Trägheitsmoment empfahlen sie besonders für sportliche Fahrzeuge und Rennwagen. In diesem Zusammenhang sei daran erinnert, dass die kinetische Energie des rollenden Rades sich aus zwei Teilen, dem aus seiner Translation und dem aus der Rotation zusammensetzt, Einsparungen an Masse und Trägheitsmoment deshalb besonders lohnend sind. Außerdem war die Wärmeabfuhr von den Bremsen gut. Dank eines Zentralverschlusses konnte man das Rad rasch wechseln. In der Frühzeit des Automobils, als man wegen der damals noch bescheidenen Reifenqualität und des Straßenzustandes auf zwei oder mehrere Ersatzreifen/räder angewiesen war, erlaubte die geringe Masse des Drahtspeichenrades die Mitnahme von kompletten Ersatzrädern im Gegensatz zu Scheibenrädern, bei denen nur die Radreifen als Ersatz mitgenommen wurden. Drahtspeichenräder sind bei Kraftfahrzeugen ungleich höheren Beanspruchungen ausgesetzt als bei anderen Fahrzeugen. Zur Aufnahme der Beschleunigungs- und Brems- sowie Seitenkräfte wurden die Speichen in Umfangsrichtung auch in axialer Richtung in Dreiecksform verspannt, wobei es verschiedene Entwicklungsstufen gegeben hatte. Zur Aufnahme von Seitenkräften

erhielten die Räder zur Seite hin eine statisch bestimmte Dreiecksverspannung.

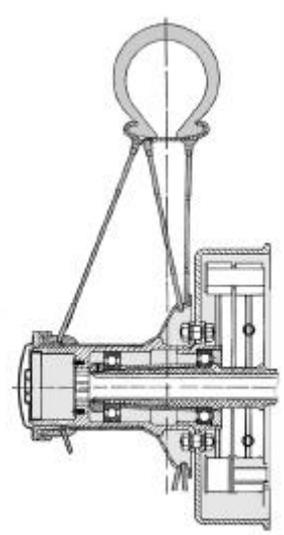


Bild 57 Erfolgreicher Hersteller von Drahtspeichenrädern für Kfz war die englische Firma Rudge-Witworth

Die Verbindung der Speichen mit Felge und Nabe erfolgte durch Nippel, Vernieten oder in der Großserie (USA) auch durch Verschweißen, wobei die Nippelverbindung eine reparaturfreundliche Lösung darstellt. Parallel dazu kamen die Stahlspeichenräder auf, die - im Pressverfahren hergestellt - aus zwei Hälften zusammengesetzt wurden, wobei man bei einigen Konstruktionen die Hohlspitzen mit Holz füllte. Gleichzeitig entstanden Stahlscheibenräder, deren Scheibe - im Gegensatz zu heute - fast eben ausgebildet war. Rad-scheibe und Felge wurden miteinander vernietet, später dann verschweißt. Auf Demontierbarkeit der Felge vom Rad war bewusst verzichtet worden, weil Räder mit abnehmbaren Felgen höhere Trägheitsmomente haben. Ebene Scheibenräder haben eine geringe Quersteifigkeit (Bild 58);

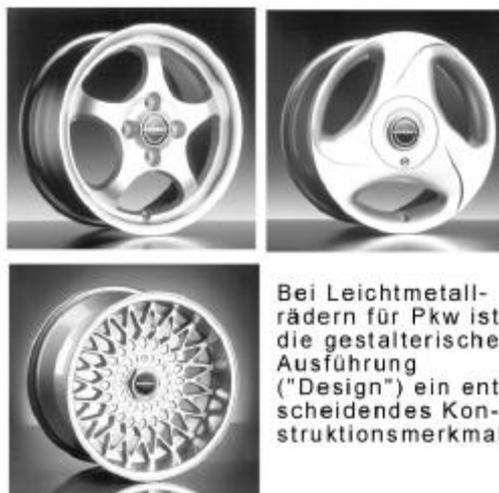


Bild 58
Scheibenrad eines Kfz (Citroen) der 1920er Jahre

diese erhöhte man durch gewellte Radprofile, bis sich die Räder im Laufe der Zeit völlig der Form der Radnaben anpassten: Schüsselräder. Pkw-Räder werden heute einteilig hergestellt, mit unterschiedlichen Radschüssel- und Felgenformen: Tiefbett- bzw. Halbtiefbettfelgen. Nfz-Räder sind naturgemäß kräftiger und steifer, sie sind als Scheibenrad aus gepresstem Stahlblech mit unterschiedlicher Profilierung, teils ohne, teils mit Gewichtsentslastung durch Bohrungen, Schlitzte oder Spalte ausgebildet, oder aber als Stahlguss-Speichenrad mit einteilig gegossenem Radstern und Nabe und angeschraubter Felge. Sie haben mehrteilige Felgen, weil die Reifen wegen ihres steifen Wulstes bei Montage und Demontage nicht über den Felgenrand gezwängt werden können. Im Laufe der Zeit ist eine schier unübersehbare Vielfalt an Felgenkonstruktionen entstanden. Die Felgen können in Längsrichtung geteilt sein, oder aber in Umfangsrichtung, wie z.B. die von der *Georg Fischer AG* entwickelten *Trilex*-Räder. Bezüglich der Felgenform unterscheidet man Schrägschulter-, Halbtiefbett-, Steilschulter- oder Flachbettausführungen [25].

Der vielfältige Einsatz von Leichtmetalllegierungen im Flugzeug-, Fahrzeug- und Motorenbau in den 1920er und 1930er Jahren bewies, dass solche Werkstoffe für sicherheitsrelevante Bauteile geeignet sind. Damit war der Weg zum Leichtmetall-Fahrzeugrad geebnet. Nicht nur für Pkw (*Bugatti*), sondern auch für schwere Nutzfahrzeuge wurden sie von *Georg Fischer* entwickelt. Ab den 1960er Jahren

setzte sich Leichtmetall zunehmend als Werkstoff für Fahrzeugräder durch, insbesondere für sportliche Fahrzeuge und solche der gehobenen Preisklasse; mittlerweile sind Leichtmetallräder weit verbreitet und stellen keinen besonderen „Luxus“ mehr dar. Spielen bei Pkw-Rädern ästhetische Gründe eine gewichtige Rolle,



Bei Leichtmetallrädern für Pkw ist die gestalterische Ausführung ("Design") ein entscheidendes Konstruktionsmerkmal

Bild 59
Leichtmetallräder für Pkw unterschiedlicher Ausführungsart, Bauart Borbet

so stehen bei Nutzfahrzeugen die kleinere Masse und die bessere Wärmeleitfähigkeit im Vordergrund ²²⁾. Gewichtsoptimierte Leichtmetall-Räder sind bis zu 40 % leichter als vergleichbare Stahlräder [26].



Bild 60 Leichtmetallrad für Nkw, Bauart Borbet

²²⁾ Um *Totgewicht* zu Gunsten von Nutzladung zu sparen, verzichten viele Nutzfahrzeugbetreiber sogar auf die Mitnahme eines Ersatzrades.

Wenngleich sich in den hochindustrialisierten Ländern das Kraftfahrzeug mit Stahl- bzw. Leichtmetallrädern als Transportmittel durchgesetzt hat, so gibt es dennoch „Zeitnischen“, in denen sich Pferdewagen als Personen- wie als Lastwagen bis heute gehalten haben, so in den USA, wo die Glaubensgemeinschaft der *Amish* – allem Fortschritt abhold – weiterhin der altbewährten Technik bedienen.



Bild 61

Pferdewagen mit Speichenrädern und Vollgummibelag werden heute noch von den Amish in den USA verwendet.

Zusammenfassung

Mit dieser Darstellung von Eigenschaften, Fähigkeiten und Konstruktionen (rollender) Rädern soll ein Überblick über eines der bemerkenswertesten Maschinenteile überhaupt gegeben werden, das - ohne dass wir uns darüber Gedanken machen - eine Grundlage unserer Zivilisation und Kultur ist. Die „Leistungen“ des Rades sind so selbstverständlich, dass man sie gar nicht wahrnimmt. Erst wenn man das Rad „ersetzen“ will, wird deutlich, welchen ungeheuren Aufwand man hierzu treiben muss. Die Magnetschienenbahn *Transrapid* ist das beste Beispiel dafür. Milliarden von DM mussten in Forschung und Entwicklung investiert werden, nur um die Funktionen *Abstützen, Führen, Übertragung von Beschleunigungs- und Bremskräften* auf elektromagnetischem Wege darzustellen. Aufwendige Regelungen müssen gewährleistet sein, nur damit das Fahrzeug das „tut“, was sich auf Grund der Radgeometrie von selbst ergibt!

Literatur:

-
- [1] **Kluge:** Etymologisches Wörterbuch der Deutschen Sprache. 22. Aufl. Berlin: de Gruyter 1989
 - [2] **Pfeiffer, W.:** Etymologisches Wörterbuch des Deutschen. 2. Aufl. Berlin]: Akademie-Verlag 1993
 - [3] **Allgemeinen Realienencyclopädie** für das katholische Deutschland. Regensburg: Verlag von Georg Josef Manz 1848
 - [4] **Meyers Konversationslexikon.** Leipzig: Verlag des Bibliograph. Institutes 1889, 13. Band; S. 535
 - [5] **Meyers Enzyklopädisches Lexikon.** Mannheim: Bibliograph. Inst. 1977
 - [6] **Gummert, P.; Reckling, K.-A.:** Mechanik. Braunschweig: Fried. Vieweg
 - [7] **Pohl, R.W.:** Mechanik, Akustik und Wärmelehre. 18. Aufl. Berlin: Springer 1983
 - [8] **Vitruvius, Marcus Pollio:** Baukunst, 2. Band. Übersetzung von A. Rode von 1796 G.J. Göschen. Reprint: Basel: Birkhäuser 1995; S. 251 - 255
 - [9] **Vogelpohl, G.:** Geschichte der Reibung. Technikgeschichte in Einzeldarstellungen Nr. 35. Düsseldorf VDI 1981; S. 62
 - [10] **Fleischer, G.; Wamser, H.:** Terminologie "Reibung und Verschleiß", Teil I bis VI. Schmierungstechnik 3 81972) 7 bis 12
 - [11] **DIN 50 323** Teil 3 Tribologie: Reibung
 - [12] **Krause, H.:** Vorlesung Reibungslehre (Reibungsmechanik) RWTH 1980
 - [13] **Bussien:** Automobiltechnisches Handbuch, Bd. 2. 18. Aufl. Berlin: Herbert Cram/de Gruyter 1965
 - [14] **Wächter, K.:** Konstruktionslehre für Maschineningenieure. Berlin: VEB Technik 1987; S. 546
 - [15] **Szabó, I.:** Einführung in die Technische Mechanik. 4. Aufl. Berlin: Springer 1959
 - [16] **Szabó, I.:** Repertorium und Übungsbuch der Technischen Mechanik. Berlin: Springer 1960
 - [17] **Pestel, E.:** Technische Mechanik, Teil 1: Statik. Mannheim Bibliograph. Institut 1969
 - [18] **Pahl, G.; Beitz, W.:** Konstruktionslehre. 3. Aufl. Berlin: Springer 1993; S. 306
 - [19] Krauss-Maffei Verkehrstechnik GmbH: Flugzeugschlepper. Signet 4.0 B 1. Auf. 12/88
 - [20] **Andric, D.; Gavric, B.:** Das Fahrrad. Stuttgart: Parkland 1991
 - [21] **Lueger.** Lexikon der Technik. Reinbeck: Rowohlt TB-Verlag 1971. Fahrzeugtechnik Bd. 3; S. 404
 - [22] **Weber, G.; Zoeppritz, H.P.:** Zur Entwicklungsgeschichte der Kraftfahrzeugbereifung. ATZ 64 (1962) 9
 - [23] **Buss, H.:** Aus der Entwicklung der Räder für Lastkraftwagen und Omnibusse. Schaffhausen (Schweiz). Hrsg. Georg Fischer Aktiengesellschaft 1952
 - [24] Heinrich Büssing und sein Werk. Hrsg. Automobilwerke H. Büssing A.-G. Braunschweig 1927
 - [25] Mannesmann Kronprinz AG: Technisches Handbuch. Ausgabe 1989/90. Signet: 1-3730-000/068906
 - [26] Leichtmetallräder für Nutzfahrzeuge. Firmenschrift Borbet GmbH

Zum Nach- und Weiterlesen:

- Buss, H.: Aus der Entwicklung der Räder für Lastkraftwagen und Omnibusse. Schaffhausen (Schweiz). Hrsg. Georg Fischer Aktiengesellschaft 1952
- Dinkel, J.: Wagenmoden im Biedermeier. Dortmund: Harenberg Kommunikation 1981. Die bibliophilen Taschenbücher Nr. 239
- Reimpell, J.; Sponagel, P.: Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Aufl. . Würzburg: Vogel Buchverlag 1988
- Smith, D.J.: Discovering Horse-drawn Vehicles. Buckinghamshir: Shire Publications Ltd. 1994
- Staudner, F.: Rad und Wagen. Darmstadt Hrsg. Carl Schenck AG 1989
- Tarr, L.: Karren Kutsche Karosse – Eine Geschichte des Wagens, 2. Aufl. Budapest: Corvinia 1978
- Treue, W.: Achse, Rad und Wagen, 2. Aufl.: Göttingen: Vandenhoeck & Rupprecht 1986
- Ruppelt, G. (Hrsg.) Das Rad - Symbol und Mechanik. Ausstellung in der Bibliotheka Augusta 1992. Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel 1992

Quellenverzeichnis der Bilder:

- | | |
|-------------------------------|---|
| Borbet: | 59; 60 |
| British National Motormuseum: | 51 |
| Büssing: | 24 |
| Högfeldt | 3 |
| Krauss-Maffei: | 38b |
| MAN: | 26; 35; 39 |
| Mercedes-Benz Archiv: | 49; 53 |
| Mercedes-Benz Classic Center: | 17; 54 |
| Sammlung Hochhut: | 48; 58 |
| Scheuerle: | 32 |
| Time/Life: Der geheime Krieg | 2 |
| Verkehrsmuseum Dresden: | 25 |
| Wehrtechnik: | 30 |
| Zima: | 1; 4; 5; 6; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 16; 16; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 27; 28; 29; 31; 33; 34; 36; 37; 38a; 40; 41; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 50; 52; 55; 56; 57; 61 |