

Ein nicht korrekt eingestelltes Fahrwerk bringt nicht nur auf der Rennstrecke erheblichen Zeitverlust, sondern macht sich auch im Straßenverkehr negativ bemerkbar: Ein schlecht abgestimmtes Fahrwerk ist immer ein Sicherheitsrisiko, egal bei welcher Geschwindigkeit. John Robinsons Buch hilft allen Motorradfahrern, die mit dem Fahrverhalten Ihrer Maschine unzufrieden sind. Es bietet zahlreiche Tips und Anregungen, erklärt zunächst die theoretischen Grundlagen und gibt dann handfeste Ratschläge, um der Maschine das Wackeln, Flattern oder Pendeln abzugewöhnen.

Motor  
buch  
Verlag

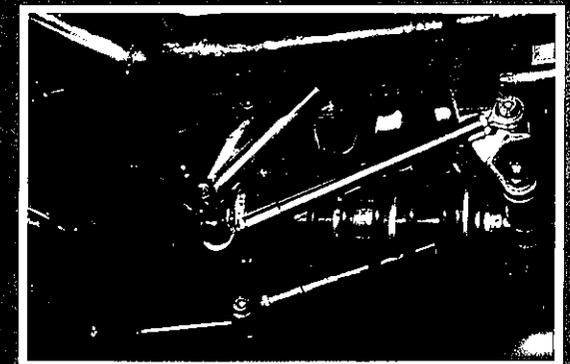
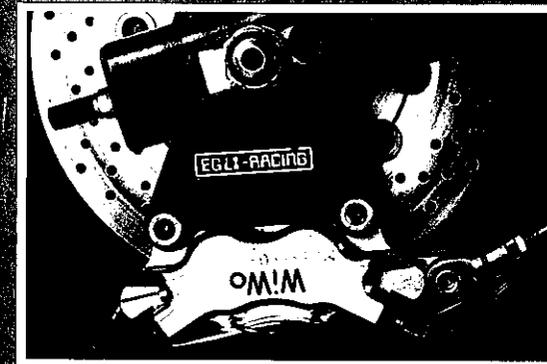
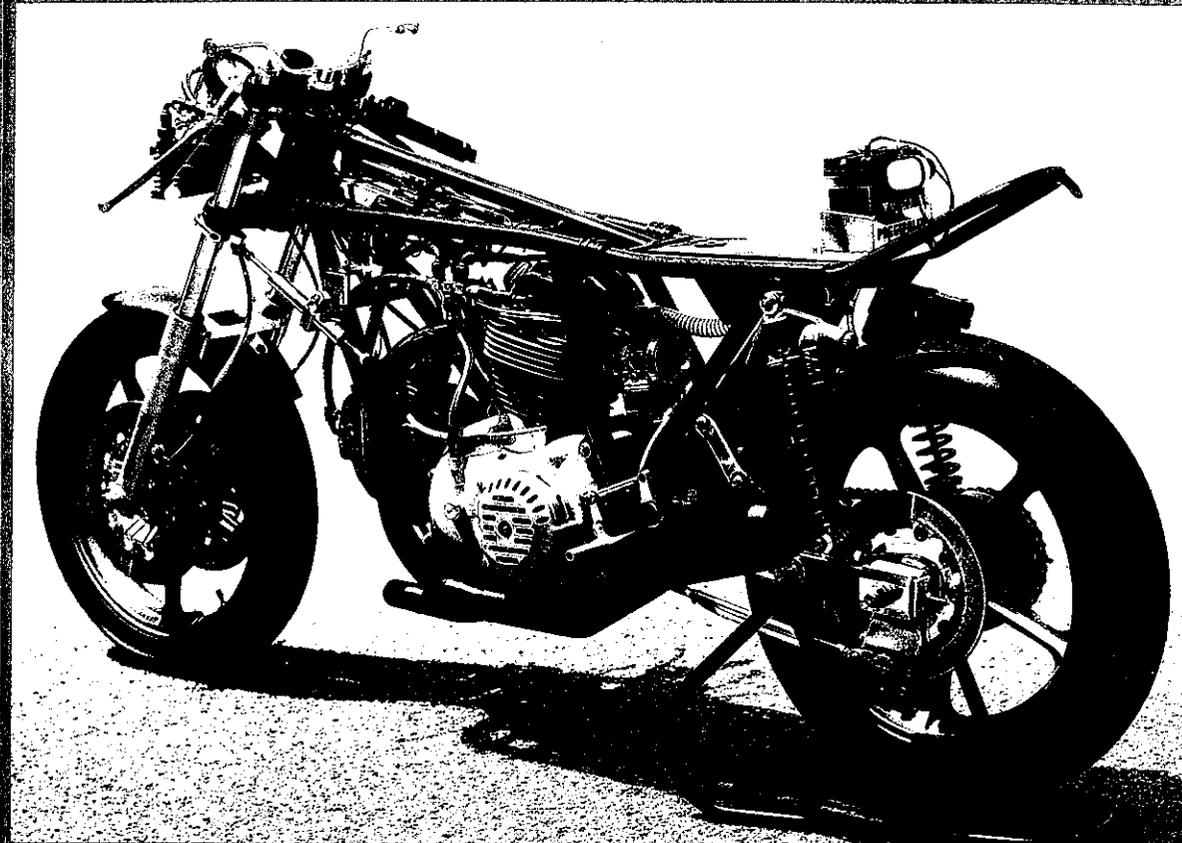
ISBN 3-613-01443-2



9 783613 014435

JOHN ROBINSON

# Fahrwerkstuning für Motorräder



Professionell und sicher

Motor  
buch  
Verlag

**John Robinson**

# **Fahrwerkstuning für Motorräder**

**Professionell und sicher**

**Motorbuch Verlag Stuttgart**

Einbandgestaltung: Johann Walentek unter Verwendung von drei Dias aus dem PS-Archiv  
(Fotograf Herzog)

Die englische Ausgabe erschien 1990 bei Heinemann Newnes  
Copyright © John Robinson 1990.

Die Übertragung ins Deutsche besorgte: Waldemar Schwarz

Die Ratschläge in diesem Buch sind von Autor und Verlag sorgfältig erwogen und geprüft, dennoch kann eine Garantie nicht übernommen werden. Eine Haftung des Autors bzw. des Verlages und seiner Beauftragten für Personen-, Sach- und Vermögensschäden ist ausgeschlossen.

ISBN 3-316-01443-2

1. Auflage 1992

Copyright © by Motorbuch Verlag, Postfach 103743, 7000 Stuttgart 10

Ein Unternehmen der Paul Pietsch Verlage GmbH & Co.

Sämtliche Rechte der Speicherung, Vervielfältigung und Verbreitung in deutscher Sprache sind vorbehalten.

Druck: Rems-Druckerei, 7070 Schwäbisch Gmünd

Bindung: Buchbinderei W. Nething, 7315 Weilheim

Printed in Germany

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>6</b>
<b>Würdigungen</b>	<b>7</b>
<b>Kapitel 1 : Lenkung und Fahrverhalten</b>	<b>8</b>
<b>Kapitel 2 : Fahrwerk</b>	<b>19</b>
<b>Kapitel 3 : Reifen</b>	<b>35</b>
<b>Kapitel 4 : Räder und Antriebsstrang</b>	<b>48</b>
<b>Kapitel 5 : Radaufhängungen</b>	<b>56</b>
<b>Kapitel 6 : Bremsen</b>	<b>89</b>
<b>Kapitel 7 : Aerodynamik</b>	<b>125</b>
<b>Kapitel 8 : Rahmen und Fahrwerksdetails</b>	<b>148</b>
<b>Kapitel 9 : Verkleidungen</b>	<b>171</b>
<b>Kapitel 10 : Schweißen</b>	<b>178</b>
<b>Kapitel 11 : Testen und Entwickeln</b>	<b>185</b>
<b>Anhang Übersicht</b>	<b>206</b>
<b>Zusammenfassung der Grundbegriffe</b>	<b>214</b>
<b>Computerprogramme</b>	<b>215</b>
<b>Luftdurchsatz des Motors</b>	<b>247</b>
<b>Thermoelemente</b>	<b>248</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>250</b>

# Vorwort

Rennenfahren und das Vergnügen, das mit dem Fahren und dem Umgang mit Motorrädern zu tun hat, hängt mit dem Kurvenfahren zusammen. Ein Motorrad, das schneller um Ecken fährt oder handlicher ist, fordert mehr heraus, macht mehr Spaß oder ist leichter oder sicherer im Verkehr zu beherrschen.

Jeder, der mehr als drei Motorräder gefahren hat, weiß, daß es im Fahrverhalten von Motorrädern Unterschiede, manchmal sogar sehr große gibt. Jeder, der sich mit Radaufhängungen und Reifen auseinandergesetzt hat, weiß, daß man durch kleine Veränderungen große Unterschiede hervorrufen kann. Andere Veränderungen wiederum (gewöhnlich die Verstellmöglichkeiten, die vom Hersteller vorgesehen sind) wirken sich dagegen überhaupt nicht aus.

Es ist ein Thema, das sich sehr schwierig einordnen läßt. Manche Leute haben ein natürliches Gefühl dafür, andere nicht. Falls man versteht, wie ein Teil funktioniert, und sieht, was dabei geschieht, ist man auch in der Lage, damit umzugehen. In meinem Fall ist es kein natürliches Gefühl sondern eher das Gegenteil, eine lange Erfahrung von »trial and error«, also dem Versuch und meistens dem Fehler. Es lehrt eines: glaube der Stoppuhr.

Ich habe nun versucht, eine logische Reihenfolge zu erstellen, um ein neues Motorrad zu bauen oder ein bereits bestehendes zu modifizieren, um das Optimum der Leistungsfähigkeit zu erreichen. Manche Dinge kann man festlegen. Die Geometrie eines Motorrads bestimmt unter anderem sein Beschleunigungs- und Bremsvermögen: diese Dinge kann man messen. Die Qualität der Reifen bestimmt, zum Beispiel, die maximal übertragbaren Kräfte. Neben diesen Fakten gibt es auch Einflüsse, die nicht meßtechnisch sondern nur gefühlsmäßig erfaßt werden können. Das ist einer der Gründe, warum Rennteams mehr Zeit für Tests als beim Rennen verbringen. Falls dieses Buch Ihnen einen halben Tag Testen erspart, hat es sich bereits bezahlt gemacht.

John Robinson

# Würdigungen

Mein Dank gilt Colin Taylor, der das Kapital über Schweißen und Hartlöten geschrieben hat, und vielen anderen Helfern und Organisationen, die Informationen, Illustrationen und Details zum Fotografieren geliefert haben, und die mir halfen, wenn ich nicht mehr weiter wußte:

BMW (GB), Cibie, Gerry Daubney (M R Holland), Francois Decima (Michelin), Duckhams, Dunlop, Ferodo, Patrick Gosling, Heron Suzuki, Paul Hobbs (Goodridge), Honda UK, Kim Hull, Kent Aerospace Castings, Kawasaki Motors UK, Steve Lythgoe (Sharples Service Station), Phil Masters, MIRA, Mitsui Machinery Sales, Leon Moss (LEDAR), Performance Bikes, Pirelli, Ron Williams (Maxton), Yamaha, und andere...

# Lenkung und Fahrverhalten

Während die Motorleistung klar definiert und gemessen werden kann, sind Eigenschaften wie Handling, Straßenlage oder Fahrkomfort nicht einfach einzuordnen. Die daraus resultierenden Ergebnisse können normalerweise in Rundenzeiten gemessen, oder noch einfacher, daran beurteilt werden, wie angenehm ein Motorrad zu fahren ist. Meistens fehlt aber der exakte Zusammenhang der Ursachen. Woher kommt es, daß sich ein Motorrad so viel leichter beherrschen läßt als das andere, obwohl sich beide so ähnlich sind?

Vieles davon ist rein subjektiv, was nicht erleichtert, es meßtechnisch zu erfassen. Was dem einen Fahrer gefällt, muß dem anderen noch lange nicht angenehm sein. Ausdrücke wie Driften, Sliden, Übersteuern usw. bedeuten oft verschiedene Dinge, wenn sie von verschiedenen Leuten benutzt werden. (Die Definition all dieser Bedeutungen wie sie in diesem Buch gebraucht werden, sind im Anhang zu finden.) Zu all dem sind Faktoren, die das Fahrwerk und die Lenkung betreffen, eng miteinander verknüpft. Ändern Sie eine Größe, ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß sich gleichzeitig zwei oder drei weitere Parameter ändern. Das wirft einen alten Grundsatz beim Testen über den Haufen: Ändern Sie immer nur eine Einflußgröße.

Um ein einfaches Beispiel zu nennen. Nehmen Sie an, Sie wechseln nur die Feder am Federbein. Sie erwarten von einer weicheren oder härteren Feder ein komfortableres oder strafferes Fahrverhalten und damit eine Änderung des Fahrkomforts. Die Änderung, die von der Länge und der Federrate der Feder abhängt, kann ebenso die Sitzhöhe beeinflussen. Das bedingt wiederum eine Änderung der Bodenfreiheit und kann die Schräglage einschränken, obwohl der Komfort und das Fahrgefühl sich verbessert haben (beabsichtigt war aber die Erhöhung der Kurvengeschwindigkeit). Legt man das Heck tiefer, tritt eine größere Neigung der Gabel auf. Dadurch vergrößert sich der Nachlauf. Das bewirkt eine schlechtere Lenkbarkeit, aber auch eine Erhöhung der Stabilität. Hebt man das Heck an, so entsteht der gegenteilige Effekt. Der Nachlauf verringert sich, Handling und Ansprechverhalten werden verbessert. Alleine durch Variieren der Federrate sind spürbare Änderungen in der Handlichkeit und Lenkbarkeit eines Motorrads zu erzielen. Man kann ebenso die Geradeauslaufstabilität und Bodenfreiheit ändern.

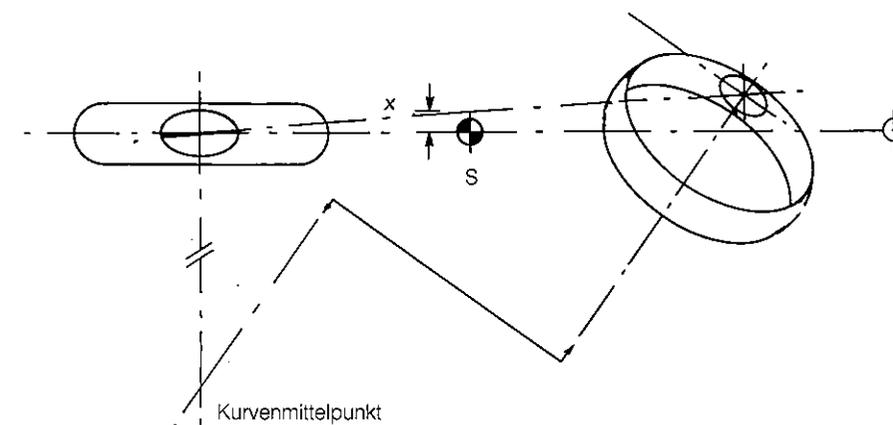
Offensichtlich müssen also alle Maßnahmen sehr sorgfältig erfolgen, damit keine unerwünschten Nebeneffekte auftreten.

Bei allen Faktoren, wie Nachlauf, Stabilität, Federrate usw., gibt es ein Optimum, das zum Motorrad, zum Fahrer und zu den Straßenverhältnissen paßt. Überall dort wo ein Motorrad neu entwickelt oder ein bestehendes stark überarbeitet wird, ist es notwendig, eine Testreihe auszuarbeiten, die das beste Ergebnis von Fahrwerk und Aufhängung ergibt. Falls andererseits die Arbeit darauf hinausläuft, ein spezifisches Problem wie Pendeln oder Flattern zu beheben, sind einfache Versuche ebenso gut

wie alle anderen Methoden. Da eine Änderung so viele Auswirkungen haben kann, ist es selten möglich, das Ergebnis genau vorherzusagen, weshalb Testen so wichtig ist. Handling- und Stabilitätsprobleme sind oft sehr schwer zu erforschen. Tatsächlich ist es meistens einfacher, Fehler einzubauen, um das verantwortliche Teil zu identifizieren.

Wenn alles beendet ist, schätzt der eine Fahrer das Ergebnis, der andere nicht, der dritte bemerkt es überhaupt nicht. Es gibt viele Fahrer, die zwar auf jedem Motorrad enorm schnell fahren können, zur Fahrwerksentwicklung aber unfähig sind.

In manchen Fällen verursacht eine Änderung nur ein angenehmeres Fahrgefühl. In anderen Fällen wird das Motorrad dadurch wettbewerbsfähiger, weil man damit Kurven schneller umrunden, härter bremsen oder früher beschleunigen kann. Obwohl es schwierig ist, den individuellen Eindruck meßtechnisch zu erfassen, kann die Summe aller Eigenschaften an kürzeren Rundenzeiten oder an einer höheren Geschwindigkeit am Ende der Geraden gemessen werden. Vielleicht ist man auch nur in der Lage, später zu bremsen. Auf einem Straßenmotorrad ist es oft schon ein Erfolg, wenn sich das Motorrad besser anfühlt. Geringfügige Gewinne in der Kurvengrenzgeschwindigkeit bringen nur minimale Unterschiede in der Zeit. Daraus ergibt sich, daß ein Motorrad, das eine größere Leistungsfähigkeit hat, bei gleicher Beanspruchung sicherer zu handhaben ist und nicht so viel Streß oder Ermüdung beim Fahrer erzeugt.



**Abbildung 1.1** Beim Einschlagen des Vorderrads führt das Motorrad eine Kreisbahn um den Kurvenmittelpunkt aus, in dem sich die Achsen der beiden Räder kreuzen. Durch den Nachlauf verschiebt sich die Reifenaufstandsfläche, so daß die Mittellinie des Motorrads und sein Schwerpunkt nicht mehr über der Ausgangsposition liegen. Der Steuerkopfwinkel bewirkt einen Sturz des Vorderrads, wodurch eine Sturzseitenkraft entsteht.

Die Art, wie sich ein Motorrad lenkt, liegt grundsätzlich an seinem Handling und an seiner Lenkstabilität. Bei niederen Geschwindigkeiten lenkt ein Motorrad ein, indem das Vorderrad in Kurveninnenrichtung gedreht wird. Bei senkrechter Lage des Motorrads bewirkt der Nachlauf (siehe Anhang) in einer Rechtskurve ein Auswandern des Reifenaufstandspunktes zur linken Seite. Das bedeutet, daß der Schwerpunkt sich nun rechts von der Linie, um die sich das Motorrad bewegt, befindet, die man zwischen den beiden Reifenaufstandspunkten ziehen kann. Deshalb würde es versuchen, nach rechts zu kippen.

Gleichzeitig bewegt es sich auf einer Kreisbahn zur rechten Seite. Das Zentrum dieser Kurve befindet sich dort, wo sich die, durch die Radachsen laufenden Linien schneiden. Auf diesen Punkt gerichtet wirkt eine Beschleunigung (Zentripetalbeschleunigung), auch wenn die Geschwindigkeit, die man vom Tacho abliest, konstant ist. Die Beschleunigung beträgt  $v^2/r$ , wobei  $v$  die Geschwindigkeit und  $r$  der Radius des Kreisbogens ist, dem das Motorrad folgt. Die Kraft, die diese Beschleunigung erzeugt, ist  $mv^2/r$ , wobei  $m$  die Masse des Motorrads ist, auf die die Erdanziehungskraft wirkt. Die Reaktion, die durch die Massenträgheit des Motorrads verursacht wird, hebt diese Kraft auf, wobei sie genau entgegengesetzt vom Zentrum weg gerichtet ist (Zentrifugalkraft). Sie greift im Schwerpunkt des Motorrads an, der sich deutlich über der Fahrbahn befindet.

Die Zentrifugalkraft erzeugt ein Moment, das versucht, das Motorrad nach links zu drehen. Das Moment beträgt  $ymv^2/r$ , wobei  $y$  die Höhe des Schwerpunkts ist. Das Moment, das versucht, das Motorrad nach rechts zu kippen, ist  $mgx$ , wobei  $mg$  das Gesamtgewicht und  $x$  der Betrag ist, um den sich der Schwerpunkt neben der Verbindungslinie der beiden Reifenaufstandspunkte befindet.

Da ein Motorrad bei Kurvenfahrt nicht umfällt, müssen beide Größen gleich sein, woraus resultiert:

$$ymv^2/r = mgx$$

oder

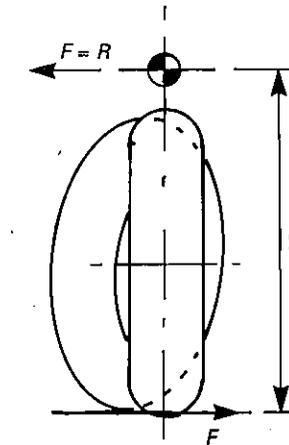
$$v^2 = rgx/y$$

Nun sind  $g$  und  $y$  bei einem vorgegebenen Motorrad konstant,  $x$  hängt von der Lenkgeometrie und dem Lenkwinkel,  $r$  nur vom Lenkwinkel ab. Für ein vorgegebenes Motorrad und einen bestimmten Lenkwinkel ist  $rgx/y$  konstant. Es gibt nur eine einzige Geschwindigkeit, für die diese Bedingungen erfüllt sind und die das Motorrad im Gleichgewicht hält (es gibt tatsächlich  $+v$  und  $-v$ , da die Mathematik die Annahme erlaubt, daß man mit der gleichen Geschwindigkeit auch rückwärts fahren kann).

Falls der Fahrer langsamer fährt, ist der Betrag aus  $ymv^2/r$  zu gering, das Motorrad würde nach rechts in die Kurve fallen. Falls der Fahrer schneller fährt, wird  $ymv^2/r$  zu groß, das Motorrad würde nach links zur Kurvenaußenseite kippen.

Abgesehen davon kann der Fahrer den Schwerpunkt, insbesondere bei einem sehr leichten Motorrad, verlagern, indem er zum Beispiel aufsteht (wodurch sich  $y$  vergrößert) oder indem er seinen Körper nach einer Seite lehnt (Vergrößern oder Verringern von  $x$ ). Durch das variable Gestalten von  $x$  und  $y$  kann ein Trial-Fahrer so die Geschwindigkeit, bei der das Motorrad im Gleichgewicht ist, bei einem festen Kurvenradius variieren.

Wenn  $v$  ständig gesteigert wird und die Schwerpunktshöhe dieselbe bleibt, steigt natürlich auch das Produkt aus  $rx$ . Um  $x$  zu vergrößern, muß die Lenkung weiter in die Kurve gedreht werden. Doch das bewirkt eine Verringerung von  $r$ , also dem Kurvenradius, wodurch schnell ein Wert für  $v$  erreicht wird, der die Lenkgeometrie überfordert. Das passiert bei konventionellen Motorrädern irgendwo im Bereich von 0,6 bis 1,2 m/s. Es ist wichtig, an diesen Fahrzustand zu erinnern, da diese kritische Geschwindigkeit in der Praxis vorkommt.



**Abbildung 1.2** Die einlenkende Kraft  $F$  wird auf der Fahrbahn erzeugt, während die Reaktion der Massenträgheitskraft  $R$  des Motorrads im Schwerpunkt angreift. Die beiden sind gleich groß, so daß  $F = R (= mv^2/r)$  ist. Sie versuchen das Motorrad mit einem Moment  $Fy$  nach links zu neigen. Der Schwerpunkt wandert um den Betrag  $x$  gegenüber der Verbindungslinie der Reifenaufstandsflächen aus. Daraus resultiert der Versuch, das Motorrad mit dem Moment  $mgx$  nach rechts zu neigen.

Falls die Geschwindigkeit zu hoch ist, also 1,2 m/s übersteigt, bewirkt der Rechts einschlag ein Kippen oder Neigen der Maschine nach links. Bis jetzt haben wir ein Motorrad bei sehr geringen Geschwindigkeiten untersucht. Bei mehr als 1,2 m/s bewirkt ein Rechtseinschlag eine Neigung nach links. Die sofortige Reaktion ist, daß der Schwerpunkt sich nun auf die linke Seite gegenüber der Linie durch die Reifenaufstandspunkte verlagert hat und sich beide Räder nach links neigen.

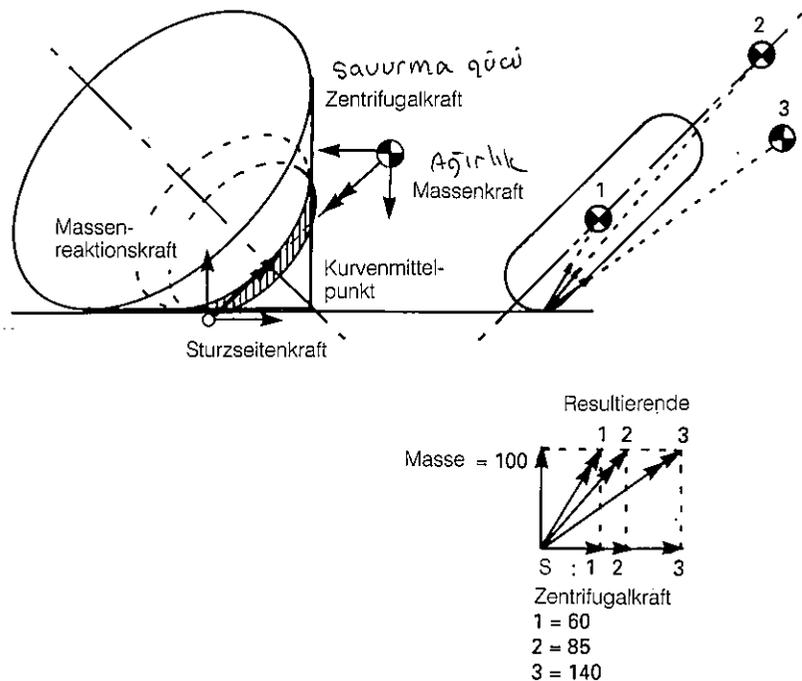
Demnach würde also unser Motorrad lenken und sich grundsätzlich so verhalten wie vorausgesagt, falls die Räder einfach dicke, hölzerne Scheiben wären. Nun kommen aber die Reifen ins Spiel: Sie erzeugen das, was als Sturzseitenkraft bekannt ist. Da sich der Reifen im Reifenaufstandspunkt zu einer flachen Ellipse verformt, benimmt er sich bei der Neigung des Rades wie ein Teil eines großen Kegels, der auf der Seite liegt. Falls man einen solchen Kegel rollt, beschreibt er einen Kreis um die Kegelspitze im Zentrum. Falls man einen Reifen nimmt, ihn um dreißig Grad aus der Senkrechten neigt und langsam vorwärts rollt, verhält er sich genauso.

Die Massenträgheitskraft des Motorrads versucht das Rad beim Fahren in Geradeausstellung zu halten. Die Sturzseitenkraft der geneigten Reifen versucht einen engen Kreis zu beschreiben. Die erzeugte Kraft ist nicht groß genug für diesen Bogen. Da sie aber vorhanden ist, bewirkt sie ein Einlenken des Motorrads. Die Kraft, die auf die Masse des Motorrads wirkt, verursacht eine Beschleunigung nach links. Der Wert beträgt  $v^2/r$ , so daß das Motorrad, unabhängig von der Geschwindigkeit  $v$ , einen Bogen mit dem Radius  $r$  beschreibt.

Wenn sich das Motorrad nach links neigt, bewirken die Bodenaufstandskräfte einen Einschlag des Vorderrads, ebenfalls zur linken Seite. Der Fahrer fühlt das als Reaktion im Lenker, die er weder beeinflussen noch verändern kann.

Wir haben nun eine Situation, die sehr ähnlich zur ersten ist: Das Motorrad lenkt nach links, erzeugt eine Sturzseitenkraft nach links (diesmal an beiden Rädern) und

hat seinen Schwerpunkt (beträchtlich weiter) von der Linie durch die Reifenaufstandspunkte verlagert. Wie vorher, als die Kraft versucht hat, das Motorrad nach links zu neigen ( $mgx$ ), gleicht die Zentrifugalkraft ( $mv^2/r$ ) das aus. Die Kräfte sind im Gleichgewicht, das Motorrad folgt einem Kreisbogen mit dem Radius  $r$  mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v$ .



**Abbildung 1.3** Ein geneigter Reifen versucht sich wie ein, auf der Seite liegender Teil eines Kegels zu verhalten, wodurch er eine Sturzseitenkraft erzeugt. Um das Motorrad im Gleichgewicht zu halten, müssen die Resultierende aus Seitenführungs- und Erdanziehungskraft und die Resultierende aus Zentrifugal- und Erdanziehungskraft gleich sein. Breitreifen verursachen ein Auswandern der Reifenaufstandsfläche aus der Mittelebene des Fahrzeugs. Das bedeutet, daß die Schwerpunkts Höhe das Verhältnis zwischen Sturz und Seitenführungskraft beeinflusst. Drei Kräfte, die notwendig sind, um die Gleichgewichtsbedingungen für den Schwerpunkt zu erfüllen, sind dargestellt: 1 nieder, 2 hoch, 3 nach innen verschoben.

Die seitliche Verschiebung  $x$  ist nun sowohl eine Funktion des Sturzes als auch des Lenkwinkels ( $x = y \cos \varphi$ , worin  $\varphi$  der Rollwinkel des Motorrads zur Horizontalen ist). Der Wert  $mgx$  kann einen viel größeren Geschwindigkeitsbereich und Radius ( $v^2/r$ ) abdecken. Ein steigender Rollwinkel verringert auch die Höhe des Schwerpunkts. Dadurch nimmt auch die Tendenz des Motorrads ab, sich unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft nach außen zu neigen. Die Gleichung lautet nun:

$$mgx \cos \varphi = mv^2 y \sin \varphi / r$$

oder

$$v^2/r = g/\tan \varphi$$

(das vernachlässigt allerdings die Verlagerung aufgrund des Lenkwinkels).

Die Querbewegung des Motorrads beträgt so bei einem Neigungswinkel von 45 Grad ein  $g$ . Tabelle 1.1 zeigt die Geschwindigkeit, mit der Kurven mit unterschiedlichen Radien und Beschleunigungswerten durchfahren werden können.

**Tabelle 1.1**

Rollwinkel zur Senkrechten	Beschleunigung $v^2/r$ (m/s <sup>2</sup> )	Radius (m)	Geschwindigkeit (m/s)	Geschwindigkeit (km/h)
45	9,8	30,5	17,3	61,9
		45,7	21,2	75,8
		61,0	24,4	87,5
30	5,7	174,0	39,5	138,4
		30,5	13,1	47,0
		174,0	29,4	105,3
15	2,6	30,5	9,0	32,0
		174,0	20,0	71,5

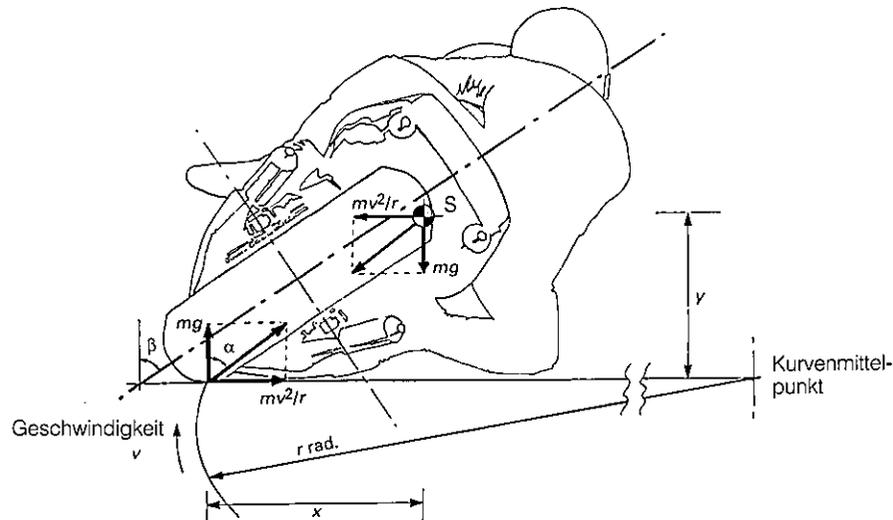
Dies läßt allerdings den Lenkeinschlag außer Acht, der eine weitere Verlagerung des Schwerpunkts bewirkt. Es vernachlässigt auch eine Reihe von anderen Auswirkungen, die von den Reifen erzeugt werden.

Da heutzutage Reifen verhältnismäßig breit sind und einen mehr oder weniger runden Querschnitt haben, wandert die Reifenaufstandsfläche nach links aus, wenn sich das Motorrad zur linken Seite neigt. Die Reifenaufstandsfläche befindet sich also nicht mehr genau in der Mittelebene wie die Berechnungen voraussetzen. Daraus ergibt sich folgende Konsequenz:

1. Der Schwerpunkt wandert nicht so weit aus, wie ursprünglich angenommen. So muß die Seitenführungskraft proportional zu einem vorgegebenen Rollwinkel reduziert werden.
2. Motorräder mit einem tieferen Schwerpunkt müssen stärker in die Kurve gelegt werden, um das gleiche Gleichgewichtsverhältnis zu erzielen wie Motorräder mit einem höheren Schwerpunkt.
3. Je breiter die Reifen werden, um so stärker ist diese Tendenz.

Der zweite Aspekt weist darauf hin: Der Reifen versucht eine Bahnkurve einzuhalten, wird aber durch die Massenträgheit des Motorrads davon abgelenkt. Zusätzlich kann die Reifenaufstandsfläche als Teil eines Kegels betrachtet werden, was bewirkt, daß auf der Außenseite ein größerer Radius als weiter innen ist. Die Außenseite will sich also schneller drehen. Da dies aber nicht möglich ist, müssen Teile der Reifenaufstandsfläche im Schlupf laufen (siehe Anhang). Der Reifen kann aber auch in einem anderen Winkel laufen als der, in den er gerichtet ist. Je höhere Kräfte auf ihn wirken, um so mehr neigt er dazu. Dieser Winkel wird als Schräglaufwinkel bezeichnet. Falls der Hinterreifen einen anderen Schräglaufwinkel als der Vorderradreifen hat, führt das Motorrad zusätzlich zum eingeschlagenen Kurs eine Drehbewegung um die Hochachse aus. Falls der Schräglaufwinkel am Heck größer als an der Front ist, dreht

sich das Motorrad in die Kurve hinein. Das wird als Übersteuern bezeichnet. Der Fahrer kann den Lenkeinschlag reduzieren und trotzdem den gleichen Kurvenradius beibehalten.



**Abbildung 1.4** Die gesamten Kräfte, die bei Kurvenfahrt auf ein Motorrad wirken. Das Rollmoment  $mgx$  wird durch das Zentrifugalmoment  $mv^2y/r$  ausgeglichen. Der wirksame Rollwinkel  $\alpha$  ( $\tan \alpha = x/y = v^2/rg$ ) ist geringer als der Sturz ( $\beta$ ) des Reifens, wenn der Schwerpunkt in der Kurve gegenüber der Reifenaufstandsfläche nach innen verschoben wird.

Abhängig von der Reifenkonstruktion und der Mischung kann der Schräglauf die maximale Haftung verbessern. Bei ansteigendem Schlupf erhöht sich die Haftung ebenfalls. Sie erreicht ein Maximum, wenn der Schlupf einige Prozent höher ist als die mittlere Umfangsgeschwindigkeit des Rades. Nach diesem Spitzenwert fällt die Haftung wieder ab. Wenn der Reifen zu rutschen oder durchzudrehen beginnt, tritt ein noch höherer Haftungsabfall auf.

All dies findet statt, wenn sich ein Motorrad mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Falls das Motorrad noch zusätzlich beschleunigt, muß es über die Aufstandsfläche des Hinterrad ein Antriebsmoment übertragen, was wiederum erhöhten Schlupf zur Folge hat. Das hilft, Seitenführungskraft am Hinterrad aufzubauen, weil der Reifen bei einem bestimmten Betrag an Schlupf einen höheren Kraftschluß hat. Das kann nun durch bewußten Einsatz der Motorleistung, oder durch Variation der Geschwindigkeit und dem Rollwinkel gezielt ausgenutzt werden. Dadurch wird mehr Schlupf am Hinterrad und somit stärkeres Übersteuern erzeugt. Kurvenfahren mit hohem Antriebsmoment führt zu den sensationellen Drifts. Deswegen verhalten sich Motorräder unter extremen Fahrbedingungen sicherer und kontrollierbarer.

Übersteuern ist eine natürliche Tendenz von Motorrädern, da sie über Hinterradantrieb verfügen. Es ist eine gute Voraussetzung für sicheres Fahrverhalten. Ein Durchdrehen oder Rutschen des Hinterrad ist einfacher zu kontrollieren als ein Vorderradsliden. Viele Pkw's sind so abgestimmt, daß sie untersteuern (so daß der Schräglaufwinkel an den Vorderrädern größer als an den Hinterrädern ist). Die Reaktion des Fahrzeugs ist dadurch besser vorhersehbar. Eine höhere Beanspru-

chung erfordert stärkeres Einlenken. Falls die Front an Haftung verliert, kann durch Zurücknehmen der Leistung die Kontrolle über das Fahrzeug schnell wiedergewonnen werden. Ein übersteuerndes Fahrzeug erfordert viel mehr Geschick im Grenzbereich. Falls die Hinterräder Haftung verlieren, dreht sich das Fahrzeug, egal ob der Fahrer Gas gibt oder wegnimmt.

Faktoren, die dazu neigen, den Schräglaufwinkel am Reifen zu vergrößern, sind:

1. flexibler Laufstreifen
2. flexible Seitenwände
3. flexible Karkasse
4. geringerer Kraftschlußbeiwert
5. geringerer Luftdruck
6. Antriebs- oder Bremsmoment
7. größerer Querschnitt.

Der, in Kurven beim Bremsen und bei der Beschleunigung zur Verfügung stehende Kraftschluß hängt hauptsächlich von der Reifenmischung (und der Mischung des Straßenbelags) ab. Die Konstruktion des Reifens ermöglicht die Verwendung weicher Mischungen, die trotzdem nicht überhitzen (siehe Kapitel 3), während die Konstruktion des Motorradrahmens und der Radaufhängungen so ausgeführt sein müssen, daß ein Maximum an Kraftschluß erreicht wird. Das sind die Anforderungen für eine gute Straßenlage.

Es gibt auch Möglichkeiten, die Straßenlage des Motorrads zu beeinflussen: Die notwendige Leistung, der Wert, nachdem sich beim Lenken der Rollwinkel einstellt, die Kombination des Roll- und Lenkwinkels für eine bestimmte Geschwindigkeit und einen bestimmten Kurvenradius. Solange sich das Motorrad in Schräglage befindet, werden die Radaufhängungen zusätzlich belastet (anstelle der Gewichtskraft  $mg$  wirkt nun die Resultierende von  $mg$  und der Seitenführungskraft  $mv^2/r$ ). Die Kraft in der Aufhängung beträgt nun  $m\sqrt{(g^2 + v^4/r^2)}$  und falls  $v^2/r = g$  ist, beträgt die Last 1,414  $mg$ , also das 1,414fache der statischen Last).

Die Kräfte und Bewegungen an Lenkung und Radaufhängung führen dazu, daß sich bei Kurvenfahrt ein bestimmter Lenkeinschlag und eine bestimmte Einfederung einstellen, bis sich das Motorrad stabilisiert hat. Die Kraft und die Bewegungen an den Bedienungselementen bei Kurvenfahrt nimmt der Fahrer als Gefühl oder Rückmeldung wahr. Die Geschwindigkeit, mit der er einlenkt, und die Schräglage, die daraus folgt, registriert er als Handlingqualitäten. Einige Fahrwerkseinstellungen fühlen sich besser an als andere. Einige sind nachvollziehbar besser, da sie es ermöglichen, das Motorrad schneller einzulenken und früher zu stabilisieren, so daß der Fahrer die Leistung so früh wie möglich einsetzen kann.

Das Motorrad muß auch mit Bodenwellen und wechselndem Fahrbahnbelag (siehe Kapitel 5) fertig werden, wobei der wichtigste Aspekt die Stabilität ist. Sie ist in erster Linie ausschlaggebend, auch wenn sie Einbußen beim Handling des Motorrads nach sich zieht oder der Fahrer beim Umlegen warten muß, bevor er die Leistung voll einsetzen kann. Rennmotorräder haben oft eine mangelhafte Richtungsstabilität. Das wäre aber bei einem Tourenmotorrad nicht akzeptabel.

Andere Arten der Instabilität treten normalerweise in Form von Flattern und Pendeln auf. Davon scheint es vier verschiedene Gruppen zu geben:

## 1. Lenkungsflattern

Es tritt gewöhnlich bei 70 bis 80 km/h auf, fängt schwach an und baut sich schnell (innerhalb von 10 Zyklen) zu einem starken Flattern mit hoher Frequenz und großer Amplitude auf. Die Frequenz beträgt in der Regel 3 – 5 Hertz. Manchmal sind die Amplituden groß genug, um den Lenker von Anschlag zu Anschlag zu bewegen. Es ist meistens stark geschwindigkeitsabhängig. Die Energie ist dabei so gering, daß sich die Schwingung nicht aufbauen kann, wenn der Fahrer seine Hände am Lenker hat. Es kann unangenehme Formen annehmen, falls das Heck des Motorrads stark beladen ist, zum Beispiel mit einem ausgelasteten Heckgepäckträger. Manche Motorräder mit sehr leichtgängiger Lenkung neigen, besonders während starker Beschleunigung auf unebenen Fahrbahnen, dazu. In solchen Fällen hilft ein Lenkungsdämpfer. Diese Art der Schwingung kann normalerweise verringert oder ganz abgebaut werden, indem man die Last vom Heck des Fahrzeugs mehr nach vorne verteilt, überflüssige Masse an der Lenkung abbaut, den Nachlauf vergrößert oder die Last am Vorderrad erhöht.

## 2. Hochgeschwindigkeitspendeln

Es kann bei allen Geschwindigkeiten erscheinen. Normalerweise tritt es bei Geschwindigkeiten über 130 km/h auf. Es fühlt sich ähnlich wie unter Nummer eins an, aber normalerweise mit geringerer Frequenz und größerer Amplitude, so daß der Fahrer nicht in der Lage ist, es durch festeren Zugriff des Lenkers zu vermeiden. Es beginnt oft bei einer genau eingegrenzten Geschwindigkeit und hört manchmal auch wieder bei einer darüberliegenden Geschwindigkeit auf ( aber oft ist das Motorrad nicht schnell genug, um den oberen Grenzwert zu erreichen. Deswegen garantiert nur Bremsen Sicherheit).

Es ist oft abhängig vom Reifenzustand, speziell bei abgefahrenen Reifen. Die Geschwindigkeit, bei der das Pendeln anfängt, verringert sich mit abnehmendem Profil. Während einiger Langstreckenprüfungen mit einer Honda CB 900 in Snetterton wurden fünf Hinterreifen während einer 24-Stunden-Dauer verschlissen. Bei den meisten fing die Honda bei zirka 190 km/h zum Pendeln an, die sie am Ende der Gegengeraden erreichte. Als die Reifen verschlissen waren, setzte das Pendeln bei geringeren Geschwindigkeiten ein und hielt daher auf der Geraden länger an. Wenn das Pendeln bereits am Anfang der Geraden auftrat, wußte der Fahrer, daß es Zeit war, zum Reifenwechsel in die Boxengasse zu kommen.

Eine Theorie lautet, daß jedes nachlaufende Rad bei irgendeiner kritischen Geschwindigkeit instabil wird, was eine hinreichende Erklärung in diesem Falle wäre. Es ist möglich, die kritische Geschwindigkeit durch Modifikationen soweit anzuheben, daß sie über der Höchstgeschwindigkeit des Motorrads liegt.

Faktoren, die auf das Pendeln Einfluß haben, sind:

1. Reifenprofil oder Konstruktion
2. Massenträgheitsmoment um die Lenkachse

3. Rahmen- oder Schwingensteifigkeit
4. die Verteilung der Zuladung
5. Lenkkopfwinkel und Nachlauf
6. Federung und Dämpfung der Hinterradaufhängung
7. Einstellung der Steuerkopflager, eventuell zu fest angezogen.

## 3. Radaufhängungsabhängiges Pendeln

Dieses Problem tritt gewöhnlich bei schweren Motorrädern in langen, schnellen Kurven auf, wenn die ganze Maschine sich ständig wiederholend in die Kurve fällt und wieder aufrichtet und gleichzeitig um die Hochachse pendelt. Ein nachfolgender Fahrer kann in einem solchen Fall oft frei zwischen den Rädern durchschauen. Eine Abhilfemaßnahme besteht darin, das Fahrzeug leichter und das Fahrwerk steifer zu machen und bessere Reifen und Aufhängungsteile zu montieren. Wenn man ein neues Motorrad untersucht, sieht man, daß die japanischen Hersteller von 1978 an genau das getan haben. Seit damals haben sich demnach auch bei Straßenmotorrädern diese Probleme entsprechend verringert.

## 4. Lenkungsabhängiges Pendeln

Eine kurze, harte seitliche Anregung am Steuerkopf in Schräglage tritt oft ohne spürbare Lenkbewegung auf. Sie wird normalerweise durch schlecht eingestellte oder verschlissene Lenkkopflager, an der Lenkung scheuernde Kabel- oder Bowdenzüge, einen zu starken Lenkungsdämpfer, einen Schaden an Reifen oder Rädern oder durch Reifen, die nicht zum Motorrad passen, verursacht.

Die beiden ersten Arten des Pendelns erfolgen auf der Geraden, während die beiden anderen in Kurven auftreten. Andere Probleme in Kurven werden gewöhnlich durch die Bewegungen der Radaufhängung verursacht (Stuckern). Sie führen in Schräglage zu Roll- und Gierbewegungen. Sie sind normalerweise auf schlechte Radaufhängungen oder eine ungenügende Abstimmung zwischen Fahrwerk und Reifen zurückzuführen.

Reifen sind meist die wichtigste Komponente. Sie haben Einfluß auf die Kraftübertragung, die Bremsen, die Radaufhängung und das Lenksystem. Das Motorrad sollte um sie herum aufgebaut werden.

Ein Entwicklungsprogramm würde in etwa so aussehen:

1. Wählen Sie die besten Reifen für den angestrebten Zweck (Kapitel 3)
2. Suchen Sie passende Räder, Bremsen, Gabel und Schwingen aus ( Kapitel 4 und 5)
3. Wählen Sie den steifsten und leichtesten, zur Verfügung stehenden Rahmen oder erleichtern Sie einen bereits bestehenden Rahmen, soweit wie möglich, (Kapitel 8)

4. Ein schwieriger Teil : Erleichtern Sie die ungefederten Massen soweit wie möglich (Kapitel 4,5 und 6)
5. Wählen Sie Radaufhängungen, die zu den gefederten und ungefederten Massen und dem Einsatzzweck passen (Kapitel 5).
6. Erarbeiten Sie eine Gewichtsverteilung und Lenkgeometrie, die zur Leistungscharakteristik des Motors paßt (Kapitel 2).
7. Verbessern Sie die Aerodynamik. Sehen Sie Lufteinlässe für die Kühlung, die Motoransaugung usw. vor. Das erfordert anschließend vermutlich eine Reihe von Tests (Kapitel 7).
8. Verkleidung und Sitzposition (Kapitel 8 und 9)
9. Abstimmungsfahrten, um die wichtigsten Aspekte einzuschätzen, zum Beispiel den Kraftschluß für einen Motocrosser oder die Seitenführungskraft für ein Straßenrennmotorrad, usw. (Kapitel 11).
10. Feinabstimmung für Handlinganforderungen, usw., die für verschiedene Kurse unterschiedlich sind (Kapitel 2,5,8 und 11).

Die Hauptsache ist, die Kraftschlußausnutzung zu optimieren und unter allen Bedingungen zu erhalten, die Leistungsfähigkeit zu verbessern, durch Erleichtern des Motorrads ein für den Fahrer optimales Handling zu erreichen und zu vermeiden, daß Motorrad und Fahrer Schaden nehmen.

## Kapitel 2

# Fahrwerk

Bevor irgendwelche Modifikationen an einem Motorrad vorgenommen werden, ist es hilfreich, eine große, ausreichend genaue Zeichnung der Maschine zu haben. Dann kann man sofort erkennen, was eine einzige Änderung an weiteren Modifikationen nach sich zieht. Die meisten Änderungen, wie zum Beispiel die Abmessung der Räder oder die Länge der Federn, haben verschiedene Auswirkungen, zum Beispiel auf Nachlauf, Bodenfreiheit, Freigang der Kette, Bremsvermögen, usw. Das direkte Vermessen des Motorrads ist nicht einfach. Trotz sorgfältiger Vorgehensweise oder der Möglichkeit, eine brauchbare Vorrichtung herzustellen, sind solche Messungen zum Teil widersprüchlich. Sie sollten nur als Schätzungen angesehen werden.

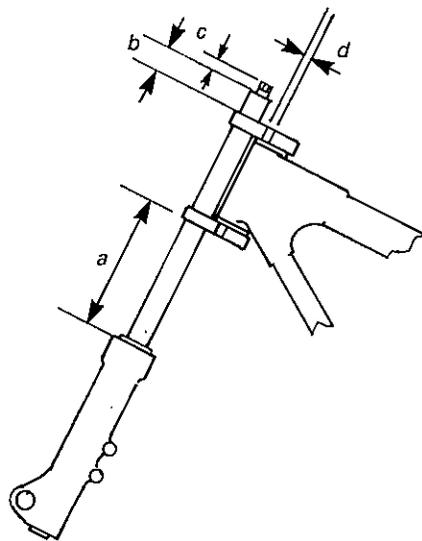
Man kann jedoch exakte Messungen von Teilen machen, die von besonderem Interesse sind, indem man eindeutige Referenzpunkte auf dem Motorrad markiert. Diese Punkte müssen gut zugänglich und leicht meßbar sein, wenn man einen Millimetermaßstab, eine Meßlehre oder sonstige Einrichtungen benützt. Die Messungen selbst haben keine Bedeutung, außer der, daß sie Veränderungen anzeigen. Ein typisches Beispiel ist die Sitzhöhe. Anstatt die senkrechte Höhe des ungefederten Endes der Radaufhängung zu messen, ist es viel einfacher, zwei zugängliche Punkte am gefederten und ungefederten Teil der Radaufhängung festzulegen. Wenn man ein Klebeband nimmt und darauf ein kleines Kreuz anzeichnet, sind die Punkte genau markiert.

Eine Zeichnung des Motorrads zeigt brauchbare Stellen, die nicht nur leicht zu messen sind, sondern auch die größte Änderung ergeben. Das Ende der Schwinge bewegt sich, zum Beispiel bei einem vorgegebenen Wert des Federwegs, mehr als jeder andere Punkt. Die genauen Angaben für Sitzhöhe oder Bodenfreiheit haben keine Bedeutung für sich selbst. Sie geben aber Änderungen sehr genau wieder. Außerdem ist es ein Unterschied, Messungen in der eigenen Werkstatt vorzunehmen, oder dasselbe in einem Fahrerlager zu tun, wo der Boden uneben ist, wo man über Pfützen stolpert und jeder in Eile ist.

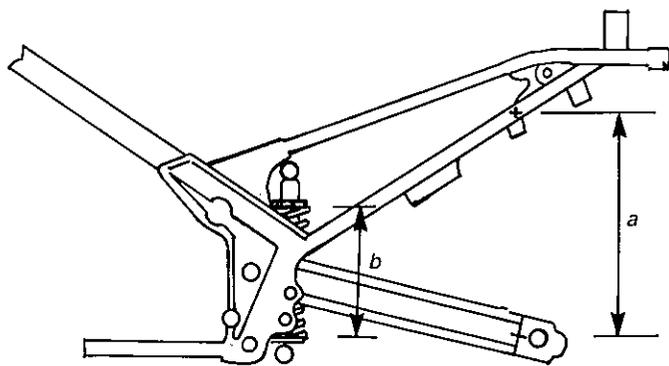
Eine große Hilfe sind, auf dem Motorrad angezeichnete Referenzpunkte. Wenn das Testen nach mehreren Verbesserungen vollkommen unüberschaubar wird, kann man auf die ursprüngliche Einstellung zurückgreifen.

Abbildung 2.1. und 2.2 zeigen, wie man Referenzmessungen vornehmen kann. Die Fahrzeughöhe vorn und hinten ist mit einer bekannten Last abhängig von der Radaufhängung so genau wie möglich festzulegen. Die Lage der Gabelbrücken kann mit einer Schieblehre oder einem Tiefenmaß gemessen werden. Manchmal gibt es sogar Referenzlinien am oberen Ende des Gabelbeins. Wenn das Motorrad in der Werkstatt eingestellt wird, wird das Öl in der Gabel abgelassen und die benötigte Menge für jedes Gabelbein gemessen. Das ist eine gute Gelegenheit, um den

Ölstand in einer rekonstruierbaren Position bei ganz eingefederter Gabel zu messen und zu beobachten, wie er sich ändert, wenn verschiedene Ölmengen eingefüllt werden.

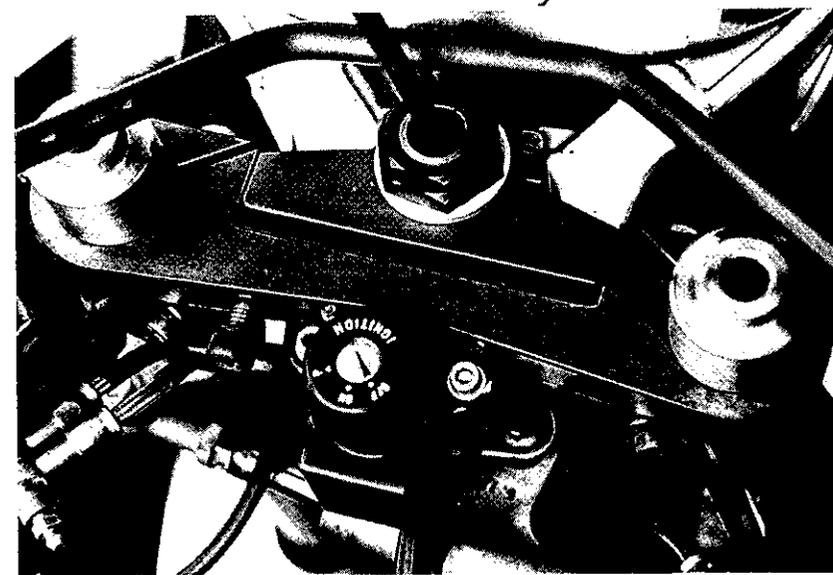


**Abbildung 2.1.** Vergleichmessungen an Lenkung und Vorderradaufhängung a) Betriebshöhe b) Höhe der Gabel in den Gabelbrücken c) Einstellung der Federbasis (oder Länge des Abstands am obersten Ring) d) Gabelbrückenversatz bei einstellbaren Gabelbrücken. Es ist ebenso sinnvoll, die Höhe des Ölstands vom oberen Ende der Gabel aus bei ausgebaute Feder und bei volleingefederter Gabel beziehungsweise Dämpferstange zu messen.



**Abbildung 2.2** Referenzpunkte an der Hinterradaufhängung a) Sitzhöhe (zwischen zwei festgelegten Markierungen) b) Länge der montierten Feder

Während dem Testen ist es einfacher, den Ölstand zu messen als sich auf Ölmenge-messungen zu verlassen, hauptsächlich wegen Problemen das Öl komplett abzulassen, ohne die Gleitrohre zu demontieren.



**Abbildung 2.3** Einstellbare Gabelbrücken von Spondon-Engineering hergestellt. Die Dicke der Beilage (die zwischen die beiden Hälften der Gabelbrücke geklemmt ist) bestimmt den Gabelbrückenversatz und den Nachlauf.

In der gleichen Weise sollten die Räder exakt ausgerichtet und anschließend die Markierungen auf der Schwinge festgelegt oder die Schrauben der Kettenspanner markiert werden. Sie haben auf diese Weise immer die gleiche Einstellung, wenn die Räder exakt in der Spur stehen und können so genau mit zwei Meßlehren überprüft werden. Es ist einfacher, die Räder auszurichten, wenn man ein Meßlineal oder einen rechten Winkel benützt, bevor die Reifen montiert sind. Die Messungen können dann von den Felgen abgenommen werden, wobei die hintere Felge wahrscheinlich breiter als die vordere ist. Deswegen sind bei der vorderen Distanzstücke erforderlich. Der Steuerkopfwinkel und noch wichtiger der Nachlauf sind eigentlich nicht mit der Genauigkeit zu messen, die notwendig ist, selbst wenn der Rahmen in einer Vorrichtung aufgenommen werden kann. Folgerichtig ist es wichtig, andere Maße festzuhalten, die den Nachlauf ändern können, so daß man weiß, ob er sich vergrößert oder verringert hat. Das ist ein weiteres Beispiel für eine sinnvolle Verwendung einer Maßstabszeichnung. Der Nachlauf und die Gewichtsverteilung sind bereits in der Konstruktionsphase und anschließend beim Testen des Motorrads zwei der wichtigsten Größen. Andere Kriterien wie Auswechseln der Radaufhängungen sind nur wichtig für die Änderung der grundsätzlichen Geometrie. Es werden noch weitere Modifikationen nötig sein, um ein besseres Fahrverhalten zu erzielen oder die Bodentreue zu verbessern, usw. Jedesmal müssen dabei die Auswirkungen der Lenkgeometrie auf das Fahrverhalten und der Einfluß auf die Fahreigenschaften betrachtet werden.

Die Radlastverteilung ist von großer Bedeutung : Sie beeinflusst das Bremsvermögen, die Beschleunigung und das Kurvenverhalten. Bei manchen Wettbewerbsmotorrädern wird sie geändert, um die Anpassung an verschiedene Kurse zu erzielen. Sie (oder die Lage des Schwerpunkts des Motorrads) spielt immer wieder eine Rolle und ist sehr einfach mit gewöhnlichen Badezimmerwaagen zu messen.

1. Benützen Sie zwei Waagen oder stellen Sie das nichtgewogene Rad mithilfe von Holzklötzen oder ähnlichem auf dieselbe Höhe wie das andere. Das Motorrad muß eben stehen oder solange unterbaut werden bis es eben steht.
2. Eichen Sie die Waagen mit Eichgewichten oder mit sich selbst, wenn Sie sich vorher genau gewogen haben. Stellen Sie die Skalenjustierung auf Ihr persönliches Gewicht ein. Stellen Sie zuletzt sicher, daß beide Waagen bei gleichem Gewicht das gleiche anzeigen.
3. Wiegen Sie Vorder- und Hinterrad ebenerdig. Das Motorrad muß normal mit Kraftstoff, Öl und dem Fahrer in seiner normalen Sitzposition beladen sein.
4. Wiederholen Sie diese Messungen bis sie miteinander übereinstimmen.
5. Heben Sie die Front zirka sechzig Zentimeter an und wiederholen Sie die Messungen. Halten Sie das Motorrad mit dem geringsten Kraftaufwand während aller Messungen so senkrecht wie möglich. Stricke oder Gurte, waagrecht zu beiden Seiten des Motorrads, können dabei helfen. Stellen Sie sicher, daß diese die Messung nicht beeinflussen.
6. Messen Sie den Rollradius jedes Reifens und den Radstand oder benützen Sie Herstellerangaben.

Wenn der Radstand eines Motorrads  $w$  ist, hat der Schwerpunkt einen Abstand  $x$ , horizontal von der Vorderachse, und einen Abstand  $y$ , vertikal zur Fahrbahn. Das Gewicht, das auf Vorder- und Hinterrad lastet wird mit  $F_1$ ,  $F_2$  und  $R_1$ ,  $R_2$  angegeben. Der Index 1 gibt die ebenerdige Messung an, 2 kennzeichnet die Messung mit hochgestelltem Vorderrad.

Aus der horizontalen Messung erhalten wir die Gewichtsverteilung  $F_1/R_1$  oder in Prozent ausgedrückt:

$$\text{Vorderradlast} = 100 F_1 / (F_1 + R_1) \quad \text{ön teker yüku}$$

$$\text{Hinterradlast} = 100 R_1 / (F_1 + R_1) \quad \text{arka teker yüku}$$

Wir können ebenso den Wert für  $x$  errechnen:

$$x = R_1 w / (F_1 + R_1)$$

Wenn die Höhe des Vorderrads über dem Hinterrad  $h$  und der Rollradius der Räder  $r_f$  und  $r_r$  ist, berechnet sich die Höhe des Schwerpunkts aus:

$$y = R_2 h / (R_2 + F_2) \sin \varphi \tan \varphi - x / \tan \varphi + r_f + x(r_f - r_r) / w$$

$$\text{woraus } \sin \varphi \approx h / w$$

Aus diesen Gleichungen ist es möglich, die Werte für die Höhe und Lage des Schwerpunkts zu erhalten, wenn der Rollradius der Reifen und das Gesamtgewicht des Motorrads festgestellt wurden. Diese Angaben sind nützlich, um das Beschleunigungs- und Bremspotential des Motorrads oder die Notwendigkeit einer Anti-Dive-Einrichtung zu errechnen (siehe Anhang und Kapitel 6). Es ist auch möglich, die Aus-

wirkung der Schwerpunktsverlagerung nach oben, unten, vor- und rückwärts festzustellen, um die beste Traktion zu finden. Diese Betrachtungen bestimmen die Wahl der Motormontage, die Länge der Schwinge, usw. Wenn die günstigste Lage des Schwerpunkts einmal festgelegt ist, versucht man, so nah wie möglich, dort hinzukommen, ohne die Bodenfreiheit, den optimalen Radstand oder das Fahrverhalten, usw. zu verändern.

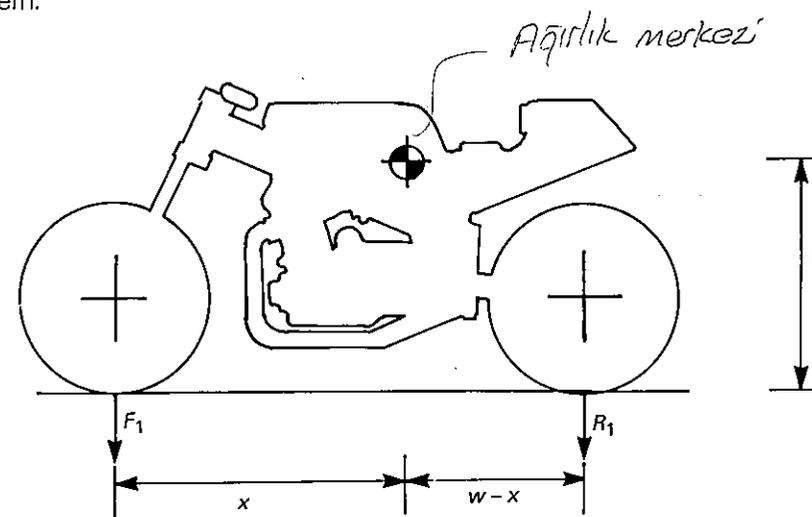


Abbildung 2.4

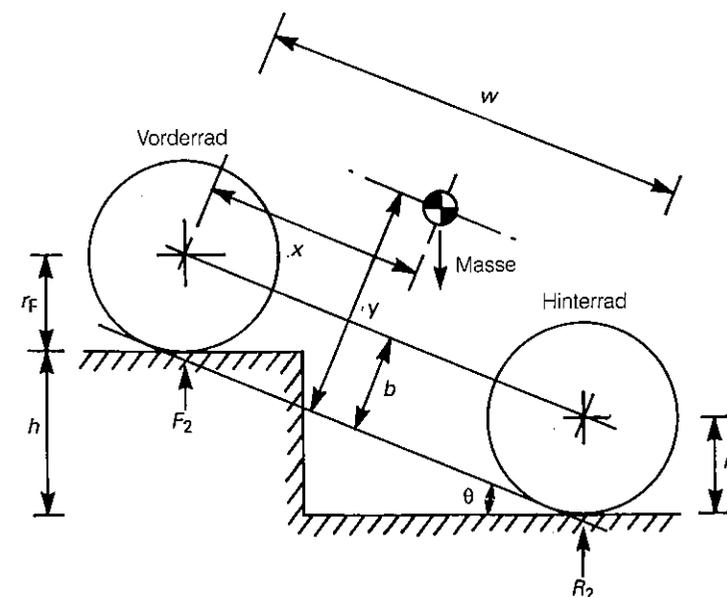


Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 Die Lage des Schwerpunkts kann durch ebenerdiges Wiegen und durch Wiegen bei Anhebung eines Rades gemessen werden.

Je weiter hinten die Lage des Schwerpunkts ist, um so größer ist wegen der höheren Last der Kraftschluß am Hinterrad. Das verstärkt allerdings, ebenso wie ein hoher Schwerpunkt, auch die Tendenz zum Wheelie bei voller Beschleunigung, da das rückwärtsdrehende Moment um den hinteren Reifenaufstandspunkt ansteigt. Daher ergibt eine Verlagerung des Gewichts nach hinten mehr Kraftschluß und vergrößert die Wahrscheinlichkeit eines Wheelie's. Wenn man mehr Gewicht nach vorne und weiter unten verschiebt, verringert man beide dieser Möglichkeiten, erhöht dabei aber die Gefahr durchdrehender Räder.

Im Anhang berechnet das Programm RL die Beschleunigung und sagt im Grenzfall Wheelies oder durchdrehende Räder voraus. Die Rechnung ist einfach, aber langwierig, für alle Motor-, Drehzahl- und Leistungsvarianten auszuarbeiten. Bei Verwendung des Programms ist es möglich, verschiedene Lagen des Schwerpunkts auszuprobieren und den Radstand, den Kraftschlußbeiwert, den Rollradius und die aerodynamischen Gegebenheiten des Motorrads zu ändern. Das Ergebnis zeigt die Beschleunigung von null bis zur maximalen Geschwindigkeit.

*en uyğun ağırlık  
merkez yeri*

## Optimale Schwerpunktslage

Die Lage des Schwerpunkts bestimmt die Gewichtsverlagerung während dem Bremsen und Beschleunigen. Es bestimmt daher auch die übertragbaren Längsführungskräfte an jedem Rad.

Falls wir nun annehmen, daß wir ideale Bedingungen haben, das heißt, daß das Hinterrad genau dann zum Durchdrehen anfängt, wenn das Vorderrad während der Beschleunigung gerade abheben will ( und beim Bremsen das Vorderrad genau dann blockieren will, wenn das Hinterrad anfängt abzuheben) kann die Geometrie des Motorrads so ausgelegt werden, daß diese Bedingungen erreicht werden.

Wenn die Masse des Motorrads  $m$  ist, befindet sich der Schwerpunkt im Abstand  $x$  hinter dem Vorderrad und im Abstand  $y$  über dem Boden. Der Radstand beträgt  $w$  (siehe Abbildung 2.6). Dann können die Kräfte, die auf das Motorrad wirken, berechnet werden. Die Kräfte zwischen Fahrbahn und Reifen betragen  $R$  (vorne) und  $R_1$  (hinten), der Kraftschlußbeiwert zwischen Reifen und Straße ist  $\mu$ .

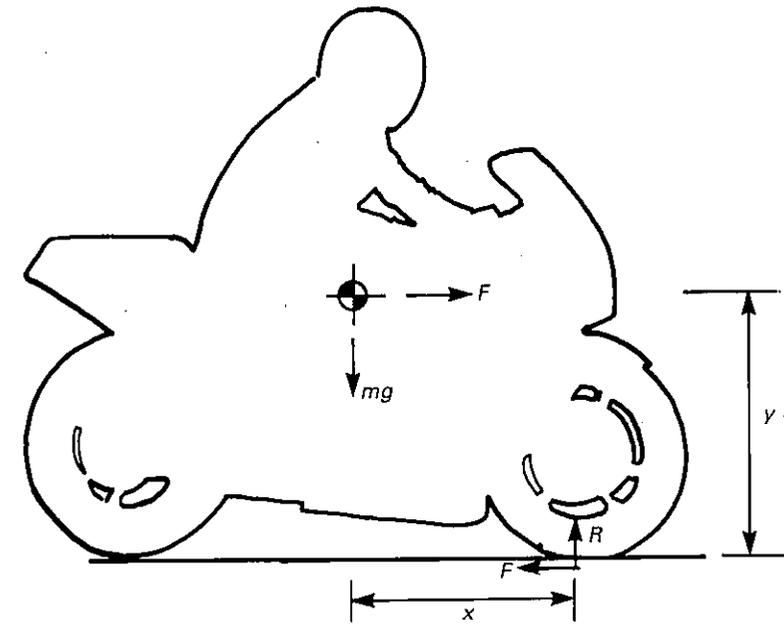
Beschleunigung *artım*

Die maximale Längsführungskraft, die vom Hinterreifen übertragen werden kann, ist  $R_1\mu$ , bevor der Reifen zum Durchdrehen anfängt. Falls das Vorderrad an diesem Punkt abhebt, beträgt  $R_1 = mg$ , das heißt, das gesamte Gewicht hat sich auf das Hinterrad verlagert.

Das Moment, das versucht, das Motorrad zu überschlagen, beträgt  $R_1\mu y = mg\mu y$  und die entgegengesetzte Gewichtskraft des Motorrads beträgt  $mg(w-x)$ . Wenn beide ausgeglichen sind, gilt:

$$mg(w - x) = mg\mu y$$

$$w - x = \mu y$$



**Abbildung 2.6** Übertragbare Kräfte Beschleunigungs- und Bremskräfte werden auf der Fahrbahn erzeugt, während die Massenträgheitskraft des Motorrads im Schwerpunkt angreift. Die Höhe des Schwerpunkts erzeugt ein Moment  $Fy$ , das versucht, das Motorrad um die Querachse zu drehen. Es erzeugt während der Beschleunigung eine höhere Radlast am Hinterrad und während des Bremsens mehr Radlast am Vorderrad. So ist die senkrechte Komponente am Radaufstandspunkt ( $R$ ) gegen  $mg$ , die Massenkraft der Maschine, gerichtet.

Bremsen

Die maximale Kraft, die vom Vorderrad übertragen werden kann, beträgt  $R\mu$ , die zu  $mg\mu$  wird, wenn das Hinterrad anfängt abzuheben. Das Drehmoment ist wie vorher  $mg\mu y$  (aber in umgekehrter Richtung), die stabilisierende Wirkung des Gewichts beträgt  $mgx$ , daher gilt:

$$mgx = mg\mu y$$

$$x = \mu y$$

Aus Gleichung 2.1 und 2.2 errechnet sich :

$$y = w/2\mu \text{ und } x = w/2$$

Daher sollte sich also der Schwerpunkt mitten zwischen den Radaufstandspunkten befinden. Seine Höhe hängt vom Radstand und der möglichen Reifenhaftung ab. Falls  $\mu = 1$  ist, (Sportmischung, trockene Straße) ist  $y = w/2$ . Die Höhe des Schwerpunkts beträgt dann die Hälfte des Radstands. Falls  $\mu = 0,5$  ist, (Straßenreifen, nasse Straße) dann beträgt  $y = w$ .

Anmerkung: Es gibt ein weiteres Drehmoment, das von der Beschleunigung der Räder verursacht wird. Dessen Wirkung, die vom Massenträgheitsmoment der Räder und ihrer Beschleunigung abhängt, addiert sich in beiden Fällen zum Gesamtmoment. Es wird aber in diesen Gleichungen nicht berücksichtigt.

Das entspricht zwar nicht vollkommen der Praxis, wenn aber der Reibwert nieder ist, kann der Fahrer die Zugkraft durch Schwerpunktsverlagerung nach oben erhöhen (indem er sich beim Straßenrennmotorrad aufrichtet oder bei einem Crossmotorrad aufsteht) oder beim Beschleunigen nach hinten und beim Bremsen nach vorn verlagert (indem der Wert von  $y$  geändert wird). Der Grenzwert ist erreicht, wenn das Hinterrad durchdreht oder das Vorderrad zum Blockieren neigt. Während dem Bremsen blockiert das Vorderrad meist bevor das Hinterrad abhebt. Je mehr Gewicht auf dem Hinterrad ist, um so mehr Bremskraft kann übertragen werden, wenn auch die Hinterradbremse die vordere bei schwierigen Bedingungen unterstützt. (Beachten Sie, daß das wiederum eine größere Gewichtsverlagerung bedeutet, wodurch wieder mehr Bremskraft am Vorderrad übertragen werden kann.) Die Größen  $x$  und  $y$  berücksichtigen jedoch noch nicht die Bewegung der Radaufhängungen, die durch die Gewichtsverlagerung verursacht werden. Deshalb geben die Größen  $x$  und  $y$  die Lage des Schwerpunkts während der Beschleunigung oder Verzögerung an. Bremsen bedingt ein Einfedern der Vorderradaufhängung, wodurch der Schwerpunkt absinkt (auch der Radstand verkürzt sich bei Teleskopgabeln). Dadurch sind die statischen Werte für  $y$  und  $w$  geringfügig größer als die Werte, die sich aus den Gleichungen oben ergeben. Gleichermaßen federt die Hinterradaufhängung während der Beschleunigung ein.

Bevor man versucht, die Federwege zu berechnen, ist es einfacher, sie zu messen (ein Fettfilm auf den Gabelstandrohren oder der Dämpferstange zeigt den eingefederten Weg an). Benützen Sie anschließend eine Zeichnung, um die daraus resultierende Bewegung des Schwerpunkts herauszufinden. Um die optimale Lage des Schwerpunkts zu erhalten, ist es eventuell notwendig, das Motorrad höher oder tiefer zu legen, den Radstand zu ändern oder Einrichtungen wie Anti-Dive-Systeme an Vorder- oder Hinterrad zu verwenden (siehe Kapitel 5 und 6).

Diese Betrachtungen beziehen sich auf Beschleunigen und Bremsen in Geradeausfahrt. Während der Kurvenfahrt ist der gleiche Kraftschluß an beiden Rädern erforderlich. Daher ist eine Lage des Schwerpunkts nahe der Mitte zwischen den Radachsen wünschenswert. Die Höhe des Schwerpunkts kann eher einen Kompromiß darstellen. Je höher sie und die Verzögerung ausfallen, umso größer ist die Radlaständerung. Ein höherer Schwerpunkt hat in Kurven auch einen etwas kleineren Rollwinkel zur Folge, was vor allem bei breiteren Reifen eine Rolle spielt.

Der Nutzen eines niederen Schwerpunkts liegt darin, daß die Masse des Motorrads ein geringeres Massenträgheitsmoment um seine Rollachse hat (welche auf oder geringfügig über dem Boden liegt). Weniger Massenträgheitsmoment bedeutet, daß das Motorrad schneller rollt und ein besseres Ansprechverhalten auf Lenkreaktionen hat. Auch während des Rollvorgangs ist dieser leichter zu unterbrechen oder die Bewegung rückgängig zu machen. Während der Kurvenfahrt haben die Reifen sowohl Seiten- als auch Längsführungskräfte des Antriebs zu übertragen. Daher werden die Grenzwerte eher durch ein Sliden oder Durchdrehen der Räder als durch einen Wheelie oder Überschlag begrenzt. Versuchsweise sollte, wenn die Räder zum Blockieren oder Durchdrehen neigen, der Schwerpunkt angehoben und in Richtung des betreffenden Rades verschoben werden. Falls bei dem Motorrad im Grenzbereich ein Rad abhebt, sollte der Schwerpunkt tiefer gelegt oder in die Richtung verschoben werden, in welcher das Rad abhebt. (Motorräder können sogar während der Kurvenfahrt ein Wheelie produzieren oder während dem Bremsen das Hinterrad

heben. Dies tritt normalerweise aber nur dann auf, wenn das Heck ausbricht und die Vorderradbremse in einer Kurve benützt wird.)

Um das Fahrwerk abzustimmen, gibt es viele Verstellmöglichkeiten. Durch weitere Änderungen können die Fahreigenschaften beeinflusst werden. Das alles sollte gemessen werden bevor das Motorrad getestet wird. Es sind :

## 1. Radlager

Benützen Sie ein Lagerfett und stellen Sie sicher, daß die Radlager exakt ausdistanziert sind. Auch die Gabel sollte so ausdistanziert sein, daß beim Festziehen des Rads keine Verspannungen in den Standrohren auftreten. (siehe Kapitel 4, Einzelheiten für Auswuchten, Seiten- und Höhenschlag, usw.)

## 2. Ausrichten der Räder

Richten Sie Ritzel und Kettenrad so aus, daß die Kette exakt fluchtet. Richten Sie dann die Räder genau aus und benützen Sie dabei Felgen, bei denen die Reifen noch nicht montiert sind. Das Hinterrad muß genau in der Mittelebene des Motorrads stehen, das Vorderrad sollte exakt nach ihm ausgerichtet sein. Es ist wahrscheinlich notwendig, für unterschiedliche Felgenbreiten Distanzscheiben herzustellen, so daß rechte Winkel oder ein Lineal, das so hoch wie möglich an der Felge angelegt wird, benützt werden können. Die beiden Kontaktpunkte sollten so weit wie möglich voneinander entfernt sein. Vielleicht ist es auch erforderlich, Distanzscheiben zu schleifen, um eine exakte Flucht zu erhalten. Überprüfen Sie, daß die Einstellung mit der Distanzierung der Bremsen übereinstimmt und Freigang zwischen der Kette und Schwinge besteht, wenn der Reifen montiert ist.

Wenn ein sehr breiter Reifen verwendet wird, ist es eventuell notwendig, Ritzel und Kettenrad nach außen zu versetzen, indem am Getriebe ein Ritzel mit Versatz oder eine längere Getriebeausgangswelle verwendet wird, oder der Motor versetzt wird. Da die Verwendung eines breiten Reifens einen hohen Kraftschluß erlaubt, kann das auch bedeuten, daß das Ritzel beziehungsweise die Getriebeausgangswelle durch ein weiteres Lager unterstützt werden müssen. Versuchen Sie nicht, den Hinterreifen aus der Mitte heraus zu versetzen. Es ist besser, den Motor nach einer Seite zu verschieben.

Wenn die Räder exakt ausgerichtet sind, eichen Sie die Justierung der Kettenspanner, stellen einen neuen Maßstab her oder bringen die Kettenspanner auf gleiche Länge, so daß immer verglichen werden kann, wenn die Position des Rads verändert wird.

Die Änderung der Kettenspannung sollte über den ganzen Federweg überprüft werden, bevor die Feder montiert wird. Vielleicht werden ein Kettenspanner oder Führungsschienen erforderlich. Kunststoffführungsschienen sind an vielen Motorrädern bereits serienmäßig montiert. Es dürfte nicht schwierig sein, etwas passendes zu finden. Spannen Sie die Kette in der Position, in der sie am strammsten ist, wobei sie dann nicht zu stark gespannt werden darf. Überprüfen Sie dann, wie locker die Kette

ist, wenn das Motorrad in seiner normalen Position steht, so daß in Zukunft die Kette in dieser Stellung justiert werden kann.

### 3. Lagerung der Radaufhängung

Säubern und fetten Sie diese Lager regelmäßig. Benützen Sie das Fett, um Hohlräume auszufüllen, um Schmutz und Wasser abzuhalten. Die Lager sind meist spielfrei und ohne Vorspannung montiert. Es ist vielleicht notwendig, Distanzscheiben herzustellen, um das zu garantieren. Kegelrollenlager sind mit Vorspannung montiert. Überprüfen Sie daher zuerst die Betriebsanleitung der Hersteller.

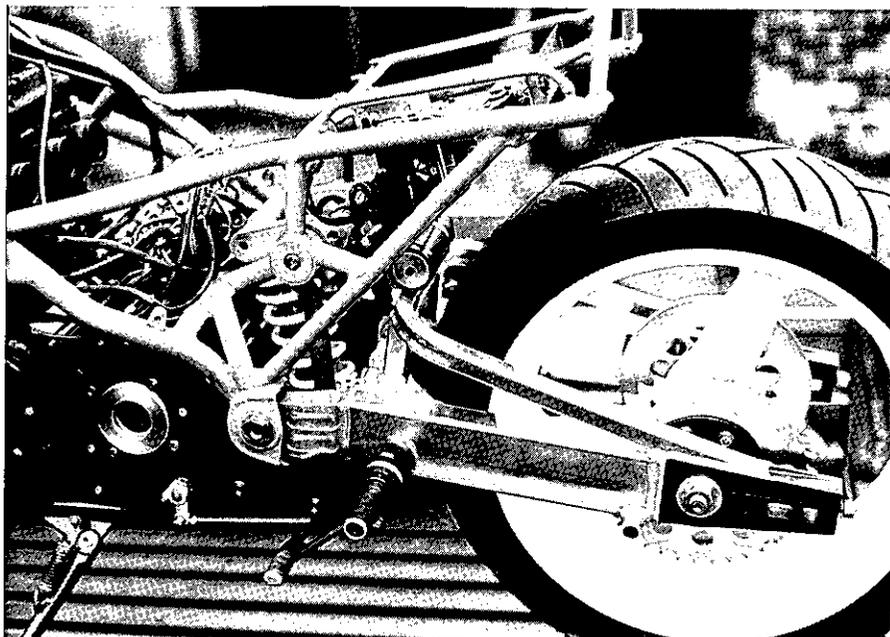


Abbildung 2.7 Außenliegendes Lager, das die Getriebeausgangswelle unterstützt, montiert an einem Spezialfahrwerk von Steve Burns.

### 4. Steuerkopflager

Die Einstellung ist sehr kritisch. Bauen Sie sämtliche hindernden Einrichtungen wie Bowdenzüge oder Kabel ab und beobachten Sie über den gesamten Lenkeinschlag den Verlauf von wichtigen Zügen, die sich beim Lenken mitbewegen.

Heben Sie den Vorbau an, bis die Vorderradaufhängung vollständig frei ist. Lösen Sie die Gabelbrücken und sämtliche Muttern für die Einstellung des Steuerkopflagers. Ziehen Sie die Steuerkopfmutter an bis sich die Lenkung gerade noch unter dem eigenen Gewicht ohne spürbares Spiel bewegt. Falls Pitting oder Schwergängigkeit in

den Lagern auftritt, montieren Sie neue. Achten Sie darauf, daß Sie beim Anziehen der Kontermutter die Steuerkopfmutter nicht verdrehen. Wenn Kegelrollenlager das erste Mal montiert werden, zieht man die Mutter zuerst fest an, um die Lager auf ihre Sitze zu drücken. Vor der endgültigen Einstellung wird sie wieder gelöst.

Kugellager sind weniger empfindlich bei der Einstellung und können normalerweise eher axiale Kräfte aufnehmen. Kegelrollenlager bedürfen einer sehr sorgfältigen Fixierung und werden mit radialen Lasten, zum Beispiel Bremskräften, besser fertig. Eine Kombination eines Kugellagers unten und eines Kegelrollenlagers oben ist möglich. Falls im Betrieb harte Stöße, Wheelies oder Sprünge auftreten, werden die Laufringe bald Schäden wie Pitting zeigen, und müssen dann ersetzt werden.

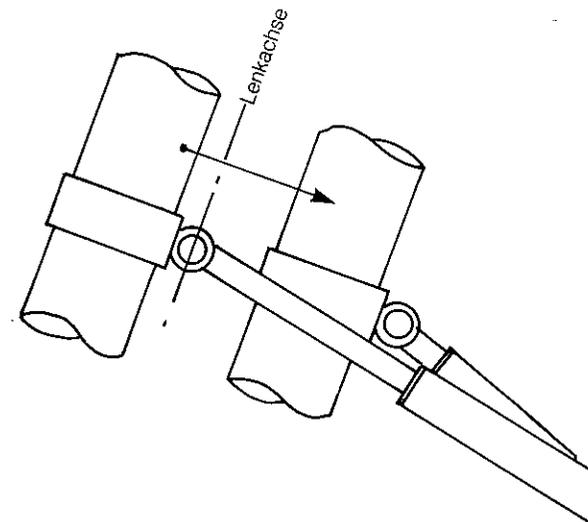


Abbildung 2.8 Ein Lenkungsdämpfer sollte so montiert werden, daß das bewegliche Ende einen rechten Winkel zum Steuerkopf bildet. Andernfalls verdreht sich das Gehäuse, wenn die Lenkung verdreht wird. Wenn möglich, sollten die Enden in Kugelhülsen gelagert sein.

### 5. Lenkungsdämpfer

Seine einzige Aufgabe ist es, Lenkerflattern beziehungsweise Lenkerschlagen beim Überfahren von Bodenwellen mit dem Vorderrad oder beim Beschleunigen zu unterbinden. Er kann dagegen Pendeln oder andere Stabilitätsprobleme nicht lösen und sie sogar verstärken. Er sollte entweder so montiert sein, daß die Kolbenstange neunzig Grad zum Standrohr steht (genauer gesagt zur Lenkachse) oder so, daß das Gehäuse und die Kolbenstange in Kugelhülsen gelagert sind. Andernfalls versuchen die Lenkbewegungen, den Dämpfer zu verdrehen.

## 6. Massenträgheitsmoment um den Steuerkopf

Das Ansprechverhalten der Lenkung und die Stabilität sind proportional zur Masse, die um die Lenkachse bewegt wird und den Abstand zur Lenkachse. Die Teile sollten daher abgebaut, in ihrer Position verändert oder erleichtert werden:

1. Lenker kürzen und erleichtern
2. Spiegel und Blinker an der Verkleidung montieren
3. Instrumente und Lampen am Rahmen oder in der Verkleidung montieren
4. Bei Hebeln und Hauptbremszylinder leichtere Komponenten oder einen seitlichen Behälter verwenden, der nahe an der Lenkachse montiert ist (wenn möglich getrennt für hydraulische Kupplungsbedätigung und Bremse)
5. Kotflügel und Gabelstabilisator so leicht wie möglich ausführen
6. Bremszangen – Verwenden Sie leichte Werkstoffe, montieren Sie sie so nahe wie möglich an der Lenkachse (das heißt, normalerweise hinter dem Gleitrohr)
7. Räder und Bremscheiben, bei der vorgegebenen Größe, die notwendig erscheint, so leicht wie möglich halten.

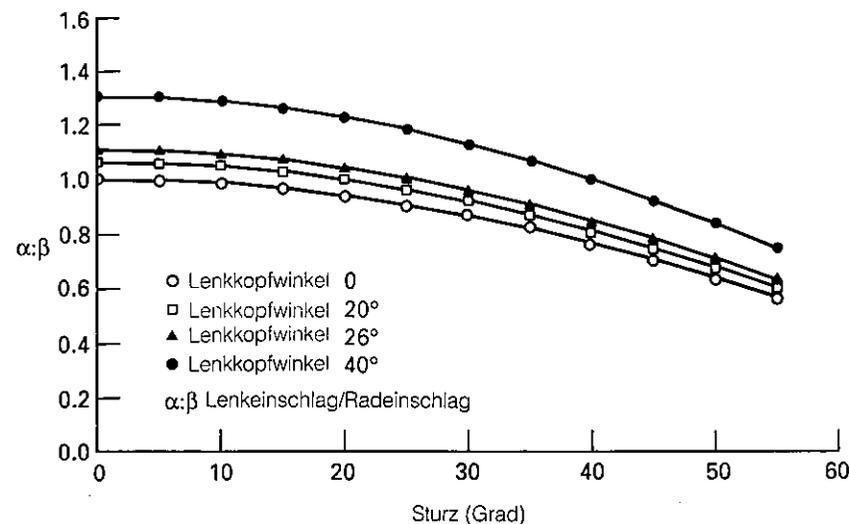


Abbildung 2.9 Das Verhältnis zwischen Lenkwinkel am Lenker und Lenkwinkel am Radaufstandspunkt ( $\alpha/\beta$ ) bei unterschiedlichem Sturz (Rollwinkel) und Steuerkopfswinkel

## 7. Vorbauhöhe

Sie kann dadurch geändert werden, daß man verschieden lange Federn montiert oder eine unterschiedliche Federrate oder Federbasis verwendet. Man kann sie auch ändern, indem man die Standrohre in den Gabelbrücken verschiebt. Daraus resultiert eine Änderung des Steuerkopfswinkels und des Nachlaufs (ein Absenken der Front

ergibt einen steiler stehenden Lenkkopf und weniger Nachlauf, die Lenkung wird dadurch leichtgängiger, sensibler und weniger stabil). Es ändert sich auch die Bodenfreiheit und die Frontfläche. Die Gabel/Gabelbrückenlage sollte gemessen werden, ebenso der Abstand zwischen dem ungefederten Teil der Gabel und einem gut zugänglichen Teil der gefederten Masse (normalerweise der unteren Gabelbrücke). Es kann notwendig werden herauszufinden, wie sich dieser Abstand im Betrieb ändert (verantwortlich zum Beispiel für den Auftrieb oder das Einfedern der Aufhängung nach eine Reihe von Bodenwellen).

## 8. Sitzhöhe

Wie an der Vorderradaufhängung, ergibt sich auch am Heck eine Veränderung durch Verändern der Federrate, Federlänge oder Federbasis. Es ist auch möglich, längere Federeinheiten zu montieren oder das Federbein oder Teile der Hebelumlenkung zu tauschen, um die Sitzhöhe zu verändern. Wenn man die Sitzhöhe anhebt, steht der Lenkkopf steiler und der Nachlauf verringert sich (bessere Handlichkeit). Ebenso erhöht sich die Bodenfreiheit. Am zweckmäßigsten ist es, von der höchsten Stelle der Schwinge, nahe der Schwingenachse, senkrecht zu einem zugänglichen Teil der Verkleidung zu messen.

## 9. Radabmessungen

Das Massenträgheitsmoment des Rades ist proportional zu seinem Gewicht und zum Quadrat seines Durchmessers. Daher können die größten Veränderungen im Fahrverhalten durch die Montage kleinerer Räder erreicht werden. Der Durchmesser des Rades und des Reifens beeinflusst aber auch die Bodenfreiheit, die Übersetzung (am Hinterrad), die Tachoübersetzung, wahrscheinlich auch den Lenkkopfwinkel und den Nachlauf (eine Maßstabszeichnung zeigt wieviel), und abhängig vom Durchmesser der Scheiben, die Bremskraft (siehe Kapitel 6). Dadurch können einige grundsätzliche Verschiebungen und Freigangprobleme mit der Kette, der Bremsmomentenabstützung, dem Kotflügel, usw. auftreten, insbesondere, wenn Reifen bei höherer Geschwindigkeit wachsen (Diagonalreifen ändern sich stärker, Gürtelreifen und Radialreifen weniger).

## 10. Nachlauf

An manchen Motorrädern ist er direkt einstellbar. Grundsätzlich bedeutet mehr Nachlauf eine größere Auslenkung der Reifenaufstandsfläche für einen gegebenen Lenkwinkel. Das Lenkmoment ist deshalb größer, das Rückstellmoment (das das Rad in die Geradeausstellung zurückstellen will, falls man den Lenker losläßt) wird größer. Die Lenkung ist schwergängiger und stabiler, falls der Nachlauf verlängert wird.

## 11. Lenkkopfwinkel

Er ist an den wenigsten Konstruktionen direkt verstellbar. Er überträgt den Lenkeinschlag auf den Radeinschlag: Ein steiler Lenkkopfwinkel überträgt die Bewegung des Lenkers sehr direkt, ein sehr flacher Lenkkopfwinkel dreht das Rad nicht so weit ein, neigt es aber beim Einschlagen stärker (ein Winkel von null Grad zur Horizontalen würde keinen Einschlag ergeben, das Rad würde sich dagegen neigen, welchen Winkel man am Lenker auch immer einschlägt). Im gewöhnlichen 60 Grad-Bereich gibt es eine Mischung aus Einschlag und Sturz, die sich mit dem Betrag des Nachlaufs überlagert und die Lenkkraft hervorruft, die wir fühlen.

Der Einschlagwinkel am Rad hängt, bedingt durch den Nachlauf und die Neigung der Lenkachse, vom Einschlag am Lenker ab. Wenn  $\alpha$  der Lenkwinkel am Lenker,  $\beta$  der Lenkwinkel am Rad,  $\gamma$  der Lenkkopfwinkel aus der Vertikalen gemessen und  $\varphi$  die Neigung aus der Vertikalen ist, dann wird:

$$\beta = \alpha \cos \gamma / \cos \varphi$$

Ein steiler stehender Lenkkopf macht die Lenkung direkter, aber auch schwergängiger.

## 12. Länge der Schwinge

Eine Längenänderung ändert den Radstand. Eine längere Schwinge bewirkt einen größeren Wendekreis bei gegebenem Einschlag. Da das Motorrad weniger empfindlich auf Lenkungseinflüsse reagiert, wird es stabiler und gleichzeitig weniger wendig.

Eine Änderung des Radstands verändert auch die Gewichtsverteilung beträchtlich. Eine längere Schwinge bedeutet weniger Gewicht auf dem Hinterrad, das daher mehr zum Durchdrehen neigt. Falls das Gewicht und der Schwerpunkt bereits bekannt sind, kann dieses leicht errechnet werden (siehe Kapitel 5).

Da die Radaufhängung nun mit einem längeren Hebelarm arbeitet, nimmt die Federrate ab, das heißt, eine längere Schwinge ergibt eine weichere Radaufhängung. Falls die Schwinge nicht horizontal steht, bewirkt dies einschließlich der Wirkung auf die Hebelumlenkung der Radaufhängung eine Änderung der Sitzhöhe und die Neigung, beim Beschleunigen einzutauchen.

## 13. Motorhalterungen

Wenn man den Motor vorwärts oder rückwärts verlagert, ist das ein gängiger Weg, die Gewichtsverteilung zu ändern. Wettbewerbsmotorräder haben manchmal verschiedene Einstellungen, so daß, abhängig vom Kurs, mehr oder weniger Kraftschluß erzielt werden kann.

## 14. Sitzposition

Da der Fahrer fast fünfzig Prozent des gesamten Gewichts einer Wettbewerbsmaschine ausmacht, kann es von Vorteil sein, seine Sitzposition zu verändern, um die Gewichtsverteilung zu beeinflussen. Das bedeutet, besonders in der Entwicklungsphase, eine Änderung des Sitzes, des Lenkers und der Fußrasten, um eine komfortable Position zu garantieren. Außer dem Einfluß auf den Sitzkomfort, ist es auch eine gängige Methode, mehr Kraftschluß zu erzielen.

Alle diese Faktoren sollten festgelegt werden, bevor das Motorrad gebaut wird, die Einstellungen eingezeichnet oder aufgeschrieben und jegliche Nebeneffekte in Betracht gezogen werden. Um die Fahreigenschaften zu verändern, sind der Nachlauf (der sich mit dem Lenkkopfwinkel ändert) und die Gewichtsverteilung die wichtigsten Punkte. Alles andere ist zweitrangig oder hat andere Funktionen. Die Radaufhängung kann zum Beispiel (ob beabsichtigt oder nicht) die Lenkgeometrie verändern und sich daher auf die Fahreigenschaften auswirken.

## Lenkreaktion

Falls der Lenkeinschlag des Rads am Boden  $\beta$  und der Lenkwinkel am Lenker  $\alpha$  ist, resultiert daraus :

$$\alpha = \beta \cos \gamma / \cos \varphi$$

worin  $\gamma$  der Sturz und  $\varphi$  der Steuerkopfwinkel, beide zur Vertikalen gemessen, sind.

Der Fahrer muß mit dem Abstand  $x$  von der Lenkachse eine Kraft  $F$  auf den Lenker ausüben, so daß das Lenkmoment  $Fx$  beträgt.

Daraus ergibt sich ein Gleichgewicht zwischen Reifen und Straße, das von verschiedenen Faktoren abhängt. Der Mittelpunkt der Reifenaufstandsfläche ist um den Abstand  $y$  verschoben, so daß  $y = t \sin \beta$  beträgt (wobei  $t$  der Nachlauf ist), verursacht durch den Lenkwinkel. Er ist ebenso in der entgegengesetzten Richtung durch die Schräglage des Motorrads, und dadurch versetzt, daß sich die Reifenaufstandsfläche auf dem Umfang der Reifenschulter bewegt. Der vollständige Versatz des Zentrums der Reifenaufstandsfläche beträgt:

$$y = t \sin \beta - r \tan \gamma$$

wobei  $r$  der Reifenradius bei diesem Rollwinkel ist.

Bei einem Lenkeinschlag beträgt :

$$y = t \sin (\alpha \cos \varphi / \cos \gamma) - r \tan \gamma$$

Die verschiedenen Kräfte im Reifenaufstandspunkt bewirken ein Moment um die Lenkachse, und zwar : Die Radlast  $mg$  verursacht ein Moment  $mg t \sin \gamma \cos \varphi$ , das zur

Kurvenaußenseite wirkt. Die Zentripetalbeschleunigung  $a$ , hervorgerufen durch die Kraft  $ma$ , bewirkt ein Moment  $mat \cos \gamma \cos \varphi$ , das zur Kurveninnenseite wirkt. Der Rollwiderstand oder eine Bremskraft  $D$  bewirken ein Moment  $Dy \cos \varphi$ , das zur Kurvenaußenseite wirkt.

Bei stationärer Kreisfahrt ist:

$$F_x = mgt \sin \gamma \cos \varphi + Dy \cos \varphi - mat \cos \gamma \cos \varphi$$

Daraus ist ersichtlich, daß die erforderliche Kraft am Lenker von der Lenkgeometrie des Motorrads und der Schräglage in der Kurve abhängt. Entsprechend dem relativen Betrag jeder Komponente kann der Betrag  $F_x$  positiv, null oder negativ sein. Er kann sich sogar von negativ zu positiv ändern, falls eine der Einflußgrößen entsprechend variiert (zum Beispiel, wenn die Bremse benutzt wird, entsteht ein Drehmoment, das versucht, die Lenkung einzuschlagen).

## Reifen

Die Reifen haben entscheidenden Einfluß auf das ganze Motorrad. Das gesamte Motorrad sollte zusammen mit den Reifen konstruiert werden, die sich am besten für die vorgesehene Aufgabe eignen. Die Wahl der Reifen bestimmt die Felgenbreite, die Bremsenabmessungen, die Gabel, die Gabelbrücken, die Schwinge, die Kettenflucht (und dadurch die Position des Motors). Sie beeinflußt sogar die Lenkgeometrie. Sie bestimmt die grundsätzliche konstruktive Auslegung und kann Änderungen nach sich ziehen.

Die Auswahl der Reifen ist nicht einfach. Der einzig sichere Weg ist, sie am Motorrad und in der Umgebung zu testen, in der sie später eingesetzt werden (siehe Kapitel 11). Tests von weiteren Fahrern und Fachzeitschriften sind eine nützliche Hilfe. Hüten Sie sich aber, sich zu sehr auf Reifen zu verlassen, die von Sponsoren an Fahrer geliefert werden, da sie oft nicht dieselben sind, die es im Laden zu kaufen gibt, obwohl sie dasselbe Profil und dieselben Bezeichnungen haben. Falls der Hersteller die richtige Wahl des Fahrers getroffen hat, ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß er alles mögliche auf dem Reifensektor ausprobiert.

Eine Tabelle der Abmessungen gibt es von jedem Hersteller. Sie beruht auf Normen, nach denen Reifen gebaut werden. Tatsächlich weichen Reifen aber oft von den angegebenen Dimensionen ab. Sie verändern sich wiederum in Abhängigkeit von der Felgenreife, dem Gewicht, dem Druck und von der gerade gefahrenen Geschwindigkeit. Für Wettbewerbszwecke schwanken die Abmessungen der Reifentypen oft beträchtlich. Die einzigen, die in der Regel sinnvolle Angaben über die erhältlichen Reifen machen können, sind Reifenhersteller, Reifenfachleute und spezielle Zulieferer, die einen Reifenservice betreiben. Sie sollten zumindest in der Lage sein, die Wahl der Reifen so stark einzugrenzen, daß der Benutzer damit umgehen kann.

Logischerweise bestimmen die Reifenabmessungen die Menge an Gummi, die mit dem Boden in Berührung kommt, besonders dann, wenn die Maschine sich in Schräglage befindet. Die Größe und die Form der Reifenaufstandsfläche sind wichtig. Es gibt darüber hinaus aber noch weitere Kriterien. Der Reifen ist, von der Seite betrachtet, rund. Er ist aber auch im Querschnitt näherungsweise rund. Er muß also dort, wo er den Boden berührt, in der Lage sein, sich zu einer ebenen Fläche zu verformen, auch dann, wenn das Rad Sturz hat. Diese ständige Verformung erwärmt den Reifen. Obwohl er flexibel sein muß, unterliegt er dort, wo er den Boden berührt, starken Abstützkräften. Jede Verwindung, jegliches Zusammenfallen oder jede Wölbung der Kontaktfläche ergibt einen Verlust an Haftung.

Letztendlich müssen die Seitenwände in der Horizontalebene steif ausgeführt sein, damit sich das Rad, relativ zum Reifen gesehen, nicht verdreht oder zur Seite neigt.

Die Reifen müssen bei Auf- und Abbewegungen nachgeben können. Sie tun das auch bei starker Einfederung. Im Betrieb arbeiten sie mit der Radaufhängung zusam-

men. Da der Reifen wie eine Feder wirkt und die Kräfte auf die Radaufhängung überträgt, müssen beide aufeinander abgestimmt sein. Ein Wechsel auf einen anderen Reifen erfordert in der Regel auch eine andere Fahrwerksabstimmung (falls die Radaufhängungen für den Reifentyp nicht optimiert sind, sind die Fahr- und Handlingeigenschaften nicht optimal, was das Testen verschiedener Reifen nicht gerade erleichtert). Die Seitenwand und Schulter haben bereits ohne Luft im Reifen verschiedene Steifigkeiten. Ist der Reifen mit einem bestimmten Druck  $p$  gefüllt, ergibt sich seine Kontaktfläche aus:

$$pA + s = W$$

oder :

$$A = (W - s)/p$$

wobei  $A$  die Kontaktfläche,  $s$  die Steifigkeit der Seitenwand und  $W$  die Radlast ist.

Durch Verringerung des Drucks vergrößert sich die Kontaktfläche  $A$ . Die Steifigkeit des Reifens hängt von seinem Druck ab. Eine zu starke Verringerung des Luftdrucks ergibt eine Deformation in der Reifenaufstandsfläche und in den Seitenwänden. Es existiert ein optimaler Druck, bei dem die Bodenaufstandsfläche und Haftung ein Maximum erreichen. Bei höheren Drücken wird die Kontaktfläche kleiner, bei niederen Drücken gibt der Reifen zu stark nach. Der optimale Druck hängt von der Radlast  $W$  ab. Montiert man einen größeren Reifen, der die Fläche vergrößert, benötigt er einen geringeren Druck. Physikalisch gesehen ist der größtmögliche Reifen der, dessen Kontaktfläche so groß ist, daß der notwendige Druck möglichst nieder gewählt werden kann bevor der Reifen zu stark nachgibt.

Eine Erhöhung des Drucks verringert die Reifenaufstandsfläche und reduziert dadurch die Verformung bei jeder Radumdrehung. Höhere Drücke bewirken deshalb geringere Reifentemperaturen und umgekehrt.

Geringer Druck in Off-Road-Reifen gibt dem Reifen die Möglichkeit, sich zu deformieren, so daß er sich den Konturen der Fahrbahn besser anpassen kann.

Die Größe und die Form der Reifenaufstandsfläche hängt von der Steifigkeit des Reifens ( also von der bauartbedingten Steifigkeit und der Wirkung des Luftdrucks) und seinem Profil ab. Das Profil bestimmt hauptsächlich, wie sich die Reifenaufstandsfläche verformt, wenn sich das Motorrad in Schräglage befindet. Sie verändert sich mit verschiedenen Drücken und Felgenbreiten und, wenn der Reifen abgefahren ist. Für optimale Haftung und Fahreigenschaften muß der Reifen also sowohl auf der richtigen Felge montiert sein als auch mit dem richtigen Luftdruck betrieben werden (und nicht zu stark abgefahren sein).

Diagonalreifen in 90er oder 100er Querschnitt können bis zu einer Breite von 140 Millimeter normalerweise auf drei oder vier verschiedene Felgengrößen montiert werden. Je breiter der Querschnitt und je geringer das Querschnittsverhältnis ist, um so weniger Möglichkeiten gibt es. Niederquerschnitts- Radialreifen mit einer niederen Seitenwand (zum Beispiel 170/60 VR 17) sollten nur noch auf einer einzigen Felgengröße montiert werden.

---

#### Erklärung für Reifengröße 130/80 VB 18

---

130 ist die nominelle Querschnittsbreite in Millimetern.

80 ist das Querschnittsverhältnis (Querschnittshöhe in Prozent), in diesem Falle eine Höhe von 104 Millimetern. Keine Zahlangabe bedeutet hundert Prozent.

V – der erste Buchstabe – ist der Geschwindigkeitsindex. V bedeutet über 210 km/h.

B – der zweite Buchstabe – bezieht sich auf die Konstruktion. B bedeutet Bias belted, also Gürtelreifen mit Diagonalkarkasse. R bedeutet Radialgürtelreifen mit Radialkarkasse. Keine Kennzeichnung bedeutet Reifen mit Diagonalkarkasse.

18 gibt den Felgendurchmesser in Zoll an.

Rennreifen haben, abhängig vom Reifenhersteller, unterschiedliche Größenbezeichnungen. Dunlop zum Beispiel, zeichnet den Querschnitt mit 325/425 aus, was der nominalen Höhe/Breite in Zoll entspricht. Michelin benützt einen Code, zum Beispiel 15/61, der die Breite und den Durchmesser des Reifens, in Zentimetern, beides als Nennmaße, angibt.

---

Die Form der Reifenaufstandsfläche und die Art, wie sich der Reifen verformt, bestimmen seine Leistungsfähigkeit. Er erhält seine Festigkeit von sogenannten plies, gewebten Lagen aus Nylon, Rayon, Kevlar (oder sogar Stahl in einigen Autoreifen). Die gewebten Fäden sind in der Regel mit einem Fadenwinkel von annähernd neunzig Grad miteinander verkettet, wobei sie jeweils über- und untereinander liegen. Als diese Webfäden das erste Mal in Reifen benutzt wurden, ergab sich zwar die, in mehreren Richtungen notwendige Flexibilität, aber auch die doppelte Stärke an der Stelle, wo sich die Fäden kreuzten. Das verursachte beim Gewebe Scheuern, Ausreißen und unvorhergesehen Ausfall. Daraufhin wurde ein Cordmaterial entwickelt, bei dem parallel verlaufende Fäden, ungefähr alle zehn Zentimeter, durch dünne Fäden zusammengehalten wurden, die es ermöglichten, die Lagen aufzulegen bevor sie in der Reifenform gebacken wurden. Die Lagen sind um Stahlseile verankert, die um die beiden Enden des Reifens laufen. Der Werkstoff, die Anzahl der Lagen und der Winkel, unter dem die Gewebe verlaufen, tragen zur Festigkeit der Karkasse bei. Diese Lagen werden Karkasslagen genannt. Wenn das Gewebe so zusammengesetzt wird, daß sich die Fäden in einem engen Winkel kreuzen, wird die Konstruktion als Diagonalkarkasse bezeichnet.

Der Werkstoff und die Winkel und Anzahl der Lagen können verändert werden, um die Festigkeit und die Verformung unter Last zu beeinflussen. Oft werden vier Lagen, manchmal mit einem Kernfüller, verwendet, um die Seitenwand zu verstärken. Das ergibt einen steifen und billigen, aber auch ziemlich schweren Reifen. Die Verformung des notwendigerweise dicken Aufbaus heizt ihn im Betrieb auf. Die Verformung des Gewebes in der Reifenaufstandsfläche verursacht Krümmungen vor und hinter der Reifenaufstandsfläche. Durch diese örtliche Verformung läßt sich die Form der Reifenaufstandsfläche schwer voraussagen. Außerdem läuft dadurch der Reifen wärmer. Ein

Nebeneffekt dieser Konstruktion ist der, daß der Reifen im Durchmesser unter Einwirkung der Zentrifugalkraft bei hoher Geschwindigkeit wächst. Ebenso zieht er sich in seiner Breite zusammen. Dieser Effekt verlängert die Übersetzung, verändert den Querschnitt und schleift oft Teile vom Kotflügel ab.

Die ersten Versuche, die Festigkeit des Reifens zu verbessern, begannen mit der Verwendung von Kevlarlagen, die als starker Gürtel unter der Lauffläche, um den gesamten Reifen gelegt wurden. Er hatte entweder null Grad oder einen sehr spitzen Winkel zum Radumfang (die Bias-Belted-Konstruktion). Dieser Gürtel sollte Verformungen verhindern, unter denen der Diagonalreifen gewöhnlich leidet. Dadurch hat man den Reifen besser im Griff und kann ihn mit geringeren Temperaturen betreiben. Er kann dann auch mit einer weicheren Mischung hergestellt werden, die mehr Haftung bietet.

Als diese Entwicklung fortschritt, wurde es möglich, Reifen mit weniger Lagen herzustellen. Die leichtere Konstruktion ergab geringere Betriebstemperaturen und erlaubte noch weichere Mischungen. In diesem Entwicklungsstadium wurden Diagonal-konstruktionen mit sehr großen Fadenwinkeln verwendet. Der nächste Schritt bestand aus Lagen, die sich überhaupt nicht mehr schnitten, sondern parallel zueinander neunzig Grad zum Unterbau der Radialkonstruktion verliefen.

Das hatte verschiedene Vorteile. Jede Lage nahm den kürzesten Weg von einer Verankerung zur anderen. Dadurch ist jede einzelne Lage steifer als ein gleichartiges Gewebe bei der Diagonalkonstruktion. Bei demselben Gewicht ergibt sich daraus weniger Verformung. Ein in Umfangsrichtung verlegter Null-Grad-Gürtel bringt Festigkeit unter der Lauffläche und reduziert das Wachsen bei hohen Geschwindigkeiten. Diese Konstruktion trägt, im Gegensatz zu örtlichen Verformungen nahe der Reifenaufstandsfläche, die für einen Diagonalreifen charakteristisch sind, zu einer gleichmäßigen Verformung über den gesamten Reifenumfang bei. Dadurch läßt sich die Reifenkontur besser beherrschen und erlaubt somit eine geringere Betriebstemperatur.

Die Kontur des Reifens, die in zwei Ebenen gewölbt ist, verformt sich bei jeder Umdrehung beträchtlich. Es ist sehr kompliziert, sich das im Modell vorzustellen, ganz abgesehen von der Durchführung, von Berechnungen des belasteten Reifens. Die frühe Reifenentwicklung war weitgehend empirisch und versuchsmäßig. Es war einfacher, den Reifen herzustellen und dann zu testen, als seine Leistungsfähigkeit vorauszusagen. Die computerunterstützte Konstruktion hat beträchtlich weitergeholfen. Der Konstrukteur kann nun die Auswirkungen sehen, die eine Änderung des Lagenwerkstoffs oder Winkels ergibt. Er kann mit der Form auf dem Bildschirm experimentieren bis der Reifen sich, wie gewünscht, verhält. Anschließend kann er den Reifen bauen lassen. Das ist ein Vorgang, der genauere Ergebnisse bringt, da die Resultate echter Tests benützt werden, um die Voraussagen auf dem Computer zu korrigieren.

Avon benützte diese Technik, um seine Diagonalreifen zu verbessern. Wenn zum Beispiel ein Träger gebogen wird, ist die konvexe Seite auf Zug, die konkave Seite auf Druck belastet. Irgendwo in der Mitte gibt es eine neutrale Faser, die spannungsfrei ist. Dasselbe läßt sich bei der Struktur eines Reifens anwenden. Falls die verstärkten Lagen auf der neutralen Faser untergebracht werden können, erfahren sie geringere Lastschwankungen und laufen deshalb kühler.

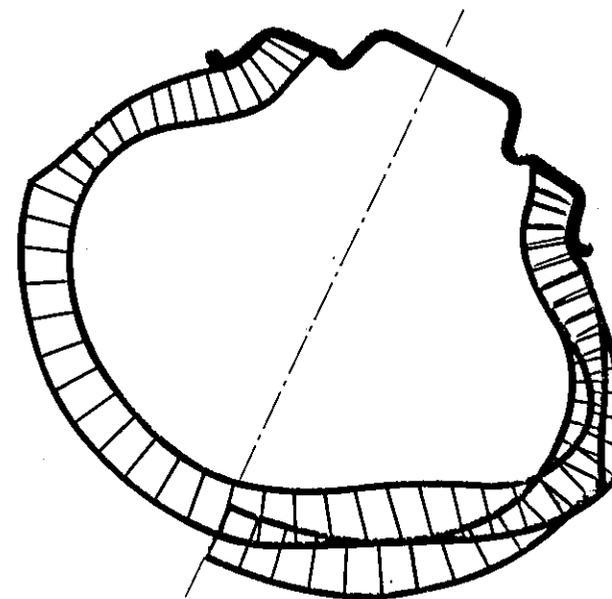
Aber erst der Radialreifen war es, der das meiste Entwicklungspotential bot. Nicht nur aus diesem offensichtlichen Grund hat diese Konstruktion Autoreifen verändert,

sondern weil er gegenüber dem Diagonalreifen eine bessere Haftung und eine weit höhere Laufleistung aufwies.

Die Entwicklung für Autoreifen basierte auf einer vollkommen anderen Notwendigkeit. Hier war der Radialreifen erfolgreich, weil er die Reifenaufstandsfläche durch die Verwendung eines Gürtels abstützen konnte und flexible Seitenwände erlaubte, so daß die Seitenführungskraft nicht durch hohe Schräglaufwinkel erzeugt werden mußte. Beim Motorradreifen darf die Seitenwand nicht flexibel sein. Um Francois Decimas, Leiter des Forschungs- und Entwicklungszentrum von Michelin in Ladoux anzuführen, haben die Seitenwände keine andere Funktion als die Lauffläche mit der Felge zu verbinden und den Namen Michelin zu tragen.

Den einfachsten Weg, die Seitenwand steif zu gestalten, ist, sie so nieder wie möglich auszuführen. Das verringert auch den Abstand von Wulst zu Wulst und verbessert die gesamte Struktur des Radialreifens.

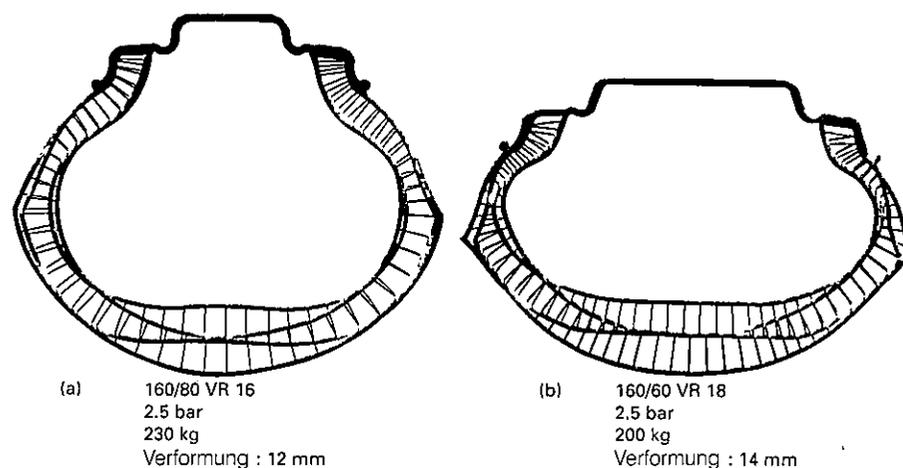
Es war nur logisch, daß die Firma Michelin, die den Stahlgürtelreifen für Autos entwickelte, auch Pionier bei der Entwicklung für Radialreifen auf dem Motorradsektor war. Anfängliche Versuche bereiteten viele Probleme, da die vorhandenen Motorräder für Reifen mit einem großen Höhe/Breite-Verhältnis konstruiert waren. Die Montage von Niederquerschnittsreifen, von denen Radialreifen die besten Eigenschaften aufwiesen, verringerte die Bodenfreiheit, veränderte die Lenkgeometrie und reduzierte die Übersetzung. Augenscheinlich mußte die Entwicklung der Motorräder und Reifen zusammen verlaufen.



**Abbildung 3.1** Die Verformung eines 160/80 VR 16 Radialreifens unter Last und Seitenführungskräften bei einem Sturz von dreißig Grad. Beachten Sie, die größte Deformation geschieht in der Reifenaufstandsfläche und nicht in der Seitenwand. Noch niedrigere Querschnitte (/60) Reifen haben eine noch geringere Seitenwandverformung (Michelin).

Michelin konzentrierte sich auf Rennreifen und riskierte ein oder zwei Abstecher auf dem Gebiet neuer Straßenmotorräder. Andere Hersteller (Bridgestone, Dunlop, Pirelli und Metzeler) entwickelten Radialreifen oder Diagonalreifen mit sehr spitzen Winkeln in den oberen Lagen, mit denen zur Verfügung stehende Straßenmotorräder ausgerüstet wurden. Diese Reifen gingen zu viele Kompromisse ein. Um die Seitenwände zu verstärken, mußten sie schwer ausgeführt werden. Dunlop benützte zum Beispiel einen dicken Kernfüller zwischen dem Wulst und der Reifenschulter. Pirelli hatte Reifen mit zwei Karkasslagen, einem Verstärkungstreifen an der Reifenschulter, Umschlägen um den Wulst, zwei Diagonalgürteln und einem Null-Grad-Gürtel in ihren frühen MP 7. Das Resultat waren Reifen, die nahezu genausoviel Konstruktionselemente wie ein Diagonalreifen hatten. Trotz leichter Verbesserungen konnten sie nicht das volle Potential der Radialkonstruktion ausschöpfen. Ein Vergleich zwischen Michelin's M 48 mit Diagonallagen und ihrem 160/60 VR M 59 X Radial zeigt, daß der M 48 drei Karkasslagen und zwei Gürtellagen, der M 59 X aber nur eine Karkasslage und einen Null-Grad-Gürtel hat.

Das Potential konnte ausgeschöpft werden, als, in Anlehnung an die Praxis im Rennbetrieb, Straßenmotorräder für Niederquerschnittsreifen konstruiert und mit breiten Felgen ausgerüstet wurden. Abbildung 3.1 und 3.2 zeigen den Unterschied. Die Verformung unter Last ist bei einem 160/60 VR 18 größer als bei dem höheren 160/80 VR 16. Obwohl beinahe die ganze Verformung in der Schulter und Laufflächenmitte auftritt, ist sie in der Seitenwand sehr gering.



**Abbildung 3.2 (a) und (b)** Vergleich der Verformung eines 160/80 VR 16 »Kompromiß« Radialreifens (a) und einem vollentwickelten 160/60 VR 18 Radialreifen (b) unter Last. Bei demselben Luftdruck verformt sich der Niederquerschnittsreifen trotz geringfügig weniger Last mehr. Die größte Verformung tritt in der Lauffläche des Reifens auf. Der Niederquerschnittsreifen hat eine beträchtlich breitere Reifenaufstandsfläche (Michelin).

Die Verformung des Reifens unter Zentrifugalkräften bei höheren Geschwindigkeiten wird ebenfalls dargestellt. Bei 240 km/h wächst der Diagonalreifen nicht nur in seinem Durchmesser, er schrumpft auch an den Schultern. Diese Veränderung erhöht

den Verschleiß in der Mitte. Es flacht ihn ab, was in Kurven ungleiche Sturzseitenkräfte hervorrufen und somit zu Hochgeschwindigkeitspendeln führen kann.

Der 160/80 »Kompromiß« Radial zeigt einen ähnlichen Betrag an Reifenwachstum, aber eine wesentlich geringere Einziehung in der Breite, während der vollentwickelte 160/60 Radialreifen kaum eine Formänderung aufweist. Neben der Möglichkeit, weichere Mischungen zu verwenden, ohne den Reifen zu überhitzen, resultiert daraus auch weniger Gewicht ( die Einsparung an Massenträgheitsmoment ist beträchtlich, da sich außen die, mit der höchsten Umfangsgeschwindigkeit umlaufende Masse konzentriert.). Der Verschleiß ist sehr gleichmäßig, so daß sich die Handlingeigenschaften des Reifens in abgefahrenem Zustand nicht übermäßig ändern.

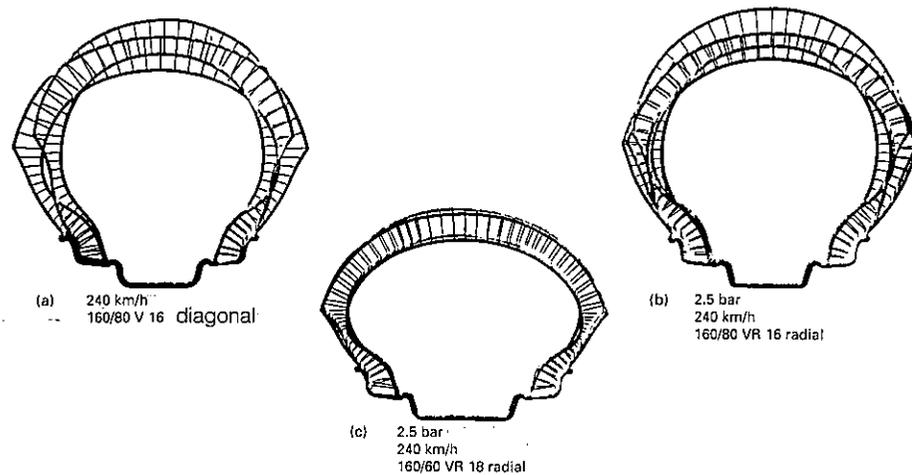
## Reifenaufstandsfläche

Die Reifenaufstandsfläche hängt von der Kontur des Reifens und seiner Flexibilität in Lauffläche und Schulter ab. Allgemein gilt, je größer die Fläche ist umso besser. Eine progressive Änderung ist notwendig, wenn das Motorrad in Schräglage übergeht. Die Aufstandsfläche verändert ihre Form, ihr Schwerpunkt bewegt sich. Da Zentrifugalkräfte das Motorrad stärker belasten, tritt mehr Verformung am Reifen auf. Falls also bei Schräglage die Fläche geringer wird und gleichzeitig die Radlasten zunehmen, muß sich der Reifen verformen, indem er seine Einfederungsenergie benützt, um das Motorrad auf Kurs zu halten. Plötzliche Änderungen würden Abweichungen der Sturzseitenkraft und damit der Lenkkräfte verursachen, was der Fahrer als Eigenlenkverhalten oder Ausbrechen bemerken würde.

Die Verwendung breiter Reifen verursacht eine andere Schwierigkeit, wenn das Motorrad in Schräglage fährt, da die Reifenaufstandsfläche sich immer weiter von der Mittelebene des Motorrads und von seiner Lenkachse bewegt. Je breiter der Reifenquerschnitt ist, um so stärker treten diese Effekte auf. Kleinere Querschnitte reduzieren sie bei vorgegebener Reifenbreite. Es gibt verschiedene Auswirkungen. Sie reduzieren die Sturzseitenkraft bei einem vorgegebenen Rollwinkel. Ironischerweise benötigt ein Motorrad mit einem höheren Schwerpunkt oder mit einer Verlagerung des Schwerpunkts zur Kurveninnenseite einen geringeren Rollwinkel, um die Zentrifugalkraft auszugleichen. Am Vorderrad bauen sich größere Rückstellmomente auf, falls sich die Reifenaufstandsfläche nach einer Seite verschiebt. Der Fahrer fühlt das als ständigen Zug am Lenker, der die Lenkung zur Kurveninnenseite einschlagen möchte. Ein Bremsmoment verstärkt diesen Effekt, indem es ein weiteres Lenkmoment aufbaut. Da die Massenträgheitskraft des Motorrads in der Lenkachse angreift, kann sie ebenso ein Rollmoment erzeugen. Die beiden können in entgegengesetzter Richtung wirken, und versuchen sich aufzuheben, oder aber sich zu addieren. In diesem Fall bei Benützung der Vorderradbremse in Schräglage will das Motorrad mit aller Macht geradeaus fahren. Dieser Effekt hängt vom Nachlauf und der Kontur des Vorderreifens ab. Er kann durch einen kleineren Nachlauf, einen geringeren Lenkkopfwinkel, einen Vorderreifen mit einer geringeren Breite (oder einer schmäleren Reifenaufstandsfläche) und einer geringeren Querschnittshöhe verringert werden.

Die Verteilung des Bremsmoments über der Breite der Reifenaufstandsfläche ist nicht symmetrisch, wenn sich das Motorrad in Schräglage befindet. Der Radius des

Reifens verringert sich in Richtung der inneren Seite der Reifenaufstandsfläche, so daß hier größere Kräfte entstehen. Bremskräfte neigen deshalb dazu, das Druckzentrum weiter von der Mittelebene des Reifens zu verschieben. Sie neigen auch dazu, das Rad in Richtung der Kurve einzudrehen.



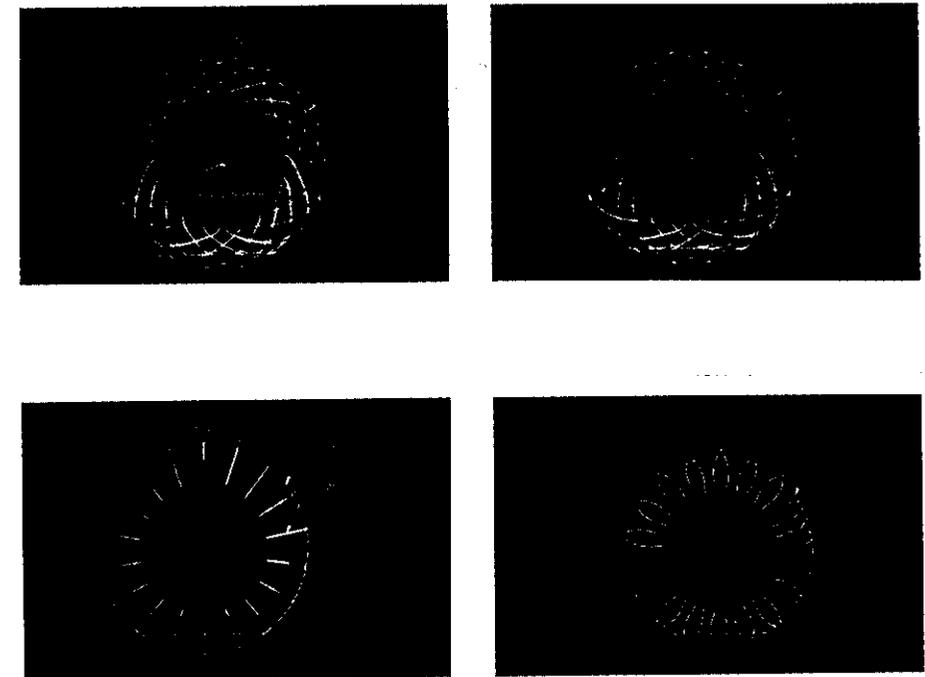
**Abbildung 3.3 (a), (b) und (c)** Der Diagonalreifen (a) wächst in der Laufflächenmitte und zieht sich an den Schultern ein. Der »Kompromiß«-Radialreifen gleicher Größe (b) hat ein ähnliches Wachstum in der Mitte, aber weniger Einzug. Der vollentwickelte Radialreifen (c) hat deutlich weniger Verformung in allen Richtungen (Michelin).

Ähnliche Erscheinungen wirken sich auf den Hinterreifen bei Einsatz voller Leistung aus. Größere Kräfte werden am Rand der Reifenaufstandsfläche nahe der Reifenschulter erzeugt. Das Druckzentrum wandert nach außen. Das Moment an der Aufstandsfläche will das Rad von der Schulter wegbewegen. Der Nachlauf und der Lenkkopfwinkel bestimmen die Lenkkräfte und die Form der Kontaktfläche, da sie für das Druckzentrum verantwortlich sind. Ein größerer Nachlauf bewegt das Druckzentrum weiter von der Lenkachse weg. Daher wandert es bei eingeschlagener Lenkung weiter aus der Mittelebene des Motorrads. Ein steilstehender Lenkkopf vergrößert ebenfalls diesen Versatz. Die Reifenaufstandsfläche ist elliptisch. Eine lange, dünne Ellipse gibt dem Druckzentrum weniger Möglichkeiten zum Auswandern nach einer Seite. Eine breite Ellipse reagiert empfindlicher auf eine unausgeglichene Momentenverteilung während dem Bremsen.

Der Einschlag am Lenker hängt aber auch vom Lenkkopfwinkel und Sturz des Rads ab:

$$\alpha = \beta \cos \gamma / \cos \varphi$$

wobei  $\alpha$  der Lenkeinschlag am Lenker,  $\beta$  der Lenkeinschlag am Rad,  $\gamma$  der Radsturz gegenüber der Vertikalen und  $\varphi$  der Lenkkopfwinkel zur Vertikalen ist.

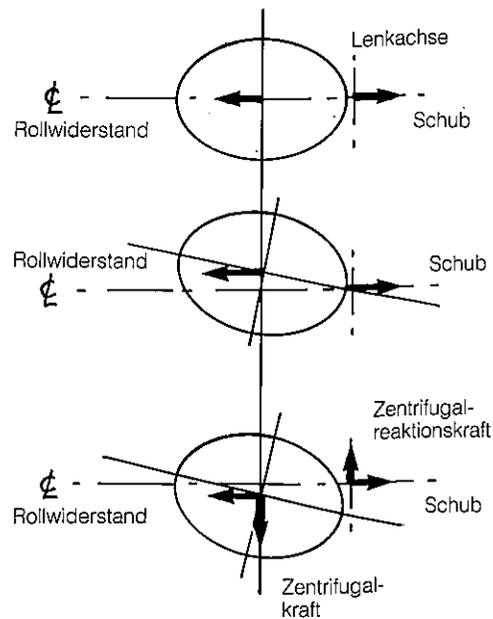


**Abbildung 3.4** Rechner-Simulationen zeigen, wie Diagonalreifen (oben) dazu neigen, sich in der Nähe der Aufstandsfläche zu verformen, während Diagonalreifen mit spitzen Fadenwinkeln und Radialreifen (unten) die Verformung über den ganzen Reifen verteilen (Pirelli).

Ein Beispiel, das gängige Werte für 26 Grad für den Lenkkopfwinkel und 45 Grad für die Schräglage annimmt, zeigt, daß ein Radeinschlag von einem Grad bei senkrechtem Motorrad einen Einschlag von 1,11 Grad am Lenker erfordert. Wenn das Motorrad um 45 Grad geneigt ist, bedeutet der gleiche Einschlag von einem Grad am Rad 0,79 Grad Lenkeinschlag. Das heißt, wenn das Motorrad in Schräglage, wird die Lenkung schwergängiger, aber auch direkter.

Wenn das Motorrad in Schräglage gebracht wird, um einer Kurve mit einem bestimmten Radius zu folgen, wird die Lenkung, abhängig von der Geschwindigkeit des Motorrads, um einen bestimmten Betrag eingeschlagen. In Abhängigkeit des Lenkkopfwinkels und Nachlaufs, der Reifengröße und der Schräglage kann sich das Zentrum der Reifenaufstandsfläche zur linken oder rechten Seite der Lenkung verschieben oder sich in direkter Linie mit ihm befinden. Falls es sich in einer Rechtskurve, links von der Lenkachse, befindet, erfordert dies einen ständigen Zug am rechten Lenkerende, um den Kurvenradius beizubehalten. Befindet es sich rechts davon, erfordert es einen ständigen Zug am linken Lenkerende. Liegt es auf der Lenkachse, ist die Lenkung neutral.

Durch Änderung des Lenkkopfwinkels, des Nachlaufs und des Reifenquerschnitts können diese Lenkungscharakteristika verändert und an den Fahrer und die Bedingungen angepaßt werden.

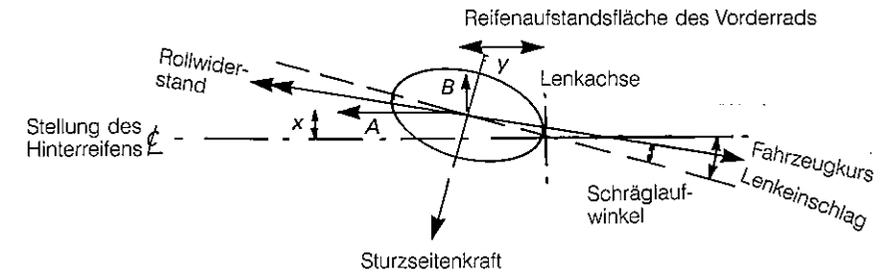


**Abbildung 3.5** Das Vorderrad läuft der Lenkachse nach. Eine Kraft wird dadurch ausgeübt, daß der Reifen im Zentrum des Reifenaufstandspunkts hinter der Lenkachse gezogen wird. Die beiden Kräfte sind in einer Linie, wenn das Rad geradeaus und senkrecht steht (oben). Wenn es nach rechts eingeschlagen wird, wird die Reifenaufstandsfläche zur rechten Seite verschoben. Die Rollwiderstands- und Nachlaufkräfte bilden ein rückstellendes Moment, das die Lenkung gerade stellen will (Mitte). Wenn das Rad nach rechts eingeschlagen, und das Motorrad nach rechts geneigt ist, bewegt sich die Reifenaufstandsfläche ebenfalls nach rechts (unten). Abhängig von der Größe der Schräglage und dem Betrag des Einschlags kann das Zentrum der Reifenaufstandsfläche sich links von der Mittellinie befinden, auf der Mittellinie liegen oder sich zur Rechten der Mittellinie bewegen. Das kann ein Lenkmoment erzeugen, das die Lenkung geradeaus stellt, neutral ist (kein Moment) oder versucht, in die Kurve einzulenken.

Der Reifen hat nicht immer einen klar definierten Angriffspunkt auf der Fahrbahn. Wenn er rollt, kann er im Schlupf laufen, das heißt, er hat gegenüber dem Motorrad eine geringfügig andere Geschwindigkeit. Weiterhin kann er in einem spitzen Winkel zu der Richtung laufen, in der das Rad zeigt (Schräglaufwinkel). Das hat Auswirkungen auf die Lenkung, da sich ständig das Zentrum ändert, um das sich das Motorrad, wie in Abbildung 3.6 gezeigt, bewegt. Ein schmaler Reifen mit harter Mischung hat weniger Möglichkeiten, Schräglaufwinkel aufzubauen als einer mit großer Aufstandsfläche, der sowohl in der Lauffläche als auch in der Seitenwand flexibler ist. Die meisten Seitenführungskräfte eines Motorrads resultieren aus der Sturzseitenkraft, einige aus der elastischen Deformation im Reifenaufstandspunkt und einige aus den Schräglaufwinkeln, die im Reifen erzeugt werden. Die Kombination aus Nachlauf, Lenkkopfwinkel und Reifenkontur bestimmt beim Übergang zur Schräglage die Lenkkräfte. Der Sturzwinkel, der erforderlich ist, um die Seitenführungskräfte auszugleichen, hängt dagegen von der Reifenkontur und Lage des Schwerpunkts ab

(welche der Fahrer leicht dadurch verändert kann, daß er seine Position verlagert). Das Motorrad übersteuert dann, wenn: steigende Seitenführungskräfte bei konstantem oder zurückgenommenen Lenkeinschlag hergestellt werden oder der Schräglaufwinkel am Hinterrad größer als am Vorderrad ist.

- konstante oder sinkende Lenkkräfte erzeugen eine ansteigende Seitenführungskraft
- der Schräglaufwinkel am Hinterrad ist größer als am Vorderrad



**Abbildung 3.6** Jede Kraft, die auf den Reifen wirkt, hat eine Komponente, die parallel zur Mittelebene des Motorrads (A) verläuft und eine weitere im rechten Winkel dazu (B). Falls die Reifenaufstandsfläche, wie gezeigt, aus der Mitte verlagert ist (was von der Reifenkontur, der Lenkgeometrie und dem Sturz und Lenkwinkel abhängt), gibt es ein rückstellendes Moment  $A_x$ , das entgegengesetzt zu einem Moment  $B_y$  wirkt, welches versucht, die Lenkung in die Kurve einzuschlagen. Wenn die Resultierende ( $A_x - B_y$ ) positiv ist, muß der Fahrer am rechten Lenkerende ziehen, um die Rechtskurve aufrechtzuerhalten. Falls die Resultierende null ist, erfordert die Lenkung keine Kraft, falls sie negativ ist, muß der Fahrer am linken Lenkerende ziehen, um einen konstanten Kurvenradius einzuhalten. Bremskräfte vergrößern den Wert von A.

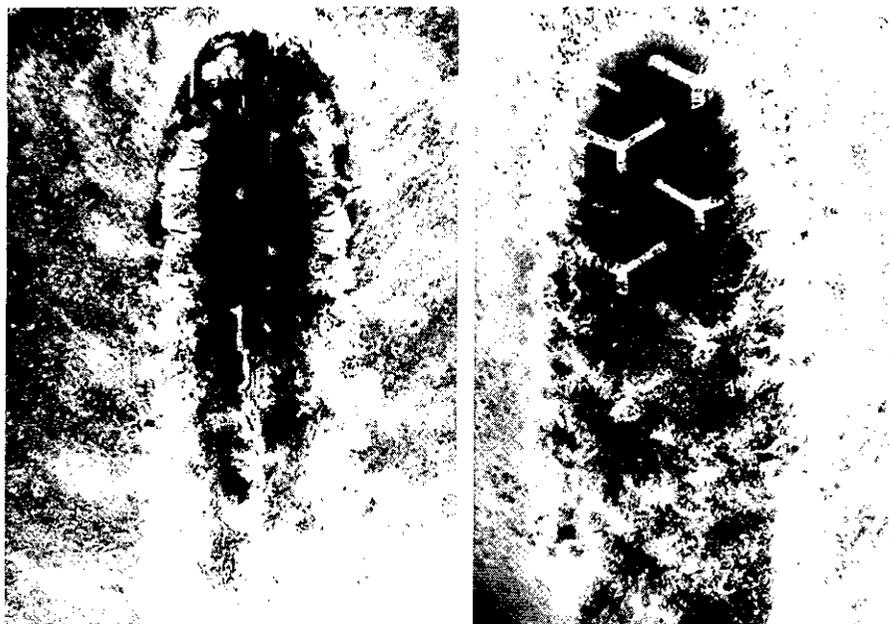
Aufgrund dessen ist es notwendig, den Lenkkopfwinkel, den Nachlauf und die Schwerpunkthöhe für ein vorgegebenes Reifenprofil zu optimieren und die Radaufhängung an die Charakteristik der Reifenfederung anzupassen.

Stellen Sie sich zum Beispiel ein Motorrad vor, das bei einer konstanten Geschwindigkeit und einem konstanten Radius in einer Rechtskurve in Schräglage gebracht wird. Falls die Lenkung nun leicht zur rechten Seite gedreht wird, kann das Motorrad den Einschlag verstärken und den Bahnradius verringern. Oder es kann stärker aufgerichtet werden, wodurch die Seitenführungskraft reduziert und der Bahnradius verstärkt wird. Das Ergebnis hängt von der Abstimmung des Motorrads und seiner Geschwindigkeit ab. Im ersten Fall sagt man, das Motorrad wird gedrückt. Das passiert am ehesten, wenn das Motorrad ohne Zugkraft durch die Kurve rollt oder abgebremst wird.

## Profilgestaltung

In der Regel ist gewährleistet, daß die weichste Mischung am meisten Haftung aufbaut, aber auch leichter überhitzt und schneller verschleißt. Deshalb bietet eine leichtere, steifere Konstruktion mit geringeren Betriebstemperaturen günstige Voraus-

setzungen für weiche Mischungen. Regenrennreifen haben sehr weiche Mischungen, da sie vom Wasser gekühlt werden und nicht so stark beansprucht werden wie Trockenreifen. Im Trockenen benützt, würden sie schnell überhitzen und abbauen. Sie müssen das Wasser zwischen Straße und Reifen verdrängen, weswegen das Profil darauf abgestimmt ist. Einige Hersteller verweisen ohne genaue Erklärung darauf, daß die Profilgestaltung nur von untergeordneter Bedeutung ist. Andere messen ihr eine wichtige Rolle bei. Sicherlich ist die Mischung unter einigen Bedingungen wichtiger für die Haftung bei Nässe. Bei Bremstests auf nasser Fahrbahn, die von Performance-Bikes in Mira durchgeführt wurden, schnitt ein Slick mit sehr weicher Mischung besser ab als alle Straßenreifen mit Sportmischungen. Die Firma Metzeler weist jedoch daraufhin, daß die Profilgestaltung wichtig ist. Sie führte eine Reihe von Tests durch, bevor sie den ME 33 in der jetzigen Form festlegte. Dieser Reifen in Komp K-Mischung schlug alle anderen Sportreifen in diesem Test.



**Abbildung 3.7** Michelin's A 59 X (links) und M 59 X (rechts) Radialreifen bei Geschwindigkeiten von 130 km/h bei Nässe, durch eine Glasplatte fotografiert. Die Form der Reifenaufstandsfläche wird deutlich als die Fläche abgebildet, bei der der Gummi mit dem Glas in Kontakt kommt (Michelin).

Der Vorderreifen muß eine bessere Drainage zur Wasserabfuhr haben als der Hinterreifen, da er Wasser auf der Fahrbahn für den Hinterreifen verdrängt. Die Profilgestaltung beider Reifen muß am wirksamsten sein, wenn das Motorrad eine Schräglage von zwanzig bis dreißig Grad zur Vertikalen hat, was normalerweise die Grenzbedingungen bei Nässe darstellt.

Die Profilgestaltung hat eine weitere Funktion: Da sich die Profilblöcke im Reifenaufstandspunkt bewegen, müssen die verschiedenen Profilrillen oder Gummiblöcke zuerst verformt und dann mit der Gewicht-, der Seitenführungs- oder der Antriebs- oder Bremskraft beaufschlagt werden, die der Reifen überträgt. Neben der gesamten Verformung des Reifens gibt es die Möglichkeit der individuellen, teilweisen Verformung oder Verschiebung des Profils. Das Ergebnis – oft beschrieben als Profilverschiebung – ist eine stark variierende Haftung. Wahrscheinlich bewegt sich das Druckzentrum oder die ganze Reifenaufstandsfläche verschiebt sich. Das ist besonders bei Straßen- oder Rennreifen höchst unerwünscht. Bei Off-Road-Reifen kann es nützlich sein, weil die Profilbewegung ein Zuschmieren des Profils mit Schlamm verhindert.

Die meisten Sportreifen haben heutzutage eine Profilgestaltung, die hauptsächlich aus diagonalen Rillen besteht, die sich mit wenigen Unterbrechungen durch die Reifenaufstandsfläche ziehen. Sie lassen große Profilblöcke stehen, die den Kontakt mit der Straßenoberfläche herstellen. Die Profilierung umfaßt meist mehr als zwanzig Grad zu beiden Seiten der Mittellinie. Der Vorderreifen hat, speziell nahe der Mittelrinne, eine stärkere Profilierung als der Hinterreifen.

## Räder und Antriebsstrang

Räder und die verschiedenen Bauteile, die damit zusammenhängen, sind für die Leistungsfähigkeit des Motorrads ausschlaggebend. Die Massen dieser Teile haben Massenträgheitsmomente, die immer dann beschleunigt oder verzögert werden müssen, wenn das Motorrad beschleunigt oder bremst. Sie gehören wie Teile der Radaufhängung zu den ungefederten Massen (siehe Kapitel 5). Die Massen am Vorderrad erzeugen beim Einschlagen Kreiselmomente und wirken sich auf die Lenkung und das Lenkverhalten aus. Jedes Kilogramm Werkstoff, das an den Rädern angebracht ist, ist gleichzusetzen mit zwei oder fünf Kilogramm, die sich irgendwo am Motorrad befinden.

Der Rahmen hat die Aufgabe, die Räder sauber zu führen und in derselben Ebene zu halten. Es muß gesichert sein, daß sie von Anfang an in derselben Ebene montiert sind. Ist dies nicht der Fall, führen Lenkkräfte oder Sturzseitenkräfte, die durch nicht hintereinander laufende Räder verursacht werden, zu einem Radieren der Reifen, was sowohl die Reifen abnützt als auch überflüssige Motorleistung kostet.

Wenn das Motorrad das erste Mal aufgebaut wird, sollten die Räder sich genau in der Mittelebene des Rahmens befinden und Ritzel und Kettenrad exakt fluchten (mit genügend Freigang zum Reifen). Am besten richtet man die Räder aus bevor die Reifen montiert sind, so daß zum Beispiel Fäden oder rechte Winkel entlang den Kanten der Felgen angelegt und Unterschiede zwischen der Breite der Vorder- und Hinterradfelge genau gemessen und berücksichtigt werden können.

Die Schwinge und oft auch das hintere Rahmenteil können asymmetrisch sein. Es ist unmöglich, verlässliche Maße von diesen Teilen abzunehmen. Montieren Sie anstatt dessen das Vorderrad mittig in der Gabel und richten das Hinterrad danach aus. Überprüfen Sie, daß die Lenkung gerade steht und Maßabweichungen im Felgenbereich auftreten können.

Wenn die hintere Felge exakt justiert ist, kann ihre Breite (in Höhe der Nabe gegenüber dem Lager, usw.) gemessen und die Mittellinie aus einigen festgelegten Bezugspunkten errechnet werden - zum Beispiel am Flansch, der das Kettenrad hält oder dem flachen, parallelen Teil der Schwinge, der die Achse aufnimmt. Führen Sie alle weiteren Messungen von diesen Bezugspunkten aus.

Die Fluchtung sollte über den gesamten Bereich des Federwegs überprüft werden (natürlich ohne Feder, woraus sich auch gleichzeitig die Möglichkeit ergibt, den Federweg am Rad gegenüber dem Weg an der Feder zu messen, falls man die Ersatzfederrate wissen möchte, die durch die Umlenkhebel erzielt wird). Der Motor muß so ausgerichtet werden, daß die Kette Freigang zum Reifen hat, was bedeutet, daß entweder der Motor oder das Kettenrad versetzt werden. Falls das Kettenrad oder die Getriebeausgangswelle mehr als einige Millimeter Versatz haben (insbesondere

bei sehr starken Dragster-Rennmaschinen mit extrem breiten Hinterreifen) muß ein außenliegendes Lager angebracht werden, um die Welle abzustützen.

Torsions- oder Biegeschäden des Rahmens können oft ausgerichtet werden. Dazu sind aber Spezialwerkzeuge nötig. Der Werkstoff, insbesondere Aluminiumlegierungen, würden eine anschließende Wärmebehandlung erfordern. Der beste Ratgeber ist in einem solchen Fall der Rahmenhersteller. Er hat zum Beispiel Rißprüfungsmöglichkeiten. Schmale Risse und Kerben in Aluminium- und Magnesiumlegierungen können WIG-geschweißt und anschließend auf das normale Maß bearbeitet werden. Dieses Verfahren ist eine wichtige Voraussetzung für eine ordnungsgemäße Reparatur, da Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche Lastspitzen verursachen, die die Teile örtlich schwächen und einen Bruch vorprogrammieren. Teile aus Magnesiumlegierung neigen dazu, stark zu korrodieren, falls der Oberflächenschutz beschädigt ist. Deshalb sollten nach der Reparatur von Rissen, usw. die Teile sofort überlackiert werden.

## Kettenantrieb

Bewegen Sie nach Überprüfung der Kettenflucht die Radaufhängung in die Position, in der die Kette am straffsten gespannt ist (das ist dann der Fall, wenn Schwingenachse, Radachse und das Ritzelzentrum eine Linie bilden). Justieren Sie das Rad, bis die Kettenspannung an diesem Punkt korrekt ist. Messen Sie dann die Kettenspannung, wenn die Radaufhängung in der normalen Ruhelage ist. Kennzeichnen Sie die alten Markierungen oder bringen Sie neue an. Das ist die Lage, in der die Kette am straffsten läuft. Falls die Kette in anderen Positionen zu locker ist, ziehen Sie einen Kettenspanner oder eine Kunststoffschiene auf der Schwinge in Betracht oder konstruieren Sie die Geometrie der Radaufhängung um.

Selbstverständlich müssen Ketten stark genug sein, um das Motordrehmoment zum Hinterrad zu übertragen. Sie haben aber auch Gewicht (das sich zum Teil dreht und meistens ungefedert ist). Verstärkte Ketten sind in der Regel größer dimensioniert, aber nicht unbedingt besser für die Kraftübertragung. Sie tragen zum Massenträgheitsmoment bei. Bei hohen Geschwindigkeiten neigen sie außerdem dazu, vom Ritzel oder Kettenrad abzuheben, was den Verschleiß verstärkt und die Spannung im Rest der Kette heraufsetzt.

Für hohe Leistungen sollten Ketten so leicht wie möglich sein (an Rennmaschinen werden in der Regel dünne Ketten und Kettenräder verwendet. Honda entwickelte Ketten mit hohlen Bolzen, Kawasaki entwarf Ketten mit gelochten Laschen). Die notwendige Festigkeit resultiert in erster Linie aus der Qualität der Kette und nicht aus ihrer physikalischen Masse. Der Unterschied zwischen einem Qualitätsprodukt und einer billigen Kette liegt im Werkstoff und der Konstruktionsmethode, hauptsächlich darin, wie die Bolzen in den Laschen gelagert sind. Eine Kette mit schlechter Qualität wird sich an den Laschen verformen, was zu steifen Gliedern und somit eventuell sogar zum Ausfall führt. Diese örtlichen Fluchtfehler können ebenso die Rollen ungleich belasten und somit zum Ausfall führen.

Die gleichen Symptome treten auf, wenn ein zu Kettenrad und Ritzel nicht passender Kettentyp verwendet wird. Die Größe der Ketten ist genormt (siehe Anmerkung),

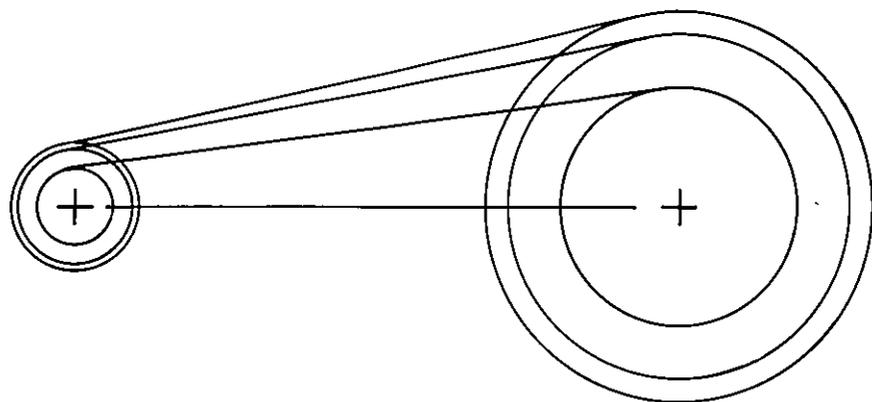
allerdings weisen die Normen nicht daraufhin, wenn sich die Dimensionen der Rollen geändert haben.

**Anmerkung:**

Die Abmessung der Kette wird durch den Abstand der Bolzen und der Breite der Rollen, das heißt, dem Abstand zwischen den Laschen, zum Beispiel  $5/8 \times 3/8$  Zoll ausgedrückt. Konventionell sind Ketten in Zollmaßen hergestellt, und zwar speziell in Einheiten von achteil Zoll. Die Normgrößen geben dies wieder, zum Beispiel 530. Die erste Zahl fünf bedeutet den Bolzenabstand in Achteln eines Zolls (hier  $5/8$ ). Die nächsten beiden Zahlen geben die Breite in achzigstel wieder (in unserem Fall  $30/80$ ). Zwanzig bedeutet  $20/80$  oder ein Viertel und fünf und zwanzig  $25/80$  oder  $5/16$  Zoll. Es gibt Hinweise, wenn der Hersteller zum Beispiel die letzte Zahl, normalerweise bei verstärkten Ketten, ändert. Eine 428 zum Beispiel würde auf demselben Kettenrad wie eine 425er laufen, hat jedoch dickere Laschen. Eine 532 und eine 632 hat dagegen stärkere Rollen und läuft nicht sauber auf einem 530er oder 630er Kettenrad. Gibt es irgendwelche Zweifel, fragen Sie den Zulieferer.

## Schmierung der Kette

Die Wahl beschränkt sich hier auf extremes Hochdrucköl, Kettenfett und Schmiermittel aus der Sprühdose. Wo O-Ring-Ketten benutzt werden, ist das Schmiermittel in der Hauptsache dazu da, Korrosion zu verhindern und einen ruhigen Lauf der Kette sicher zu stellen. Beachten Sie auch, daß jedes Schmiermittel, speziell das aus Sprühdosen, sich mit den Dichtringen verträgt.



**Abbildung 4.1** Die maßstabsgerecht gezeichneten Ritzel und Kettenräder ergeben genau dieselbe Übersetzung (27:9, 39:13, 24:15). Vergleichen Sie den Unterschied in der Kettenradgröße, im Kettenwinkel und dem Freigang. Für dasselbe Antriebsmoment am Getriebe ist die Kraft in der Kette 1,67 mal größer, falls ein Ritzel mit neun Zähnen anstatt einem mit fünfzehn benützt wird.

Idealerweise sollten Ketten (keine O-Ring-Typen) in einem Lösungsmittel entfettet, gereinigt und getrocknet werden, bevor sie neu geschmiert werden. In diesem Fall ist Kettenfett wahrscheinlich die beste Wahl. Man wärmt es in einer Pfanne, bis es in die Rollen fließt, aber auf keinen Fall kocht. Manche dieser Fette sind extrem dickflüssig. Sie sind dann nicht geeignet, wenn das Motorrad unter staubigen Bedingungen betrieben wird.

Getriebeöle (Hochdrucköle) können leicht in die Kette gebürstet werden und arbeiten dort sehr gut. Das einzige Problem ist, daß sie genauso leicht wieder abgeschleudert werden und ständige Anwendung brauchen. Sie sind gut für O-Ring-Ketten.

Schmiermittel aus der Sprühdose gibt es in großer Vielfalt. Die Dosen beinhalten ein Fett, das in einem Lösungsmittel gebunden ist. So kann es in die Bolzen innerhalb der Rollen eindringen. Ein aufschäumendes Additiv hilft ihnen dabei. Die Lösung verflüchtigt sich dann und läßt das schwerere Fett zurück. Manche bleiben an ihrem Platz, andere nicht. Jede Marke kann verwendet werden, wenn Ihnen die Verschmutzung an Ihrem Motorrad nichts ausmacht und Sie bereit sind, die Kette ständig zu schmieren. Produkte von Motul, Silkolene und Rock Oil wirken sehr gut. Einige Schmiermittel aus der Sprühdose kleben bei Berührung nicht. Das ist nützlich für Motorräder, die im Gelände oder in Sand und Staub betrieben werden, wobei sich der Schmutz sonst anlagern und den Verschleiß erhöhen würde.

## Ritzel und Kettenrad

Die relative Größe von Ritzel und Kettenrad zueinander bestimmt die Sekundärübersetzung ( $= t_w/t_g$ , wobei  $t_w, g$  die Anzahl der Zähne am Kettenrad und am Ritzel ist. Um die Übersetzung zu vergrößern, muß sich das Hinterrad bei einer gegebenen Motordrehzahl schneller drehen. Es ist notwendig  $t_w$  zu verringern oder  $t_g$  zu vergrößern). Außerdem gibt es noch andere Auswirkungen.

Größere Kettenräder sind selbstverständlich schwerer und haben ein größeres Massenträgheitsmoment. Ein bestimmter Mindestdurchmesser ist notwendig, um den Freigang der Kette gegenüber der Schwinge sicherzustellen. Ein zu großes Ritzel kann dagegen am Getriebe oder Kurbelgehäuse streifen. Sehr große Kettenräder, zum Beispiel an Trial-Motorrädern, können Freigangprobleme verursachen. Sie können mit Felsen in Kontakt kommen, Schmutz aufnehmen oder sich mit Kabeln und Zügen verfangen. Die Bemühungen, die Größe des Kettenrades unter Beibehaltung des gleichen Übersetzungsverhältnisses zu reduzieren, hat zum Einsatz von Ritzeln mit bis zu neun Zähnen geführt. Die geringste Abmessung für größere Leistungen und Raddrehzahlen ist in der Praxis dreizehn Zähne.

Die Änderung des Kettenrads, auch wenn gleichzeitig das Ritzel getauscht wurde, um die gleiche Übersetzung beizubehalten, ändert die Zugkraft in der Kette und den Winkel der Kettenlinie (siehe Anti-Squat-System, Kapitel 5). Falls das Drehmoment an der Getriebeausgangswelle  $T$  beträgt, ist die Kraft in der Kette  $T/t$ . Je größer also das Ritzel ist, umso geringer ist die Kraft an der Kette. Die Zentrifugalkraft, die die Kette vom Ritzel abheben will, wächst proportional zum Radius des Kettenrads und quadratisch zur Drehzahl.

Während Sekundärtriebe mit 39:13, 42:14 und 45:15 alle exakt das gleiche Übersetzungsverhältnis ergeben (siehe Bemerkung), gibt es, abhängig vom Einsatz der Maschinen, Unterschiede, die eine Paarung geeigneter erscheinen lassen als die andere. (wobei die wichtigsten Faktoren Freigang, Festigkeit der Kette, ungefederte Masse oder die Wirkung der Zugkraft der Kette auf die Radaufhängung sind).

**Anmerkung:**

Die Gesamtübersetzung zwischen der Kurbelwelle und dem Hinterrad beträgt  $R = pGf$ ,  $p$  ist die Primärübersetzung =  $t_{c1}/t_{c2}$  (Zähne auf dem Kupplungs- und Kurbelwellenritzel),  $G$  ist die gewählte Gangübersetzung =  $t_2/t_1$  (Zähne auf den Eingangs- und Ausgangszahnrädern). Beachten Sie, falls Vorgelege mit Zwischenrädern vorhanden sind, muß das mit  $f$  in der Rechnung berücksichtigt werden. Dasselbe ist auf  $p$  und  $G$  anzuwenden, falls ein Getriebe mit Vorgelegewelle benützt wird. Das Übersetzungsverhältnis bestimmt die Größe des angetriebenen Rades geteilt durch die des treibenden Rades. Da es sich um ein Reduktionsgetriebe handelt, ergibt sich die Drehzahl des Hinterrades aus der Motordrehzahl ( $n$ ) geteilt durch den Gang ( $n/R$ ), während das Drehmoment am Hinterrad sich aus dem Drehmoment an der Kurbelwelle multipliziert mit der Getriebeübersetzung ergibt (= Kurbelwellendrehmoment  $\times R$ , Reibungsverluste bleiben dabei unberücksichtigt).

Falls  $n$  in Umdrehungen pro Minute und der Rollradius  $r$  des Reifens in Metern ausgedrückt werden, dann beträgt die Umfangsgeschwindigkeit des Rads (Motorrads) in Kilometer pro Stunde  $0,377 nr$ .

Es gibt verschiedene Arten, das Gewicht des Kettenrads zu verringern: die Verwendung leichterer Werkstoffe (für gewöhnlich Aluminiumlegierungen, aber auch Kunststoffkettenräder tauchen immer häufiger auf), die Breite der Kettenräder zu verringern (was seinen Verschleiß heraufsetzt) oder die Kettenräder zu bohren.

## Verschraubung der Kettenräder

Hochfeste Schrauben, die angezogen und gesichert sind (man benützt dabei am besten Sicherungsscheiben oder Draht) müssen für Kettenräder verwendet werden. Der glatte Schraubenschaft muß sauber in den Bohrungen des Kettenrads sitzen. Falls irgendein Kettenschutz angebracht werden kann, sollte man ihn benützen, da er das Getriebe, die Kupplung und die Kurbelwellenabtriebe schützt.

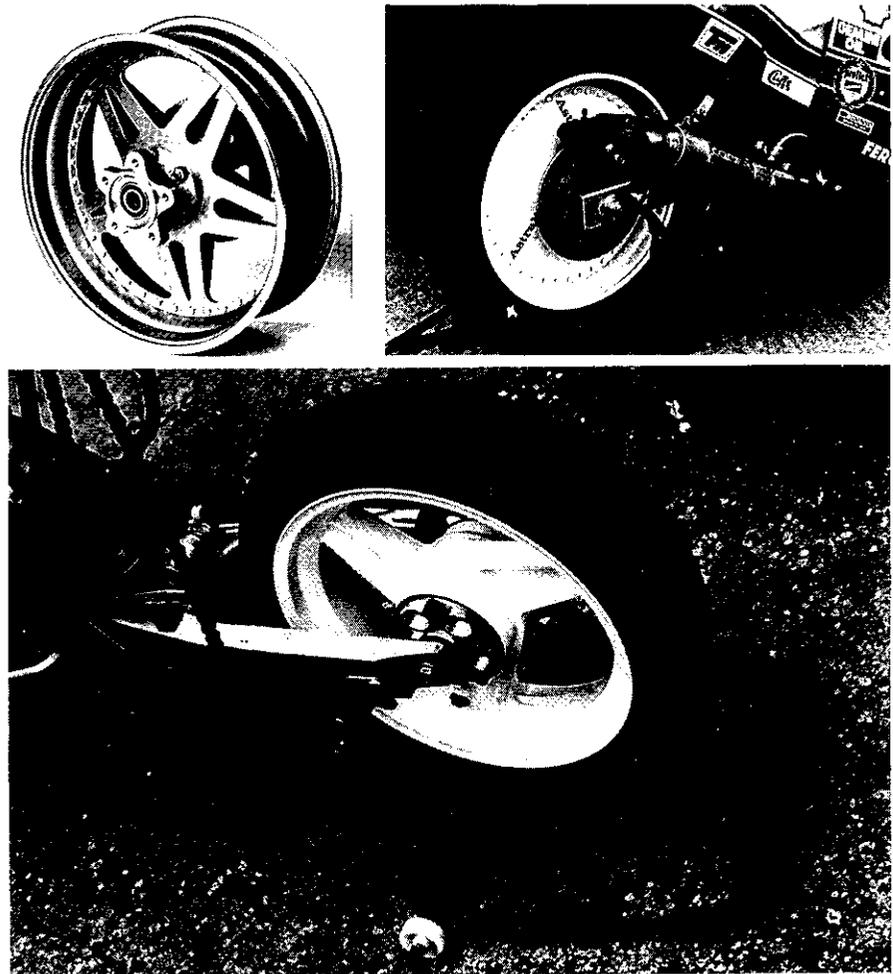
## Räder

Die Räder werden durch die Wahl der Reifen bestimmt (siehe Kapitel 3). Wenn man die Größe festgelegt hat, ist es wichtig, das Gewicht auf ein Minimum zu reduzieren. Das Massenträgheitsmoment eines rotierenden Teils ist proportional zu seiner Masse und zum Quadrat seines Radius. Die Masse eines Rads konzentriert sich auf die Felge als den größtmöglichen Radius.

Manche Leute suchen zuerst die Räder aus, ohne zu wissen, daß die gewünschten Reifen nicht erhältlich sind. Der Grund liegt darin, daß Hochleistungsreifen für eine kleine Anzahl von Motorrädern in den vergangenen Jahren sehr schnell entwickelt wurden, so daß es weder die Zeit noch die Möglichkeit gab, eine ganze Modellpalette herzustellen. Die neuesten Entwicklungen sind nur in wenigen Größen erhältlich. Die Räder müssen im Hinblick darauf ausgewählt werden.

Die Auswahl besteht zwischen Drahtspeichen- und Gußrädern in unterschiedlichen Werkstoffen. Geringe Flexibilität und schnelle Reparaturmöglichkeiten sind, zum Beispiel bei Off-Road-Motorrädern, wichtig. Die Steifigkeit gegossener Räder ergibt ein spürbar besseres Fahrverhalten.

Wenn die Abmessungen verschiedener Räder gleich sind, sollte der Werkstoff mit der geringeren Dichte den Ausschlag geben, um Gewicht zu sparen und die Steifigkeit zu erhöhen (siehe Seite 131). Versuche mit Kunststoffen (bei Fahrrädern) und Kohlefaser zeigen den richtigen Weg. Bewährte Werkstoffe sind Gußlegierungen aus Aluminium (am billigsten und schwersten) oder Magnesium, das nur zwei Drittel der Masse von Aluminium hat. Dazwischen liegen Räder aus gepreßten Stranggüßlegierungen und vernietete Strukturen, die geringes Gewicht mit geringen Kosten verbinden.



**Abbildung 4.2** Leichte steife Räder sind eine wesentliche Voraussetzung für gute Fahr- und Radaufhängungseigenschaften, insbesondere dann, wenn der gefederte Teil der Maschine extrem erleichtert wurde. Astralite's, vernietete Verbundkonstruktion ist eine Möglichkeit (a). Ihr solider Prototyp (b) bietet eine tendenziell leichtere Konstruktion bei gleicher Steifigkeit. Maximale Steifigkeit bei minimalem Gewicht bringt das teurere Gußrad aus Magnesiumlegierung, wie bei diesem 17 Zoll-Maxton-Rad (c). Der Ruckdämpfer ist von einer Honda RS 250.

Breite Felgen mit Niederquerschnittsreifen machen es zunehmend schwierig, Schläuche (und somit Speichenräder) zu verwenden. BMW (Akront) und Honda haben beide Speichenräder für Off-Road-Motorräder hergestellt, bei denen schlauchlose Reifen verwendet werden können.

Bei einem Rennmotorrad sollte das Chassis drastisch erleichtert und die ungefederten Massen so weit wie möglich reduziert werden. Ganz offensichtlich ist aber gegenüber einem Straßenmotorrad das Verhältnis von gefederter zu ungefederter Masse sehr schlecht. Das bedeutet, daß die Radaufhängungen nicht so wirkungsvoll arbeiten wie sie sollten (siehe Kapitel 5). Deshalb reagiert das Motorrad sehr viel empfindlicher auf zusätzliche Anregungen, die durch unrunde oder unwuchtige Räder entstehen. Die Rundlauf toleranzen an der Felge sollten deshalb null sein. Je langsamer und schwerer ein Motorrad ist, um so unempfindlicher reagiert es.

Eine statische Auswuchtung der Räder reicht für Motorräder normalerweise aus. Die Felgenbreite, die bei einigen Rennmaschinen, und mit Sicherheit bei Dragster-Motorrädern benutzt wird, erfordert ein dynamisches Auswuchten. Der Unterschied wird in Abbildung 4.3. dargestellt. Falls kein dynamisches Wuchten möglich ist, sollten die Wuchtgewichte so nah wie möglich an der Radmittenebene angebracht oder zu beiden Seiten der Mittellinie aufgeteilt werden. Die Wuchtung sollte nochmals überprüft werden, wenn ein neuer Reifen zehn bis fünfzehn Minuten gefahren wurde. Eine Kennzeichnung sollte auf dem Reifen und der Felge angebracht sein, um sicher zu stellen, daß keine Relativbewegung stattgefunden hat.

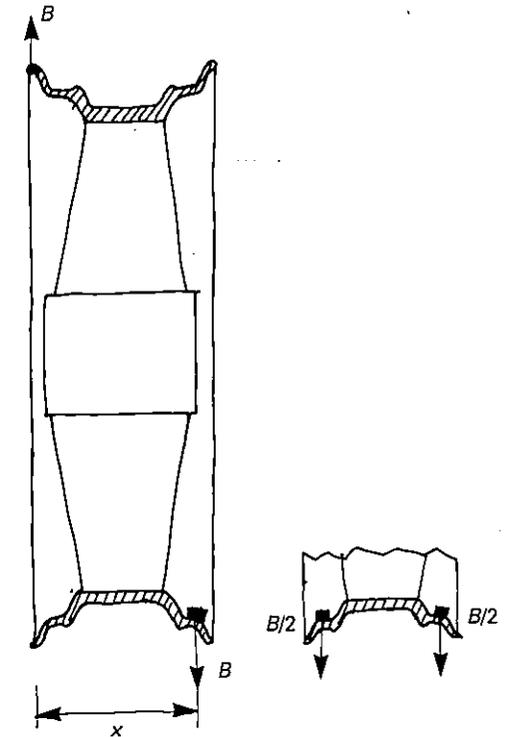
## Kreiselkräfte

Das Massenträgheitsmoment eines Rades, das proportional zu seiner Masse dem Quadrat des Radius, auf dem sich die Masse konzentriert, und seiner Geschwindigkeit ist, wirkt sich in Kreiselkräften aus. Die Kreiselkraft besitzt die Eigenschaft, eine Kraft in eine andere Ebene zu übertragen. Das kann man demonstrieren, indem man das Rad eines Fahrrads an der Achse festhält und es so schnell wie möglich antreibt. Versuchen Sie das Rad nach rechts zu drehen, und es reagiert darauf, indem es sich sofort stark nach rechts neigt. Das Moment, das in die Achse eingeleitet wurde, wird übergeführt in eine Richtung, die 90 Grad zur Drehung des Rads verläuft.

Das ist sehr nützlich während der Einleitung eines Lenkmanövers. Um die Maschine nach rechts zu neigen, versucht der Fahrer die Lenkung nach links einzuschlagen. Die Kreiselkräfte am Vorderrad unterstützen den Lenkeinschlag.

Nachdem die gesamte Maschine nun anfängt, sich nach rechts zu neigen, erzeugen die Kreiselkräfte am Hinterrad, an der Kurbelwelle und an den Getriebewellen Kräfte, die diese Teile nach rechts drehen wollen. Oder aber nach links, falls der Motor rückwärts läuft. Das erzeugt Biegekräfte in der Schwinge und in der Motorlagerung. Wenn Sie eine Biegekraft auf ein Bauteil ausüben, wird es sich ohne Zweifel verformen. Die einzige Frage ist, wie stark? Schon leichte Verformungen an der Hinterradaufhängung und dem Hauptrahmen können die Fluchtung der Räder genügend ändern, um auch die Schräglage zu ändern. Wenn das Motorrad sich auf seinem Kurs stabilisiert hat, werden die Lenkkräfte zurückgenommen und die Reaktion der Kreiselkräfte verschwindet, so daß der verformte Rahmen in seine normale Lage

zurückkehrt und die Kettenflucht erneut ändert. Deshalb ist eine Verringerung des Massenträgheitsmoments und eine Erhöhung der Rahmen- beziehungsweise Schwingensteifigkeit äußerst wünschenswert.



**Abbildung 4.3** Falls am Rand einer breiten Felge eine Unwucht auftritt und das Auswuchtgewicht auf der gegenüberliegenden Seite angebracht wird, ist das Rad statisch ausgewuchtet. Es entsteht aber ein Moment  $Bx$ . Das kann durch Teilen der Auswuchtgewichte und Anbringung auf beiden Seiten der Felge oder nahe der Mitte halbiert werden.

## Radlager

Benützen Sie Radlagerfett (wasserabstoßendes Fett für Geländemotorräder). Kontrollieren und füllen Sie die Lager ständig. Sie sollten mithilfe von Beilagsscheiben exakt distanziert sein und zwar sowohl zwischen den Lagern als auch innerhalb der Gabelholme. Wenn die Radachse und die Klemmungen angezogen sind, sollte keine Vorspannung auf den Lagern sein. Falls die Distanzscheiben nicht exakt in den Abmessungen passen oder die falsche Reihenfolge beim Anziehen durchgeführt wurde, ist es möglich, das Gabelbein soweit zu verspannen, daß die Bremsscheibe streift. Geschlitzte Achsmuttern sollten ebenfalls mit Distanzscheiben ausgeglichen, und nicht zu fest angezogen werden, um die Schlitze in Übereinstimmung mit der Bohrung in der Achse zu bringen.

# Radaufhängungen

Die erste Anforderung an die Radaufhängung ist es, mit Bodenwellen fertig zu werden. Einerseits um die Straßenunebenheiten zu absorbieren, um dem Fahrer Komfort zu geben und um Teile des Motorrads nicht zu zerstören, andererseits um die Reifen in ständigem Kontakt mit dem Boden zu halten, so daß sie konstanten Kraftschluß zum Beschleunigen, Bremsen und Kurvenfahren haben.

Die Schwierigkeit besteht darin, daß wir nicht wissen, wie groß diese Bodenwellen sind. Stellen Sie sich vor, eine Bodenwelle hat die gesamte Höhe  $h$  über eine Länge  $x$  (ihre Kanten sind sanft gerundet, um das Rad gleichmäßig bis zur ablaufenden Rampe zu führen). Ein Motorrad mit starrer Radaufhängung, das mit der Geschwindigkeit  $v$  fährt, benötigt die Zeit  $t = x/v$ , um vom tiefsten zum höchsten Punkt zu gelangen. Während dieser Zeit hat es eine durchschnittliche vertikale Geschwindigkeit von  $h/t = hv/x$  und muß von null (vertikal) auf diese Geschwindigkeit beschleunigt werden. Die zur Verfügung stehende Zeit ist  $t$ . Daraus resultiert eine durchschnittliche Beschleunigung von  $hv/xt = hv^2/x^2$ . Das ist der kleinstmögliche Wert (falls es längere Zeit als  $t$  zum Beschleunigen dauert, würde es direkt hinter der Welle aufkommen). Wir können daraus sehen, daß die Beschleunigung (und daher die benötigte Kraft) proportional zur Höhe der Bodenwelle, zum Quadrat der horizontalen Geschwindigkeit des Motorrads und umgekehrt proportional zur horizontalen Länge der Bodenwelle im Quadrat ist.

Was aber passiert während dem Zeitintervall, den das Motorrad braucht, um vertikal zu beschleunigen? Falls die Beschleunigung (und die Kraft) sich allmählich aufbauen können, was verzögert es dann? Man kann sich vorstellen, wenn der Reifen auf die Anlauframpe der Bodenwelle trifft, wird er komprimiert und gibt anschließend die Kraft auf den Rest des Motorrads weiter. Aber was passiert, wenn der Reifen starr wäre? Die vertikale Geschwindigkeit würde in der Zeit, die das Rad braucht, um von der Horizontalen bis zur abfallenden Rampe der Bodenwelle zu rollen, von null auf ein Maximum ansteigen, das heißt,  $t$  wäre tatsächlich sehr gering aus. Die Ausfederung  $hv/xt$  würde gegen einen sehr hohen Wert streben. Daraus ergibt sich die Beschleunigung des Motorrads und die Kraft, die nötig sind, um sie der Massenbeschleunigung zeitlich anzugleichen. Daher ist die, auf ein starres Rad wirkende Kraft immens (die Alternative besteht darin, daß sich die Felge deformieren, also einbeulen, und auf diesem Wege einiges der Energie absorbieren würde). Unter der Annahme, daß alle Komponenten geringfügig nachgeben, und es ungefähr bis zum halben Anstieg der Rampe dauert, bis die volle vertikale Geschwindigkeit erreicht ist, ist die benötigte Zeit  $t/2 (= x/2v)$ . Dann beträgt die Beschleunigung  $2hv^2/x^2$ . Es sind hier zwar viele Annahmen getroffen, aber es ist eine Grundlage, aus der wir einige Zahlen ableiten können, die zumindest die Größe des Problems aufzeigt. Tabelle 5.1 zeigt eine Vielfalt

von Geschwindigkeiten über einer Bodenwelle, die zirka 1,20 Meter lang und ungefähr zwölf Zentimeter hoch ist und die Beschleunigung, die sie am Rad erzeugt.

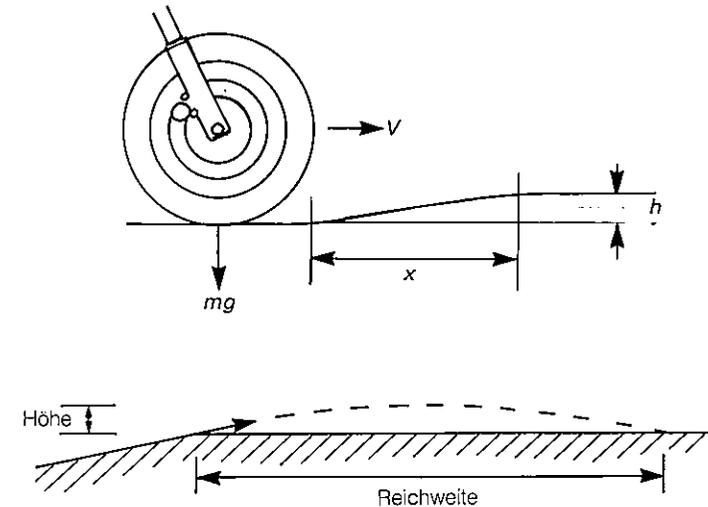


Abbildung 5.1 Abmessungen einer Bodenwelle und die, durch die Bodenwelle hervorgerufene Flugbahn.

Tabelle 5.1 Kräfte beim Überfahren einer Bodenwelle in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

Höhe der Bodenwelle	12 mm	0,012 m				
Länge der Bodenwelle	1,20 m					
Geschwindigkeit km/h	32	64	96	128	160	
	m/s	8,9	17,8	26,7	35,6	44,4
Beschleunigung $2 hv^2/x^2$ , m/s <sup>2</sup>	1,37	5,49	12,26	21,78	34,43	
	g	0,14	0,56	1,25	2,22	3,51

Daher würde also die oben beschriebene Bodenwelle eine Kraft erzeugen, die bei 64 Kilometern im Bereich der halben Gewichtskraft des Motorrads liegt, bei 128 km/h bereits mehr als das Doppelte und bei 160 km/h das Dreieinhalbfache beträgt. Das geht nur mit Elastizitäten, zum Beispiel im Reifen, die verhindern, daß die Beschleunigungen ins Unermeßliche steigen, sie über eine längere Dauer verteilt und damit den Stoß dämpft.

Das ist die Hauptaufgabe der Radaufhängung. Die Beschleunigung (und damit die Kraft), die bei einer solchen Bodenwelle entsteht, beträgt:

$$a = 2vh/xt \quad (5.1)$$

Dabei ist  $a$  die vertikale Beschleunigung aufgrund der Bodenwelle,  $v$  die horizontale Geschwindigkeit,  $h$  die Höhe und  $x$  die horizontale Länge der Bodenwelle und  $t$  die Zeit, die nötig ist, um das Motorrad auf die volle vertikale Geschwindigkeit zu beschleunigen.

Wenn wir nun wollen, daß das Motorrad in der Lage ist, eine Bodenwelle mit den hier angenommenen Maßen mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h zu überfahren, ohne daß die Beschleunigung einen Wert von 2 g übersteigt, sind die Anforderungen für die Radaufhängung denkbar einfach:

$$\text{Maximale Beschleunigung } 2g = 2vh/xt$$

daraus resultiert:

$$t = vh/xg$$

Die Radaufhängung muß die Last über die Zeitspanne verteilen, während der das Motorrad einen Weg von  $v^2 h/xg$  zurücklegt. Falls das länger dauert als die Länge  $x$  der Bodenwelle, dann ist diese Anforderung physikalisch nicht möglich. Man kann die Grenzgeschwindigkeit für die Bodenwelle ausrechnen. Es gibt jedoch einen anderen Weg: Man läßt das Rad die gesamten Kräfte der Bodenwelle aufnehmen und diese Kraft verzögert an den Rest des Motorrads weitergeben.

Da der Reifen als erstes auf die Bodenwelle trifft, findet eine Verformung statt. Anschließend wird das Rad nach oben beschleunigt und schiebt die Feder in der Radaufhängung zusammen. Der Reifen spielt hierbei eine wichtige Rolle. Die Radaufhängung muß an die Federcharakteristik des Reifens angepaßt sein. Wie berechnet, beträgt die Beschleunigung  $2vh/xt$ , wirkt aber nun nur auf die ungefederte Masse des Rads, der Bremse und der unteren Aufhängungsteile. Die Kraft ist viel geringer und schiebt die Feder um einen entsprechenden Betrag zusammen. Sie erzeugt dadurch eine gleichgroße Kraft in der Feder, die sofort beginnt, das Motorrad anzuheben. Zuerst wird also die Zeitspanne, von der reinen Kompression bis zur Verformung des Reifens und der Feder ausgedehnt. Dann ist die Kraft, die auf das Motorrad übertragen wird, in der Feder gespeichert. Jetzt ist  $m_1 2vh/xt$ , wobei  $m_1$  die ungefederte Masse des Rades ist. Wenn man  $m_1$  reduziert, kann man die Kraft, abgesehen von dem Betrag der Masse des restlichen Motorrads also weiter absenken.

Nimmt man an, der Rest des Motorrads ist extrem schwer und hat sich schätzungsweise in dieser Zeit nicht bewegt, würde diese Kraft die Feder um einen bestimmten

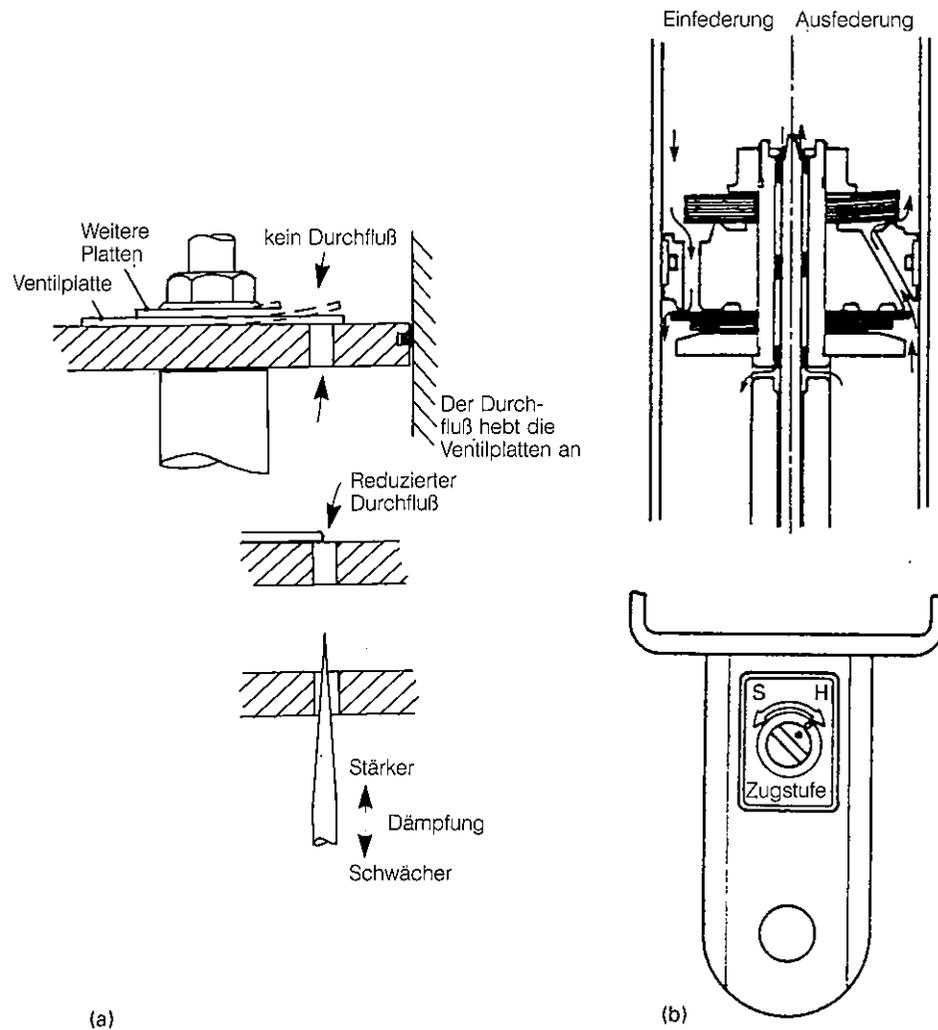
Betrag ( $= m_1 2vh/xts$ , wobei  $s$  die Federrate ist) zusammendrücken. Falls dieser Betrag geringer als die Höhe der Bodenwelle ist, ist die Feder zu hart. Falls er mehr als die Höhe der Bodenwelle ausmacht, ist die Feder für diese bestimmte Geschwindigkeit zu weich.

Die Federkraft, die auf die gefederte Masse  $m_2$  wirkt, bewegt sie mit einer Beschleunigung  $a_2$  aufwärts:

$$a_2 = m_1 2vh/xtm_2 \quad (5.2)$$

Das ist die gleiche Beschleunigungsgleichung wie zuvor, aber durch das Verhältnis  $m_1/m_2$  der ungefederten zur gefederten Masse modifiziert. Je geringer  $m_1/m_2$  ist, desto geringer fällt die Beschleunigung des Hauptteils des Motorrads aus. Darum ist es relativ einfach, komfortable Radaufhängungen für schwere Fahrzeuge zu entwickeln. Für Hochleistungsfahrzeuge ist es notwendig,  $m_2$  so weit wie möglich zu verringern. Damit wird es immer schwieriger, die ungefederten Massen im Verhältnis zu reduzieren (oder idealerweise sogar noch weiter). Das erklärt, warum Räder und Bremsen aus Magnesiumlegierung und Kohlefaser sowie leichte Reifenkonstruktionen usw. so interessant sind. Es gibt nicht viel, das auf der ungefederten Seite der Radaufhängung erleichtert werden kann. Der einzige Weg, eine große Gewichtsreduzierung zu erreichen, ist die Anwendung von exotischen Werkstoffen. Upside-Down-Gabeln, bei denen leichte Gleitrohre das Rad führen und der Dämpfer mitsamt dem Öl zu den gefederten Massen gehört, sind bei Grand Prix-Maschinen zur Norm geworden. Man beachte also, wenn Kräfte beim Überfahren einer Bodenwelle am gefederten Teil der Radaufhängung eines Motorrads beträchtlich reduziert werden, muß der ungefederte Teil, hauptsächlich das Rad, die vollen Kräfte aufnehmen und steif genug sein, um damit fertig zu werden. Die Drehung des Rads sorgt für eine Ermüdung des Werkstoffs, so daß die maximalen Kräfte die Dauerfestigkeit des Werkstoffs nicht übersteigen dürften. Die Kriterien für Dauerfestigkeitstests liegen gewöhnlich bei sechs Millionen Lastwechseln. Für ein typisches Straßenrad geben zehn Millionen Lastwechsel eine Entfernung von zirka neunzehntausend Kilometern wieder.

Soweit kann man also sehen, wie die Radaufhängung auf zwei Arten arbeitet. Zuerst wirken die Kräfte, die von einer Bodenwelle verursacht werden, auf eine relativ geringe Masse, dann wird diese geringere Kraft auf den Rest des Motorrads übertragen. Zweitens wird die Stoßlast über eine größere Zeitspanne verteilt. Die ungefederte Masse gewinnt ebenso an Massenträgheitskraft, die eventuell in der Feder gespeichert und auf den Rest des Motorrads übertragen wird. Dem kann durch eine Druckstufendämpfung entgegnet werden, einer Kraft also, die benutzt wird, um der Kompression der Feder entgegen zu wirken. In der Praxis wird das erreicht, indem Öl durch kleine Bohrungen gedrückt wird, wodurch sich das Öl erwärmt und somit Energie vernichtet, die sonst von der Feder aufgenommen würde. Diese Kraft wird zur Federkraft hinzugefügt und versteift die Radaufhängung. Die Hauptaufgabe ist zu verhindern, daß die ungefederten Massen zu hohe Geschwindigkeiten und somit Massenträgheitskräfte erreichen, die es erschweren würden, das Rad unter Kontrolle zu halten. Der Druck in der Flüssigkeit, die sich durch die Dämpferbohrungen bewegt, ist proportional zum Geschwindigkeitsquadrat, so daß die Dämpfungskraft in hohem Maße von der Ein- und Ausfedergeschwindigkeit abhängt. Das ist sehr nützlich in der nächsten Phase des Bewegungsablaufs. Wir hatten den Fall, bei dem das Vorderrad



**Abbildung 5.2 (a)** Dämpfermechanismus oben: Ein Kolben, den ein Kolbenring abdichtet, wird in einer Kammer mit Öl auf- und abbewegt. Bohrungen, die von Federplatten abgedeckt sind, lassen den Öldurchfluß in einer Richtung zu (und erzeugen, in Abhängigkeit der Größe der Bohrung und der Dicke der Scheibe, eine Kraft). Sie arbeiten wie ein Rückschlagventil.

mitte : Wenn man mit einer Scheibe einen Teil der Bohrung abdeckt, entsteht in einer Richtung ein geringer Widerstand, in der entgegengesetzten jedoch eine wesentlich höhere Kraft.

unten : Bei Verwendung einer konischen Nadel kann man den Querschnitt der Bohrung begrenzen und dadurch eine variable Dämpferkraft erreichen. Sie kann entweder durch eine Einstellung von außen oder im Betrieb geändert werden, wenn Teile sich relativ zueinander verschieben. (b) Der Hinterraddämpfer der Honda VFR 400 R zeigt den Weg des Öls in der Druck- und Zugstufe und die Verstellung der Nadel (Honda).

die Rampe der Bodenwelle hinauf und nun eine kleinere Kraft auf das Motorrad übertrug, das mit einer deutlich geringeren Geschwindigkeit nach oben beschleunigt als das Rad. Wenn der höchste Punkt der Bodenwelle erreicht ist, ist die Radaufhängung, falls die Federrate richtig gewählt ist, um einen Betrag  $h$  zusammengedrückt, möglicherweise auch mehr, wenn die Federrate zu gering ist. Das Rad führt ebenfalls eine Aufwärtsbewegung aus und versucht, weiter zu steigen, obwohl die Bodenwelle nicht mehr vorhanden und das Rad nicht länger in Kontakt mit ihr ist.

Wir haben nun eine Aufwärtsbewegung des Motorrads mit geringerer Geschwindigkeit, das Rad bewegt sich schneller aufwärts und die Feder versucht, die beiden Teile auseinander zu drücken.

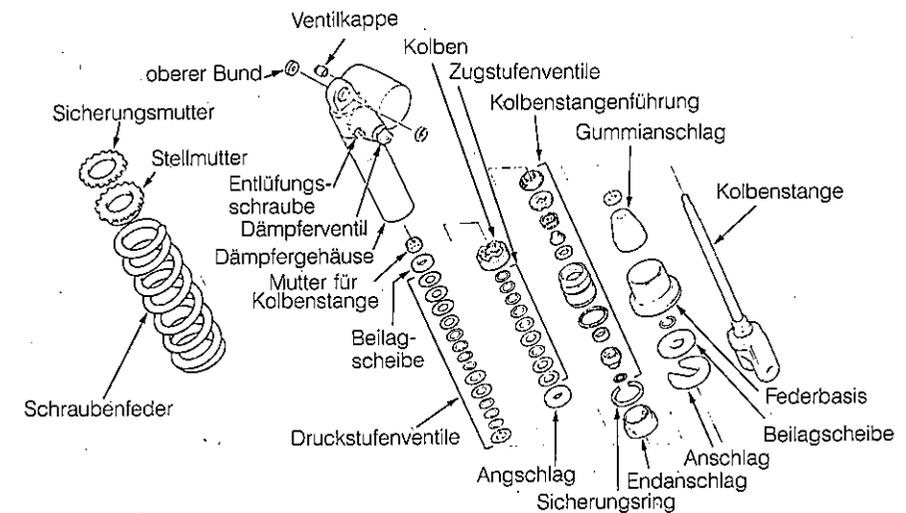
Für sich alleine würde das Rad einer ballistischen Bahn folgen, in einer parabelförmigen Kurve abheben und in einiger Entfernung hinter der Bodenwelle landen. Falls die ansteigende Rampe der Bodenwelle den Winkel  $\alpha$  hätte (so daß  $\tan \alpha = h/x$  ist), würde das freigestellte Rad auf folgender Bahn fliegen:

$$\text{maximale Höhe} = (v^2 \sin^2 \alpha) / 2g$$

$$\text{Reichweite} = (v^2 \sin 2\alpha) / g$$

$$\text{Flugzeit} = (2v \sin \alpha) / g$$

mit einer starren Radaufhängung oder einer Bodenwelle, die lang genug wäre, um das Rad am Boden zu halten, würde das gesamte Motorrad dieser Bahn folgen, obwohl der Luftwiderstand es abbremsen und die oben genannten Werte leicht verringern würde.



**Abbildung 5.3** Die einzelnen Komponenten des Hinterraddämpfers des Honda Motocrossers CR 500 R (Honda).

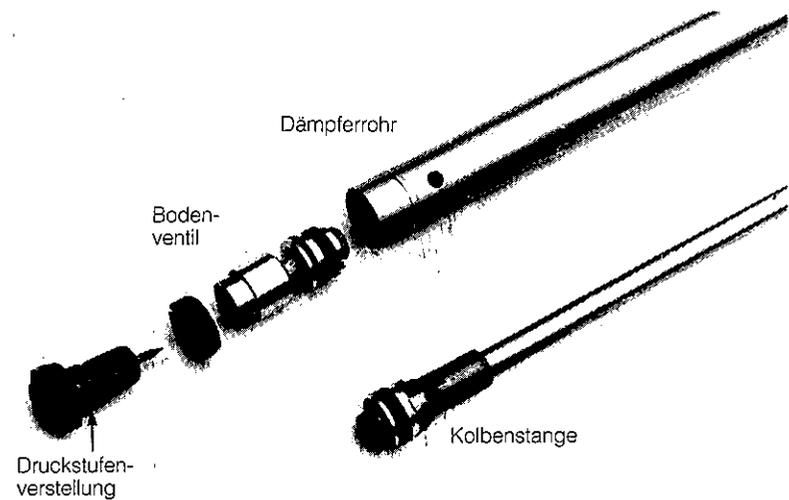


Abbildung 5.4

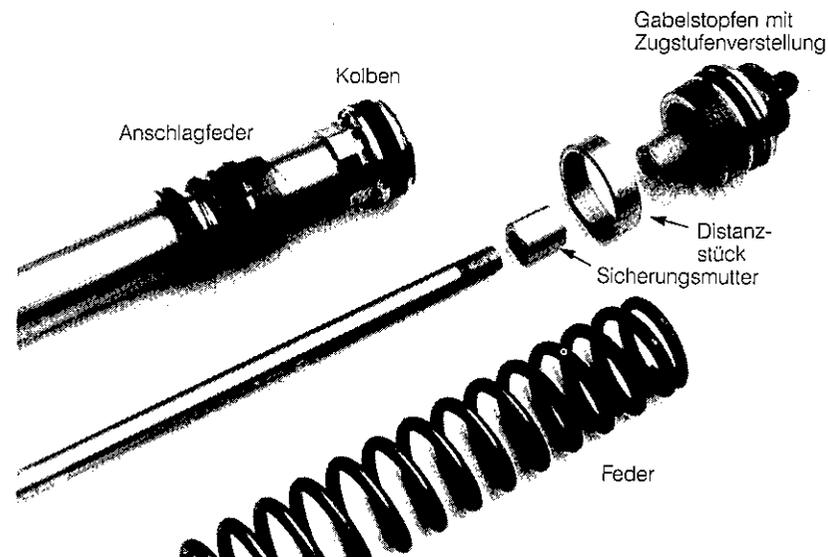


Abbildung 5.5

Die Aufgabe der Radaufhängung ist es jedoch, die Räder in Kontakt mit dem Boden zu halten. Am höchsten Punkt der Bodenwelle, an dem der Reifen versucht abzuheben, wirkt die Feder, die ihn zurückdrückt. Die Feder hat aber auch das Motorrad nach oben gedrückt. Wenn die ungefederte Masse geringer ist, neigt die Feder dazu, schneller zu reagieren. Das Rad wird dann nach unten beschleunigt, obwohl die gefederte Masse des Motorrads mit dem gleichen Betrag nach oben gedrückt wird. Das Verhältnis der beiden Massen bestimmt die Relativbewegung. Je geringer die ungefederte Masse ist, um so leichter ist es für die Feder, sie und nicht das Motorrad zu bewegen.

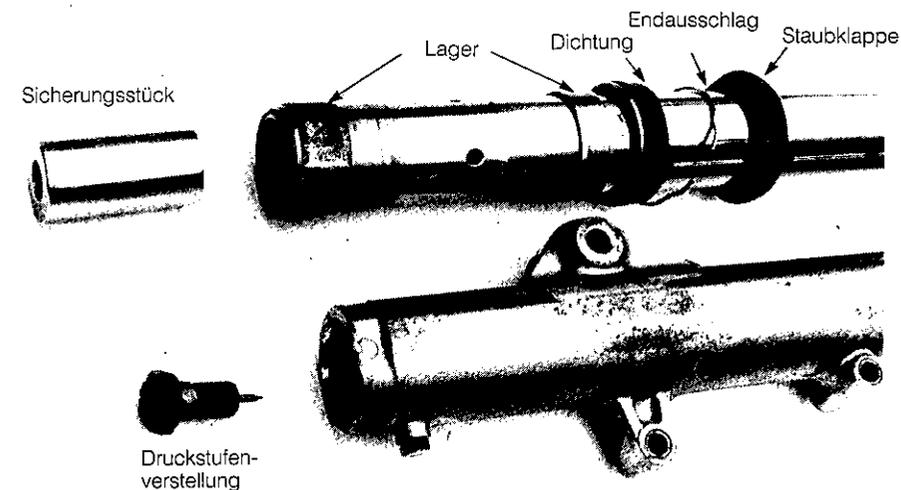


Abbildung 5.6



Abbildung 5.7



Abbildung 5.8

Abbildung 5.4 – Abbildung 5.8 Die in der Honda CR 500 R verwendete Showa-Vorderradgabel ermöglicht 305 Millimeter Federweg. Während der Einfederung preßt die Dämpferstange Öl durch das Bodenventil, das eine Verstellung mit einer konischen Nadel hat. Das öldurchflossene Rohr am Boden ist ein hydraulischer Anschlag, um den Kontakt von Metall auf Metall zu verhindern, falls die Gabel durchschlägt. Während dem Ausfedern wird Öl durch den Kolben und aufwärts durch die hohle Dämpferstange gepreßt, die eine Verstellung im Gabelstopfen hat. Spezialisten können den Dämpfer erneuern, indem sie die Ventile zerlegen und die Federplatten verändern oder verbessern, indem sie das Spiel der Lager und der Kolbenringe verringern.

Das Motorrad folgt nun seiner eigenen Bahnkurve, wobei die Radaufhängung ausfedert, so daß das Rad Bodenkontakt behält. Wenn das volle Gewicht des Motorrads die Feder wiederbelastet, wird sie zusammengedrückt. Wahrscheinlich geht sie über den statischen Punkt hinaus und kommt wieder zurück. Das ist jedoch eine unerwünschte, überflüssige Bewegung. Sie wird durch eine starke Zugstufendämpfung verringert.

Um eine Ausfederbewegung zu gestatten, falls die Bodenwelle am höchsten Punkt beginnt und eine abfallende Rampe hat, muß die statische Position der Radaufhängung einen Weg haben, der zwischen der vollen Ein- und Ausfederung liegt. In der Regel wird ein Drittel des Federwegs statisch ausgenützt. Die Federrate (oder auch die Ersatzfederrate) wird durch das Verhältnis der ungefederten zu den gefederten Massen und den voraussichtlichen Kräften an der Radaufhängung bestimmt, die bei einem vorgegebenen Kurs auftreten. Das Optimum stellt eine möglichst weiche Feder dar, die gelegentlich, aber nicht regelmäßig ganz einfedert. Beachten Sie, wenn die Geschwindigkeit steigt, steigen auch die Einfederkräfte.

Für Straßenmotorräder legt der Konstrukteur ein willkürliches Beschleunigungsmaximum für die gefederten Teile des Motorrads ( $a_2$ ) fest, die auf vorhergehenden Erfahrungen und Straßentests basieren. Er erarbeitet einen ähnlichen Wert für die Beziehung zwischen  $v, h$  und  $x$  (der Geschwindigkeit des Motorrads und den voraussichtlichen Abmessungen der Bodenwelle). Die größten, zu erwartenden Kräfte lassen die Radaufhängung ganz einfedern. Das bestimmt die Federrate, die sich aus der gesamten Kraft am Rad geteilt durch den zurückzulegenden Weg ergibt. Dort, wo die Feder direkt am Rad angreift, wird die Federrate durch die Anzahl der Federn geteilt. Falls die Federn über Umlenkhebel arbeiten oder in einem Winkel zum Einfederweg des Rads angelenkt sind, muß die Umlenkhebelelei entweder durch Abmessen direkt am Motorrad oder durch Erstellen einer Maßstabszeichnung erarbeitet werden. Falls die Annahmen getroffen sind, können die Federraten errechnet oder von ähnlichen Maschinen oder originalen, nicht modifizierten Motorrädern übernommen werden.

Beachten Sie, daß die Feder immer wieder vollständig ausfedert, welche Kraft auch immer gespeichert wird. Sie macht sich unter Betriebsbedingungen erst dann bemerkbar, wenn der Federweg bei einer vorgegebenen Bodenwelle ausgenützt wird. Falls die ungefederte Masse verringert wird, wirken beim Überfahren einer Bodenwelle geringere Kräfte. Somit wird auch weniger Energie in der Feder gespeichert (wodurch die Feder weniger zusammengedrückt wird und somit eine weichere Feder verwendet werden kann, so daß der Weg an der Feder der gleiche ist wie vorher). Diese Kraft überträgt sich dann auf den gefederten Teil des Fahrzeugs. Sie ist von der Federrate und der Druckstufendämpfung unabhängig. Berücksichtigen Sie das, wenn Sie Überlegungen über die Funktion des Fahrwerks anstellen.

Um Fahreigenschaften zu verbessern, ist es notwendig, die ungefederten Massen zu verringern oder die Druckstufe zu ändern. Es gibt keine gute oder schlechte Federrate. Eine sehr weiche Feder nützt den Federweg sehr schnell aus. Sie hat einen größeren Einfederweg als die Höhendifferenz der Bodenwelle. Die Lage des Motorrads wird stärker als notwendig verändert und somit überflüssige Energie verbraucht. Eine sehr harte Feder läßt sich nicht genügend zusammendrücken. Sie reagiert auf den Stoß mit geringer Verzögerung. Die geringere Fahrzeugbewegung erzeugt folglich auch geringere Dämpfungskräfte. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es eine Anzahl von Federraten, die verschiedene Werte an Eigenbewegungen verursachen. Einige davon sind sinnvoller als andere. Das Gewicht des Motorrads und des Fahrers drücken die Feder um einen gewissen Betrag zusammen. Die statische Lage, in der sie sich einpendeln, wird als Konstruktionslage bezeichnet. Sie wird durch die gegebene Last und Vorspannung der Feder, ihre Länge und Federrate bestimmt. Die

Vorspannung ist die Kraft, die überwunden werden muß, bevor sich die Feder zusammendrücken läßt. Die Verstellung der Federbasis dient dazu, den Negativfederweg, die Sitzhöhe und die Konstruktionslage des Motorrads zu verändern.

Neben der Aufgabe, mit Bodenwellen fertig zu werden, muß die Radaufhängung auch Kräfte bei Kurvenfahrt oder Radlaständerungen beim Bremsen und Beschleunigungen verarbeiten. Radlastverlagerungen können an der Vorder- und Hinterradaufhängung bis zu hundert Prozent betragen. Um mit solch großen Veränderungen fertig zu werden, wird die Radaufhängung oft lastabhängig, also mit steigender Federrate, konstruiert oder das Brems- oder Motormoment genützt, um die Radaufhängung zu unterstützen.

Gewichtsabhängig arbeitende Radaufhängungen und Aufhängungen mit ansteigender Federrate vergrößern die am Rad wirksame Federrate beim Einfedern. Das ermöglicht bei Einfederbeginn eine weiche Aufhängung und verhindert bei höheren Lasten ein Durchschlagen der Feder. Das Bremsmoment oder ein vom Bremsdruck abhängiges System werden verwendet, um zu verhindern, daß der gesamte Federweg am Vorderrad während dem Bremsen aufgebraucht wird (siehe Kapitel 6, Anti-Dive-Bremsen). Während das Antriebsmoment am Hinterrad benützt wird, um die Hinterradaufhängung während dem Beschleunigen zu unterstützen (siehe Anti-Squat-System unten). Schließlich werden zum eigenen Gewicht noch zusätzliche Zentrifugalkräfte in die Radaufhängung eingeleitet, wenn das Motorrad in Kurven in Schräglage fährt. Die gesamte Kraft, die in der Mittelebene des Motorrads angreift, beträgt:

$$\sqrt{m} (g^2 + v^4/r^2)$$

wobei  $m$  die Masse des Motorrads und des Fahrers,  $g$  die Beschleunigung aufgrund der Erdanziehung,  $v$  die Geschwindigkeit des Motorrads und  $r$  der Radius der Kurve ist. Der Neigungswinkel gegenüber der Vertikalen beträgt  $\varphi$ , woraus sich ergibt:

$$\tan \varphi = v^2/rg$$

Der Winkel  $\varphi$  wird zwischen der Vertikalen und der Verbindungslinie durch den Schwerpunkt des Motorrads und dem Mittelpunkt der Reifenaufstandsflächen gemessen. Sie stimmt nicht exakt mit der Mittelebene des Motorrads überein. Sie weicht davon stärker ab, wenn breitere Reifenquerschnitte benützt werden und das Motorrad einen niederen Schwerpunkt hat oder wenn der Fahrer seinen Körper zu einer Seite verschiebt. Die Kräfte und die daraus resultierende Einfederung der Radaufhängungen müssen berücksichtigt werden, wenn die Federrate festgelegt wird. Die Lage des Schwerpunkts verändert sich, wenn die Radaufhängung einfedert. Das kann für den maximalen Kraftschluß kritisch werden (siehe Kapitel 6, Anti-Dive-System). Während das Motorrad in Kurven einfedert, kann es die ganze Bodenfreiheit aufbrauchen. Gleichzeitig muß die Radaufhängung mit Bodenwellen fertig werden, die den verbleibenden Federweg (bis zum Anschlag) nutzen.

# Federn

Verschiedene Ausführungen werden benutzt:

1. Schraubenfeder
2. Torsionsstab
3. Gasfeder
4. Gummifeder auf Druck, Scherung oder Torsion
5. Schraubenfedern und Torsionsstäbe

Schraubenfedern aus Stahl sind im Prinzip Torsionsstäbe auf zweckmäßigem Raum untergebracht. Der Federdraht verdreht sich, wenn die Feder einfedert, woraus die Elastizität resultiert, die die Federkräfte erzeugt.

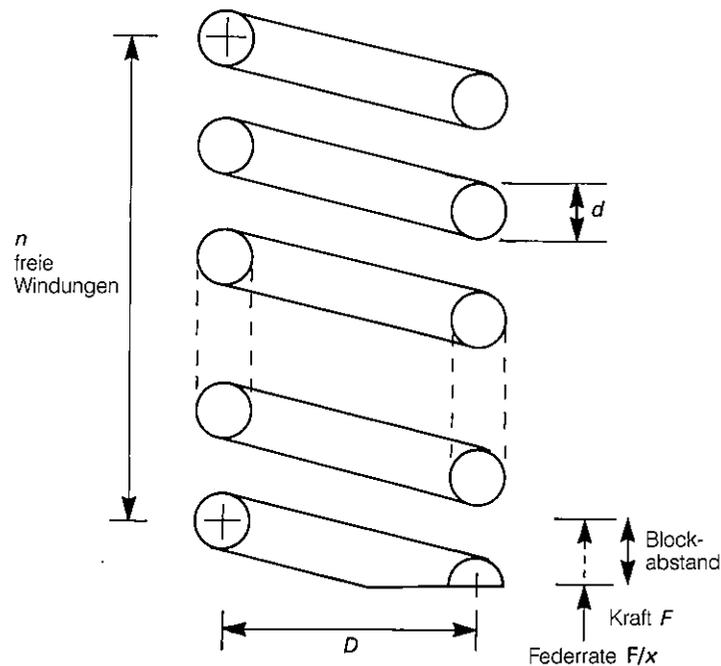


Abbildung 5.9 Wichtige Abmessungen einer Schraubenfeder. Die Federrate kann mithilfe dieser Abmessungen berechnet werden.

Die Federrate  $s$  beträgt:

$$s = F/x$$

$$= Gd^4/8nD^3$$

daraus ist  $F$  die axiale Kraft,  $x$  der axiale Abstand bei zusammengedrückter Feder,  $G$  der Schubmodul des Werkstoffs (78 500 – 81 400 N/mm<sup>2</sup> für kalt oder warm verformten Stahl),  $d$  der Drahtdurchmesser,  $n$  die Anzahl der freien Windungen und  $D$  der mittlere Windungsdurchmesser.

Für einen Torsionsstab gilt:

$$s = Fa/\alpha$$

$$= G\pi d^4/1834 l$$

wobei  $Fa$  das Torsionsmoment,  $\alpha$  der Verdrehwinkel und  $l$  die Länge des Stabs ist. Schraubenfedern können in Reihe geschaltet werden, woraus eine gemeinsame Federrate resultiert bis eine Feder auf Block geht und die Rate der anderen Feder übrig bleibt.

Die Gesamtfederrate  $s$  ist:

$$s = s_1 s_2 / (s_1 + s_2)$$

wobei  $s_1$  und  $s_2$  die einzelnen Federraten sind. Falls die Federn parallel geschaltet sind (Telegabeln, zwei Federbeine), werden die beiden Federraten einfach addiert.

Eine Alternative dazu ist eine Feder mit zwei unterschiedlichen Federraten die so gewickelt ist, daß die letzten Windungen  $m$  einen geringeren Abstand haben. Wenn die Feder zusammengedrückt wird, berühren sich diese Windungen, gehen auf Block und tragen somit nicht länger zur Federkraft bei. Die Federrate beträgt nun:

$$G d^4/8 (n - m) D^3$$

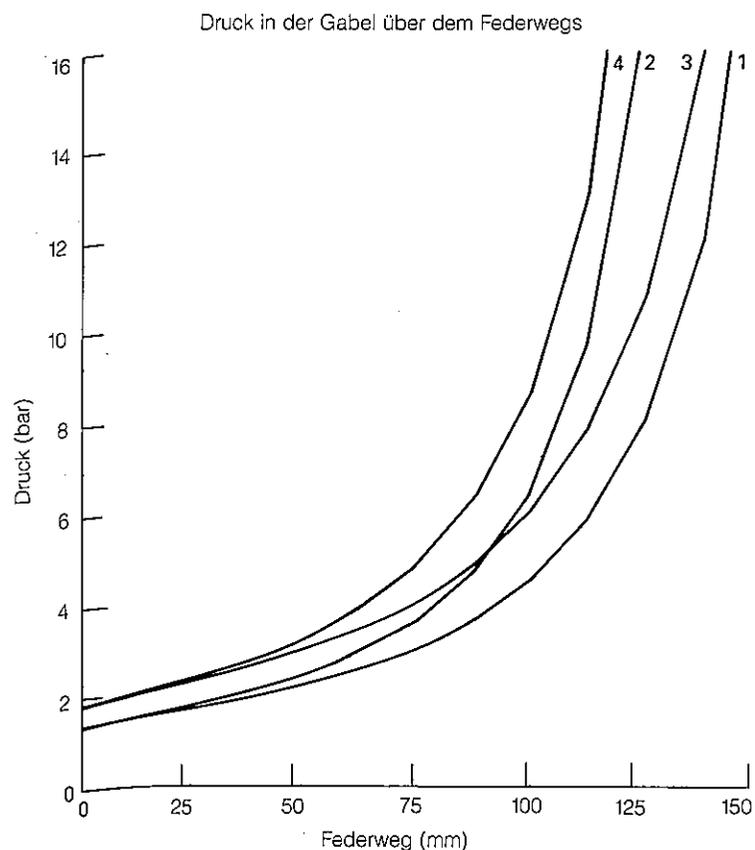
was einer höheren Rate als anfangs entspricht.

Es gibt auch progressiv gewickelte Federn, bei denen der Abstand der letzten Windung am geringsten ist und mit steigender Anzahl ständig größer wird, so daß eine Windung nach der anderen auf Block geht, was zu einer ansteigenden Federrate führt. Schraubenfedern können ebenso mit Gasfedern kombiniert werden (luftunterstützte Federn). In diesem Fall wirken die beiden Federraten als Parallelschaltung. Sie werden einfach miteinander addiert, um die Gesamtfederrate zu erhalten.

## Gasfedern

Luft oder jedes andere Gas (Stickstoff ist das am weitesten verbreitete) ergibt eine sehr leichte Feder, die grundsätzlich eine ansteigende Federrate hat. Sie ist stufenlos

verstellbar und hat keine Massenträgheit. Telegabeln sind, solange sie wirkungsvolle Dichtungen haben, luftunterstützt, sogar wenn sie mit null bar Anfangsdruck arbeiten oder kein Ventil haben, mit dem der Luftdruck geändert werden kann. Andere Bauarten haben überhaupt keine Stahlfeder und arbeiten allein mit Gasdruck. Verschiedene Dämpferbauarten (die zum Beispiel nach dem De Carbon-Prinzip arbeiten) enthalten Gas unter hohem Druck, das auf eine Kolbenfläche wirkt und einen kleinen Beitrag zur Gesamtfederrate leistet.



**Abbildung 5.10** Die Beziehung zwischen Gasdruck und Hub für eine Telegabel oder ein Gasdruckfederbein. Es ist durch Änderung des Gasdrucks oder des Druckverhältnisses (in der Regel durch Auffüllen oder Ablassen von Gabelöl) verstellbar. Kurve eins zeigt die originale Einstellung, beginnend bei 1 bar (atmosphärischer Druck), Kurve zwei zeigt, was geschieht, wenn das ursprüngliche Gasvolumen durch Auffüllen von mehr Öl um vierzehn Prozent verringert wird. Der Anfangsdruck verändert sich nicht sehr stark, er steigt dagegen stark an, wenn die Gabel mehr als den halben Weg eingefedert ist. Kurve drei zeigt denselben Ölstand wie Kurve eins. Diesmal wurde aber der Anfangsdruck um 0,35 bar erhöht. Das ergibt einen flacheren Druckanstieg, also eine härtere Feder als Kurve zwei im Bereich des halben Federwegs. Darüber zeigt jedoch Kurve zwei eine ständig anwachsende höhere Federrate. Kurve vier zeigt die Auswirkungen beider Maßnahmen. Die Verringerung des Gasvolumens um vierzehn Prozent und eine Erhöhung des Anfangsdrucks um 0,35 bar.

Im wesentlichen bewegt die Radaufhängung einen Kolben in einer abgedichteten Kammer (die Öl als Dämpfungsmedium enthält). In isothermem Zustand, das heißt, wenn die Temperatur konstant bleibt, verhält sich der Druck umgekehrt proportional zum Volumen:

$$pV = K$$

$$F = pA$$

dabei ist  $p$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $K$  eine Konstante,  $F$  die Kraft in der Federeinheit und  $A$  die Fläche des Kolbens.

Falls man das Volumen halbiert, verdoppelt sich der Druck. Eine weitere Halbierung des Volumens (das diesmal nur ein Viertel des Wegs beansprucht) vervierfacht den ursprünglichen Druck. Das erzeugt eine steil ansteigende Federrate. Im realen Betrieb geschieht die Einfederung jedoch so schnell, daß sie einen Temperaturanstieg bewirkt. Das verschiebt die Verhältnisse geringfügig (Änderungen in der Umgebungstemperatur können sich ebenso auf die Federrate auswirken). Die Aufhängung arbeitet im allgemeinen so schnell, daß die Einfederung adiabatisch, das heißt ohne Wärmeverlust, verläuft. Die Ausfederung wird dann zu:

$$pV^\gamma = K$$

wobei  $\gamma = C_p/C_v$  das Verhältnis des Wärmeäquivalents von Gas bei konstanter Temperatur und konstantem Volumen ist. Es liegt sowohl für Luft als auch für Stickstoff bei 1,40.

Die Kurven in Abbildung 5.10 beziehen sich auf einen Anfangsdruck und Verdichtungsverhältnis (in der Regel durch Auffüllen oder Ablassen von Öl) und haben sehr unterschiedliche Auswirkungen.

Die Nachteile der Luftunterstützung liegen in Abdichtproblemen und höheren Kosten: Tatsache ist, daß der Gasdruck dazu benützt wird, die Dichtungen stärker anzupressen, was die Reibung und den Verschleiß, aber auch die Temperaturempfindlichkeit (besonders in der Nähe des Motors oder Auspuffanlage), erhöht. Außerdem muß der Anstieg der Federrate kalkulierbar sein (bei geringer Einfederung neigt die Federrate dazu, zu gering zu sein, während bei größerer Einfederung der Wert viel zu hoch ausfällt).

#### Gummifedern

In der Vergangenheit wurde Gummi in Form von Gummiblocks in Schwingenfahrwerken benützt. Hagon-Grasbahngabeln benützten Gummi als Zugfedern, während die frühen Minis Gummi als Druckfedern verwendeten. Dieser Werkstoff wird bei heutigen Motorradkonstruktionen nicht mehr verwendet, so daß wir dieses Kapitel nicht weiter ausführen müssen. Zu erwähnen ist aber noch eine Reihe von Vorteilen wie geringes Gewicht, innere Dämpfung und geringer Platzbedarf.

Nachteile sind die Alterung über der Zeit und der Einwirkung von ultraviolettem Licht, Empfindlichkeit auf Temperatur und möglicherweise auf einige Chemikalien und die Schwierigkeit, die benötigte Federkraft mit dem nötigen Betrag an Federweg zu kombinieren, obwohl Hebelumlenkungen dieses Problem lösen können. Der Gummi kann sich auch setzen, falls er unter Last gelagert wird.

## Aktive Aufhängungen

Alle Federn sind passiv. Sie müssen durch eine Kraft verformt werden, bevor sie Energie speichern können. Eine alternative Art der Aufhängung, die bis jetzt nur bei Autos benutzt wird, hat keine Federn. Sie unterstützt das Fahrzeug durch die Anwendung von Flüssigkeiten unter Druck. Daraus ergibt sich, daß ein Pumpensystem und ein Rechner zur Regelung notwendig sind. Ein System, das momentan zu aufwendig ist, um es auf Motorräder zu übertragen. Es kann jedoch Bodenwellen und Radlaständerungen ausgleichen und die Federelemente anhand eines vorgewählten Programms regeln, zum Beispiel, um das Niveau gleich zu halten, positive oder negative Rollwinkel in Kurven zu erzeugen, Eintauchen beim Bremsen oder Beschleunigen zu verhindern, usw.. Die Wirkung dieser Systeme ist bereits sehr gut. Falls die Größe der Bauteile verringert werden kann, ist es möglich, die Radaufhängung von Motorrädern zu verbessern, insbesondere wenn bereits eine elektronische Regeleinheit, zum Beispiel für Kraftstoffeinspritzung, Antiblockiersysteme oder Antischlupfregelungen vorhanden ist.

## Dämpfung

Anfangs hatten Motorräder Reibungsdämpfer, die sich nicht durchsetzten, weil sie die größte Kraft in der Ruhelage ausübten bevor sich die Federelemente bewegten. Je schneller sie arbeiteten umso weniger Dämpferkraft erzeugten sie. Hydraulische Dämpfer, in denen Flüssigkeit durch eine Bohrung gepreßt wird, arbeiten genau umgekehrt. Sie sind geschwindigkeits- und nicht lastabhängig.

Die Bernoulli'sche Gleichung besagt:

$$\frac{v^2}{2} + \int \frac{dp}{D} + hg = K$$

darin ist  $v$  die Geschwindigkeit der Flüssigkeit,  $p$  der Flüssigkeitsdruck,  $D$  die Dichte der Flüssigkeit,  $h$  die Höhe über einem Kennwert und  $K$  eine Konstante.

Falls in einer inkompressiblen Flüssigkeit die Dichte konstant ist, kann diese Formel vereinfacht werden zu:

$$v^2/2 + p/D + hg = K$$

Der Druck wird durch die Kraft auf die Dämpferstange und die Kolbenfläche erzeugt, die auf die Flüssigkeit wirkt. Sie ändert die Höhe geringfügig. Die wichtigste Variable ist  $v^2$ , das bedeutet, die Kraft ändert sich mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Daher ist der hydraulische Dämpfer abhängig vom Quadrat der Geschwindigkeit.

Das bedeutet, daß die Dämpferkräfte umgekehrt proportional zur Fläche der Bohrung sind, durch die die Flüssigkeit gepumpt wird. Je kleiner also die Bohrung ist, umso größer ist die Geschwindigkeit der Flüssigkeit.

Die Bewegung der Flüssigkeit kann durch Rückschlagventile geregelt werden, so daß die Dämpfung in einer Richtung sehr viel größer als in der Gegenrichtung ist. Die Kraft kann durch druckgeregelt Ventile, zum Beispiel einer federbelasteten Scheibe, verändert werden, die bei einem vorbestimmten Druck öffnet und eine größere Bohrung frei läßt, um zu vermeiden, daß die Dämpferkräfte auf ein unerwünscht hohes Niveau anwachsen. Sie kann auch durch eine konische Nadel in einer Bohrung geregelt werden. Je weiter der Konus eintaucht, um so geringer ist die, für den Durchfluß freibleibende Fläche. Die Einstellung erfolgt zum Beispiel über eine Schraube, die die Höhe der Nadel regelt. Die Dämpfung kann auch progressiv oder lastabhängig arbeiten (wenn die Dämpferinheit unter einer größeren Last einfedert, verschiebt sich der Dämpfer und somit die Nadel in eine andere Position, wodurch, je nach Auslegung, mehr oder weniger Dämpfung erzielt wird).

Die Dämpfung kann auch durch Öffnen oder Schließen von gesonderten Bohrungen entweder als Einstellung von außen oder beim Einfedern erfolgen, um beim Benützen der Bremse eine zusätzliche Dämpfung zu erzielen (siehe Kapitel 6, Anti-Dive-Systeme).

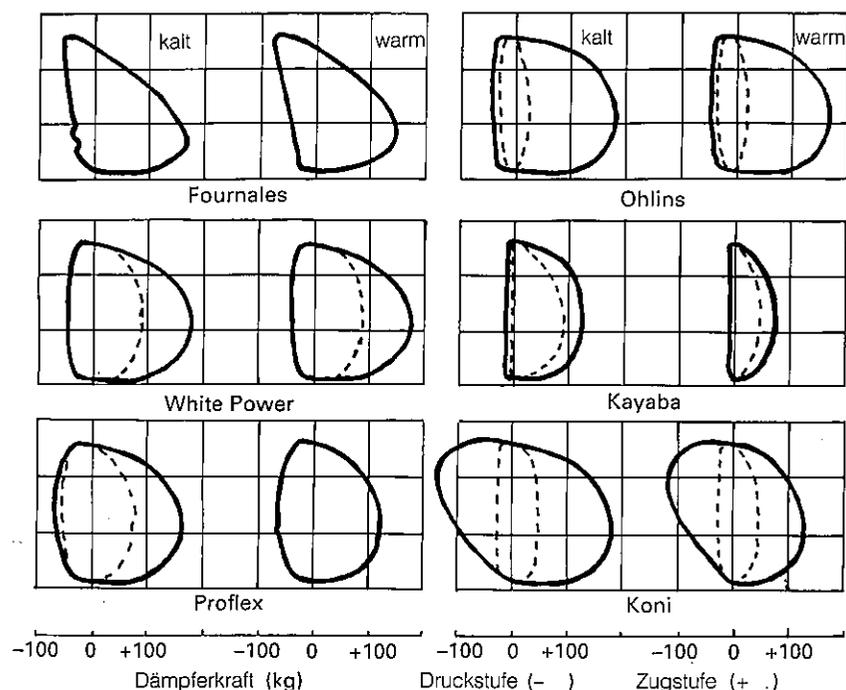
Die Dämpferflüssigkeit ist in der Regel Mehrzweckgabelöl oder ATF (Automatic Transmission Fluid), sie kann aber auch Motorenöl sein. Ihre Hauptaufgabe ist es, über den gesamten Arbeitsbereich des Dämpfers eine konstante Viskosität aufrecht zu erhalten. Sie muß aber zusätzlich auch die bewegten Teile schmieren (insbesondere die Gleitlagerbüchsen), sich mit den Dichtungen vertragen und der Luftaufnahme widerstehen.

Gabelöle sind in Viskositätsklassen der Society of Automotive Engineers (SAE) von 0 W aufwärts erhältlich. Einige Hersteller führen Öle wie SAE 7,5, die nicht auf der SAE-Skala existieren, in der Viskosität aber zwischen 5 W und 10 W liegen. Es ist möglich, unterschiedliche Klassen zu mischen. Gleiche Mengen von SAE 5 W und 10 W ergeben 7,5. Fügt man mehr SAE 5 W hinzu, nimmt die Viskosität im Verhältnis ab. Mischen Sie keine unterschiedlichen Marken, da sie leicht unterschiedliche Viskositäten haben können. Ein Öl, das im unteren Bereich eines SAE 10 W rangiert, kann eine geringere Viskosität haben als eines, das im oberen Bereich eines SAE 5 W liegt.

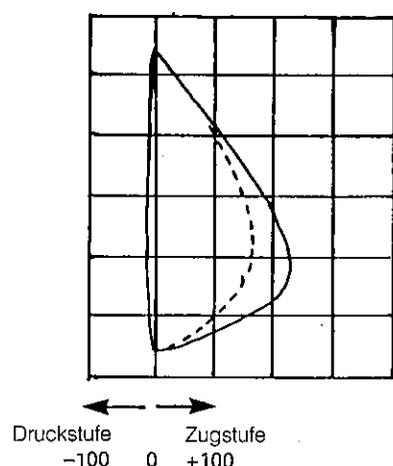
Der SAE-Standard fordert für ein SAE 5 W eine maximale Viskosität von 3500 cP bei minus dreißig Grad Celsius, während ein SAE 10 W eine maximale Viskosität von 3500 cP bei minus zwanzig Grad Celsius haben muß. Die minimale Viskosität bei hundert Grad Celsius beträgt 3,8 cSt (5 W) und 4,1 cSt (10 W).

Der Dämpfer arbeitet, indem er das Öl erwärmt. Das bedeutet, daß die Dichte und somit die Kraft abnimmt (Dämpfer-Fading). Manchmal haben Dämpfer extra Ausgleichsbehälter, um die Flüssigkeit auf einem erträglichen Temperaturniveau zu halten. Es nützt nichts, den Dämpfer in einem heißen Luftstrom zu montieren, der vom Auspuff, vom Kühler oder vom Motor selbst kommt. Alle Dämpfer fallen bis zu einem gewissen Grad ab. In Tests, die für »Performance Bike« auf einem Prüfstand durchgeführt wurden (auf dem der Dämpfer bei einem festgelegten Hub bei konstanter Geschwindigkeit betrieben und die Kraft gemessen wurde), fanden wir heraus, daß ein Typ nach zwei Minuten beachtlich abfiel, während andere, obwohl sie an Dämpferkraft verloren, immer noch ein annehmbares Niveau behielten.

Falls das Öl zu stark durch die Dämpferbohrungen gepreßt wird, kann es der Kavitation unterliegen und Luftblasen aufnehmen. Das verringert die Viskosität des Dämpferöls und bewirkt, daß die Flüssigkeit kompressibel wird, was nicht gerade zur



**Abbildung 5.11 (a)** Dämpfereinheiten auf einem Stoßdämpfer-Prüfstand getestet, auf dem, bei einer festgelegten Geschwindigkeit die Dämpferkräfte gemessen werden. Der Kraftabfall nach 3,5 Minuten Laufzeit ist ebenso aufgezeichnet (warm) wie der volle Verstellbereich des Dämpfers (gestrichelte Linie).



**Abbildung 5.11 (b)** Die Auswirkung auf die Dämpferkräfte bei Änderung des Öls von SAE 5 (unterbrochene Linie) auf ein SAE 10 Gabelöl.

Wirksamkeit des Dämpfers beiträgt. Um dieses Problem zu vermeiden, haben Hersteller versucht, die Flüssigkeit in einem Ausgleichsbehälter unter Druck zu halten und einen Kolben (De Carbon) oder eine Membrane zwischen dem Gas und der Flüssigkeit unterzubringen. Ein dickeres Öl neigt eher zur Kavitation. Im allgemeinen ist es günstiger, ein dünneres Öl (SAE 5 W) zu verwenden, und die Dämpferkräfte durch kleinere Bohrungen zu erhöhen.

Die Menge des Öls im Dämpfer hat einige Auswirkung auf die Dämpferkräfte. Je weniger Öl sich im Dämpfer befindet, umso wärmer wird er im Betrieb und neigt um so mehr zum Nachlassen. Es muß auch genügend Öl zur einwandfreien Schmierung der Bauteile und der Dichtungen vorhanden sein.

Der Flüssigkeitsstand in einer abgedichteten Einheit beeinflusst auch das Verdichtungsverhältnis. Falls der Stand zu hoch ist, kann der Druck so weit ansteigen, daß er im Extremfall die Einheit blockiert und keinen weiteren Weg zuläßt. Einige Gabelöle sind so aufgebaut, daß sie leicht mit dem Werkstoff der Dichtungen reagieren, worauf diese geringfügig aufquellen und wirkungsvoller abdichten. Falls die Dichtungen austrocknen, können sie sich zusammenziehen. Trocken laufende Dichtungen verschleifen selbstverständlich schneller.

Hinter der Dämpferkonstruktion steht die Absicht, einen Teil der Kräfte aufzunehmen, die in der Feder gespeichert werden. Diese Kräfte werden direkt in den Dämpfer eingeleitet. Die Energie wird aber teilweise absorbiert und somit vernichtet. Der Dämpfer bremst die Bewegung ab und hilft, Durchschlagen und die Veränderung der Fahrzeughöhe zu verringern, indem die Bewegung auf einen längeren Zeitraum verteilt wird. Das erscheint logisch, ist aber kritisch, wenn der Dämpfer die Energie eines Stoßes verarbeitet während bereits der nächste und der übernächste kommen. Bevor die Feder sich in ihre Ausgangsposition zurückbewegen kann, wird sie erneut zusammengedrückt. Das Federbein verhärtet zunehmend, das sogenannte Pumping Down, verringert die Sitzhöhe des Motorrads und braucht den Federweg auf. Diese Erscheinung wird durch eine zu hohe Zugstufendämpfung verursacht.

Es ist möglich, den Dämpferkreislauf als Pumpe auszulegen und zu benutzen, um die Gasfeder aufzupumpen. Boge verwendet das bei ihrem Nivomat-System, welches während dem Fahren selbsttätig pumpt bis die Sitzhöhe, unabhängig von der Beladung des Fahrzeugs, einen bestimmten Stand erreicht hat.

Die Dämpfung kann auf verschiedene Arten verstellt werden:

1. mit externen Verstellmöglichkeiten, falls vorgesehen.  
Die meisten Dämpfereinheiten haben eine geringe oder keine Druckstufendämpfung. Die Verstellmöglichkeiten bewirken einen kaum wahrnehmbaren Unterschied. Koni-Federbeine sind eine bemerkenswerte Ausnahme. Die Zugstufendämpfung ist sehr hoch, die Zugstufenverstellung bewirkt eine große Änderung.
2. durch Variation der Ölviskosität  
Ein höhere Klasse hebt die Dämpfung in beiden Richtungen an, neigt aber eher zur Kavitation und Luftaufnahme.
3. durch Steigerung der Ölmenge  
In einigen Konstruktionen kann dadurch die Neigung zur Luftaufnahme oder zum Fading verringert werden, da es die Federrate und den internen Druck ändert. Die Auswirkung auf Stempeln muß aber genau beobachtet werden.

- durch Modifizieren des Dämpfers mit verschiedenen Bohrungen, Ventilplatten und konischen Nadeln

Das ist eine Arbeit für Spezialisten, insbesondere bei unter Druck stehenden Federbeinen.

- durch Veränderung der Federrate

Dadurch ändert sich die Einfederung der Feder bei einer vorgegebenen Last und somit die Geschwindigkeit, mit der die Einheit zusammengedrückt wird. Eine härtere Feder erzeugt weniger Bewegung und somit eine geringere Dämpfung.

Stoßdämpfer nehmen an Dämpferkraft ab, weil sich das Öl verschlechtert, Federscheiben sich setzen oder beim Durchschlagen Teile des Dämpfermechanismus beschädigt werden und die Dichtungen und Kolbenringe verschleifen. Viele der Wettbewerbsausführungen sind reparabel und können überholt werden, wenn ihre Leistungsfähigkeit abnimmt. Die meisten Spezialisten, die Federbeine überholen, haben einen Prüfstand, der die Dämpferkräfte messen und mit dem Neuzustand vergleichen kann. Einige Spezialisten bauen den Dämpfer mit engeren Spielen und ihren eigenen Dichtungen zusammen oder ändern die Ventile, um die Dämpfercharakteristik zu beeinflussen.

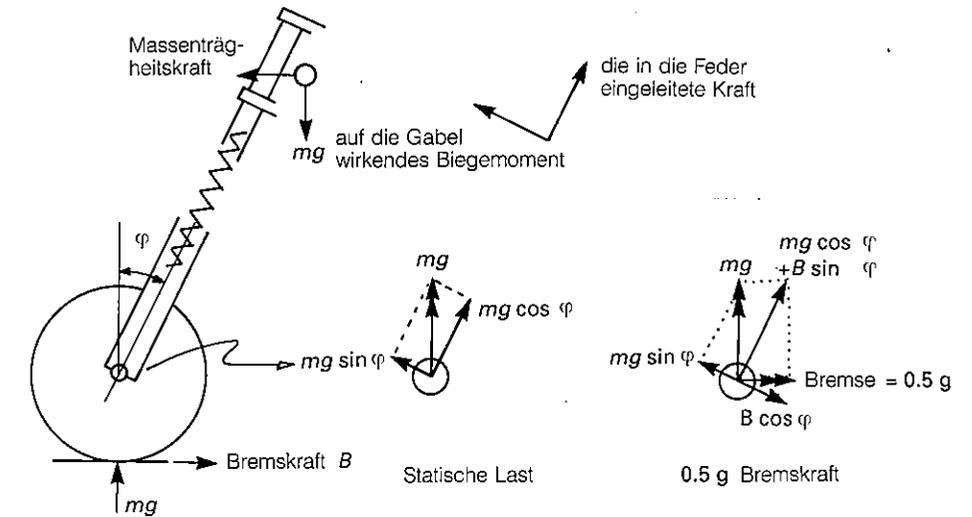
## Hebelumlenkungen

Federn aller Art arbeiten notwendigerweise auf Druck und Zug. Biege- und Torsionskräfte müssen von den Aufhängungsteilen, zum Beispiel in den Lagerbüchsen der Gleitrohre einer Teleskopgabel, aufgenommen werden. Die direkt in der Feder wirkende Kraft muß über Hebel auf die Radaufhängung übertragen werden, woraus sich die Möglichkeit ergibt, die Größe und den Weg der Federbewegung zu beeinflussen.

In erster Linie muß die Hebelumlenkung steif genug sein, um Antriebs- und Bremskräfte übertragen zu können. Zweitens kann sie den Federweg oder die Federkraft verstärken. Drittens kann die Umlenkung bei Einfedern der Radaufhängung die Federate ändern, so daß die Radaufhängung lastabhängig arbeitet.

Es gibt verschiedene Vorteile, die dadurch gewonnen werden. Erstens kann die Feder und der Dämpfer so montiert werden, daß minimale Auswirkungen auf die ungefederten Massen entstehen. Die ursprüngliche Konstruktion der Schwinge mit jeweils einem Federbein am Ende jedes Schwingenarms war denkbar ungünstig. Wenn man die Schwinge als Hebel benützt, der an seinem vorderen Ende die Hinterradfederung betätigt, muß nur eine Dämpfereinheit verwendet werden. Daher beträgt sein Weg, einschließlich der Massenträgheitskraft, die Hälfte bis ein Fünftel des Wegs von zwei Originalfederbeinen. Zweitens kann die Masse des Federbeins näher am Schwerpunkt untergebracht werden. Drittens kann der Betrag des Dämpferwegs variiert werden, um einen optimalen Bereich der Dämpferabstimmung zu erreichen. Wenn ein Dämpfer am Ende einer Schwinge mit 305 Millimeter Federweg angebracht wäre, müßte das Volumen im Dämpfer sehr groß sein. Es ist sehr schwierig, einen Dämpfer zu konstruieren, der nicht überhitzt oder dessen Öl keine Luft aufnimmt. Viertens erlaubt die Verwendung von Winkelhebeln zur Betätigung der

Schwinge einen viel breiteren Verstellbereich der Federbasis und Sitzhöhe und ein Ansteigen der Federrate (da man verschiedene Winkelhebel, verstellbare Zugstreben oder Hebel auf verstellbaren Exzentrern, usw. zusätzlich zur normalen Feder- und Dämpferverstellung am Federbein selbst verwenden kann).



**Abbildung 5.12** Die Kräfte in einem einzelnen Gabelbein müssen die Kraft  $mg$  und Bremskraft  $B$  aufnehmen. Die Resultierende der Kräfte in Richtung der Feder versucht sie zusammenzudrücken. Die Resultierende unter neunzig Grad zur Feder versucht, das Gabelbein in erster Linie durchzubiegen.

Ein Vergleich zwischen der Telegabel und der Schwinge zeigt, wie unterschiedlich sich die Last sogar in augenscheinlich ähnlichen Systemen auswirken kann. Betrachten wir ein einzelnes Gabelbein, das unter einem Winkel  $\varphi$  zur Vertikalen angeordnet ist und mit einer Radlast von  $W (= mg)$  beaufschlagt wird. Vergleichen Sie es mit einer Einarmschwinge, bei der das Federbein an der Achse ebenfalls unter einem Winkel zur Vertikalen montiert ist und ebenfalls eine Last  $W$  trägt.

Im Gabelbein ist die eingeleitete Kraft in der Feder  $W \cos \varphi$ , während das Gabelbein einer Biegekraft von  $W/\sin \varphi$  unterliegt (multipliziert mit der Länge des Beins). Während dem Bremsen wird die Bremskraft  $B$  teilweise in die Radaufhängung eingeleitet ( $B \sin \varphi$ ). Der andere Teil versucht, das Federbein durchzubiegen ( $B \cos \varphi$  in entgegengesetzter Richtung zum Biegemoment, das durch die Radlast verursacht wird). So kann, entgegen der landläufigen Meinung, während dem Bremsen weniger Biegemoment auf die Gabel wirken als wenn das Motorrad mit konstanter Geschwindigkeit fährt.

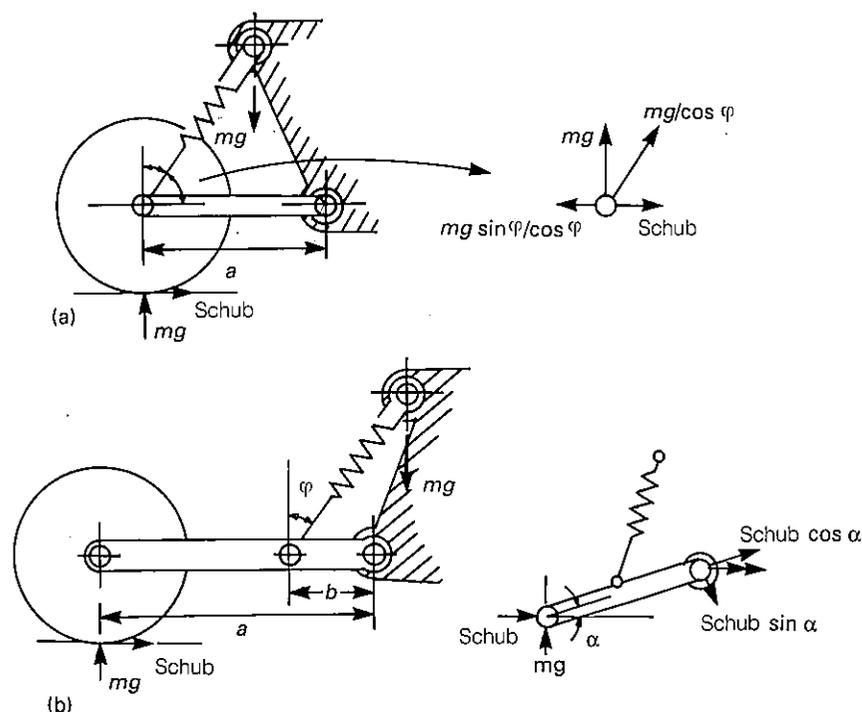
Die aufzuwendende Federkraft wird größer, wenn  $\varphi$  abnimmt. Sie ist immer kleiner als die Radlast  $W$ .

Eine Schwinge für Vorder- oder Hinterrad muß, selbst bei gleicher Fahrwerksgeometrie vollkommen andere Kräfte aufnehmen. Hier ist das Federbein in Lagern mit geringer Reibung angelenkt und kann daher nur axiale Kräfte aufnehmen. Kein Biegemoment kann daran angreifen. Das Rad wirkt auf den Schwingenarm, der als

Hebel fungiert. Hier ist die aufzuwendende Federkraft  $W/\cos \varphi$ , die ein Minimum erreicht, wenn  $\varphi = 0$  wird.

In das Fahrwerk eingeleitete Kräfte oder Momente (das Antriebsmoment am Hinterrad oder Bremsmoment am Vorderrad) werden alle in der Schwinge aufgenommen (oder beinahe alle, siehe Anti Squat, unten).

Je größer der Winkel  $\varphi$  ist, um so stärker muß die Feder sein (oder um so größer die Hebelumlenkung, auf die das Rad wirkt). Das steht im direkten Gegensatz zum Gabelbein, bei dem ein größerer Winkel bedeutet, daß ein höherer Anteil der Radlast das Gabelbein durchbiegen will und weniger Kraft in die Feder einleitet. Wenn die Telegabel einfedert, dreht sich das Motorrad um die Querachse. Der Winkel nimmt um ungefähr ein Grad für zirka 25 Zentimeter Einfederung ab. Das bedeutet, daß eine stärkere Feder nötig wäre. Es entsteht eine allerdings sehr geringe degressive Federrate (die vollkommen überlagert wird von der ansteigenden Rate, die durch den Luftdruck in der Gabel in der Realität auftritt).



**Abbildung 5.13 (a)** Die Kräfte in einer Radaufhängung mit Schwinge. Es wirken keine Biegekräfte auf das Federbein, aber die eingeleitete Kraft ist größer als die Gewichtskraft  $mg$ . Sie steigt weiter an, wenn der Winkel  $\varphi$  wächst (was geschieht, wenn die Radaufhängung einfedert). Schubkräfte müssen von der Schwinge aufgenommen werden. **(b)** Falls die Feder nicht in Nähe der Radachse montiert ist, entstehen zwar ähnliche Verhältnisse, nun wächst die Federkraft aber durch das Verhältnis  $a/b$  (der Federweg wird um denselben Faktor reduziert). Die Federkraft versucht außerdem, die Schwinge zu biegen. Falls die Schwinge nicht waagrecht steht, gibt es eine vertikale Komponente der Zugkraft, die an der Schwingenachse angreift. Sie kann, abhängig von der Richtung des Schubs (Beschleunigung oder Bremsung) und dem Winkel der Schwinge gegenüber der Horizontalen nach oben und unten (c), entweder mit oder gegen die Federkraft wirken.

## Hinterradaufhängung

Diese Matchless V4 von 1934 verwendete eine Dreiecksschwinge, um die Federn zu betätigen. Sie ist dem Mechanismus, der von Yamaha vierzig Jahre später angewendet wurde (d), ähnlich. Radaufhängungen wurden immer weiter verbessert. Die Suzuki RG 500 verwendet einen Kipphebel am oberen Ende und ein Gelenk unten, um die Feder beidseitig zusammenzudrücken. Honda entwickelte Einarmschwinge für ihre RVF-Rennmaschinen, später für die Serien-VFR 750 R (RC 30) und die VFR 400 R.

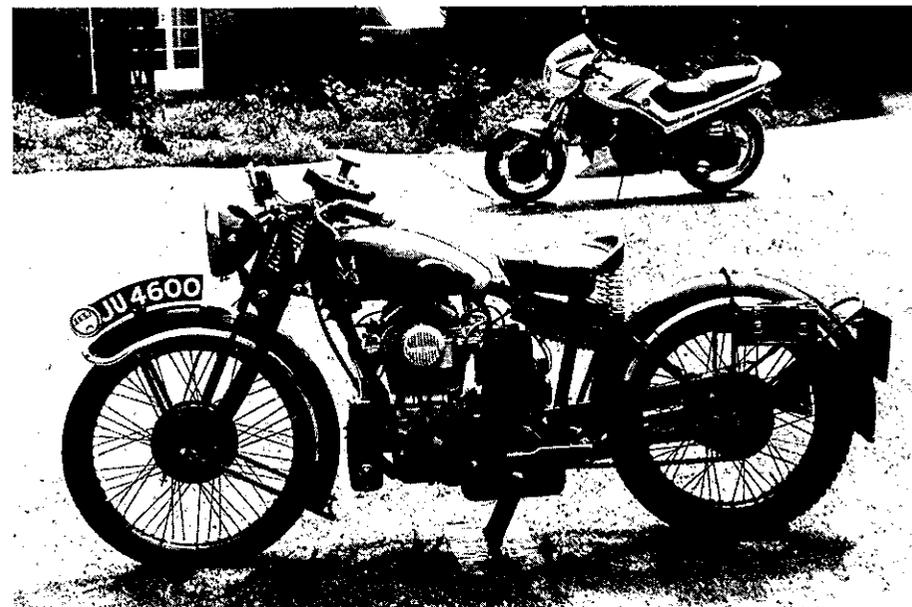


Abbildung 5.13 (c)

Wenn das Federbein zusammengedrückt wird, nimmt der Winkel  $\varphi$  und somit die aufzuwendende Federkraft ab. Das Rad hat nun gegenüber der Feder eine ungünstigere Hebelumlenkung, wodurch eine ansteigende Federrate entsteht. Der Schwingenarm ist zirka 400 Millimeter lang, so daß ungefähr 25 Millimeter Federweg eine Winkeländerung von drei bis vier Grad an der Schwinge (und am Federbein) bewirken.

Es gibt eine Möglichkeit, die Hebelumlenkung zu vergrößern (und den Federweg zu verringern, um ein geringeres Massenträgheitsmoment am Federbein zu erhalten), indem man das Federbein mit dem Abstand  $b$  von der Schwingenachse, im Verhältnis zum Abstand  $a$  für die Länge der Schwinge, versetzt anordnet.

Nun beträgt die aufzuwendende Federkraft  $Wa/b \cos \varphi$ . Wenn das Federbein auf halber Länge der Schwinge angelenkt wird (so daß  $a/b = 2$ ), ist die doppelte Federkraft erforderlich. Man beachte, daß dafür die vierfache Federrate gegenüber vorher nötig ist, da die Hebelumlenkung verdoppelt und der Federweg halbiert wurde.

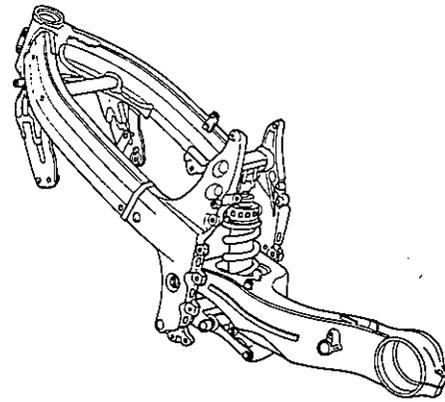
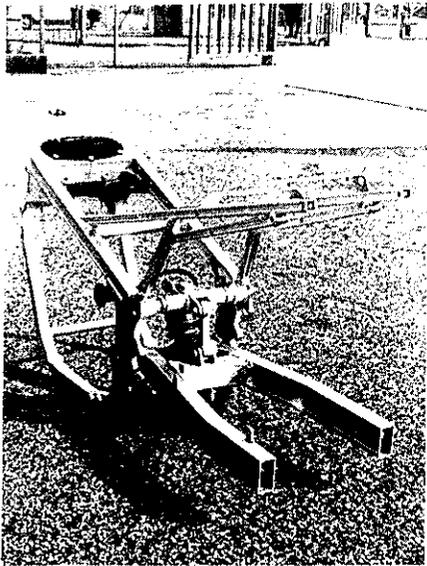


Abbildung 5.13 (d)

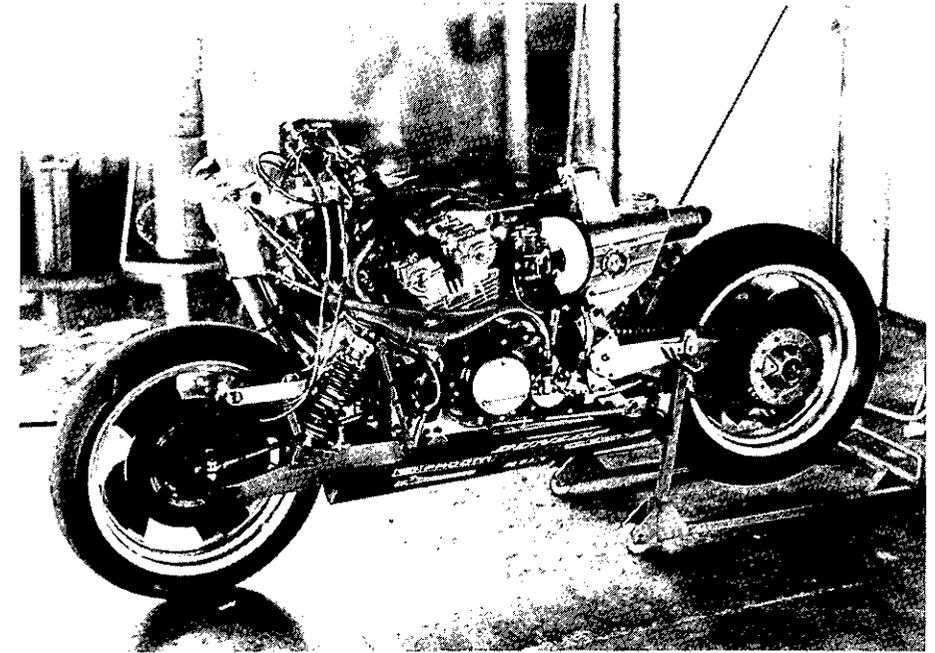
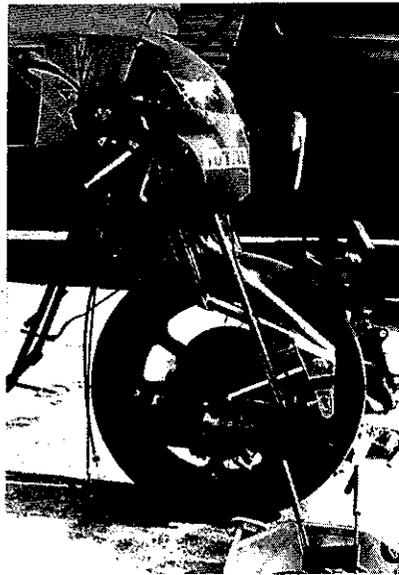


Abbildung 5.13 (f)



(e) Verschiedene Versuche, die ungefederten Massen der Teleskopgabel zu verringern, ihre Steifigkeit zu erhöhen oder Schubkräfte ohne Biegung einzuleiten. Die, von einem TZ 350-Motor angetriebene Rennmaschine von Eric Offenstadt benützte eine Gabel mit gezogener Schwinge (1976–78). (f) Verschiedene Elf-Konstruktionen zwischen 1978 und 1988 benützten Schwingenkonstruktionen am Vorderrad. Hier, im Falle einer früheren, von einem Honda RCB-Motor angetriebenen Endurance-Rennmaschine. (g) Der Bimota-Tesi-Prototyp der frühen 80er Jahre ging niemals in Produktion

Abbildung 5.13 (e)

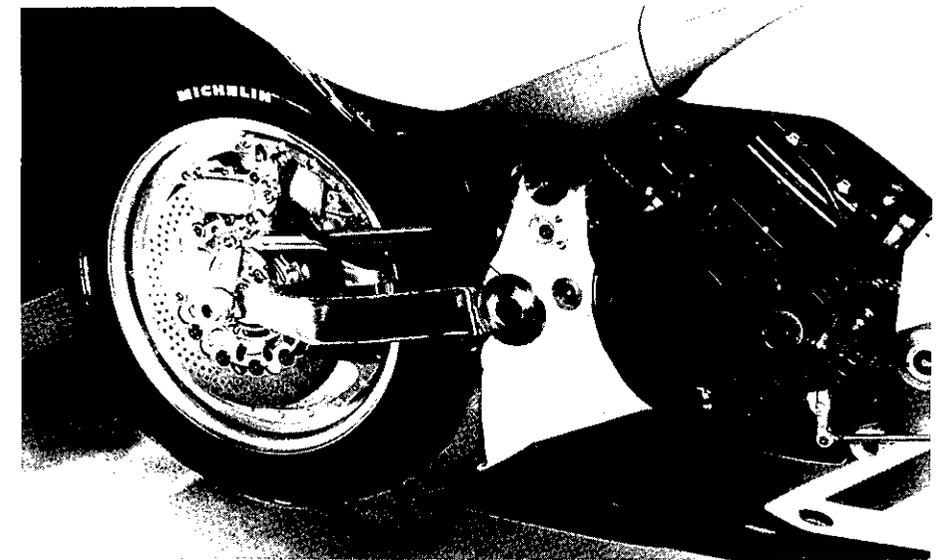


Abbildung 5.13 (g)

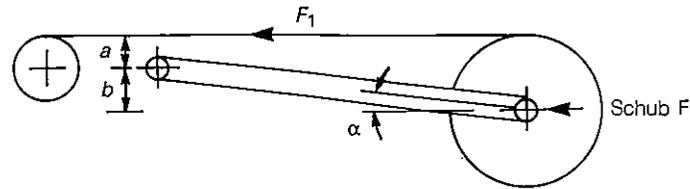


Abbildung 5.14 Anti-Squat-Drehmoment. Der Winkel der Schwinge und der Kettenlinie erzeugen ein Drehmoment ( $F_b - F_1 a$ ), das versucht, die Radaufhängung zusammenzudrücken.

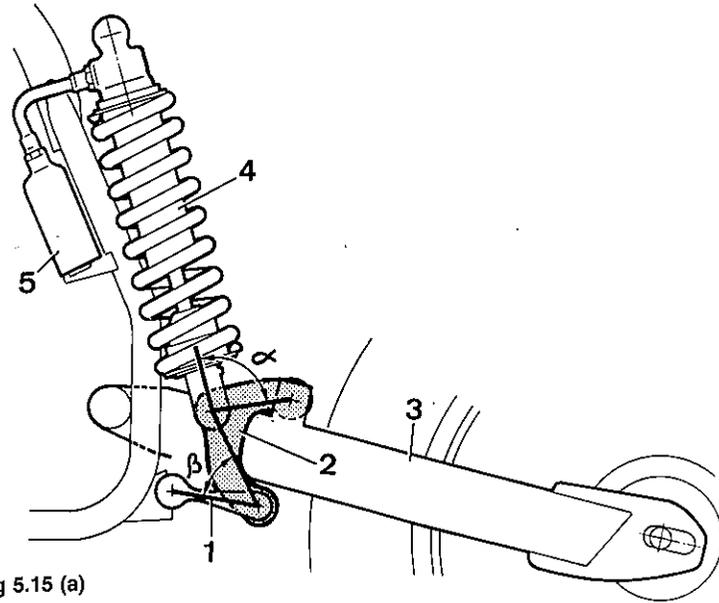


Abbildung 5.15 (a)

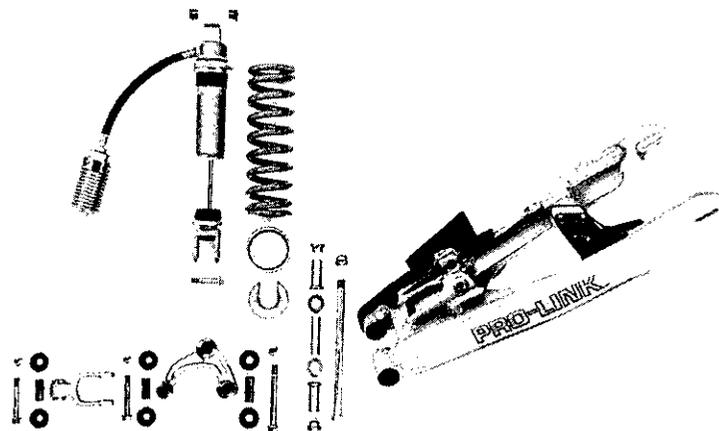


Abbildung 5.15 (b)

Abbildung 5.15 (a) und (b) die Entwicklung einer Radaufhängung mit steigender Federrate: Honda benützte einen Umlenk- (1) und einen Winkelhebel (2), um die Federkraft am Federbein (4) auf die Schwingenachse (3) zu übertragen (Honda).

Falls irgendetwas an der Hebelumlenkung geändert wird, so daß die notwendige Federkraft  $n$ -mal so hoch wie das Original ist, beträgt die notwendige Federrate das  $n$ -fache der ursprünglichen Rate. Der Weg, den die Feder zurücklegt, beträgt das  $1/n$ -fache des Originalwegs.

Dasselbe Prinzip kann bei Hebelumlenkungen für Monofederbeine angewendet werden, wie sie zum Beispiel bei Yamaha (Matchless, Vincent, usw.) in Serie waren. Es kommen auch noch komplizierte Hebelumlenkungen zur Anwendung. Allerdings wird es immer schwieriger, die Hebel und Winkel zu berechnen. Es ist einfacher, sie aus einer Zeichnung abzumessen.

Wenn die Hebelumlenkung anwächst, verringert sich der Federweg. Somit nimmt auch die Feder- und Dämpfergeschwindigkeit ab. Da sich die Dämpferkräfte proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit verhalten, muß der neue Dämpfer beträchtlich mehr Arbeit aufbringen. Falls eine längere oder kürzere Schwinge montiert wird, kann sich entweder die Hebelumlenkung, die Länge des Federbeins oder beides ändern. Die aufzubringende Federkraft muß das Gewicht an der Achse abstützen. Die Höhe, in der sich das Motorrad befindet, wird in der Regel als Sitzhöhe definiert (meist

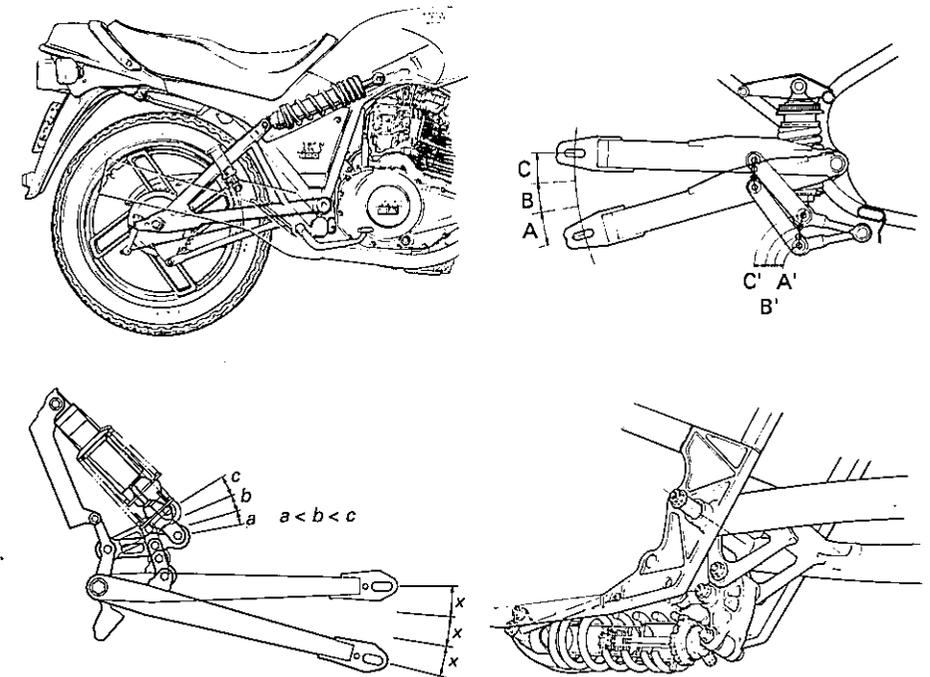


Abbildung 5.16 (a), (b), (c) und (d) Yamaha benützte ursprünglich eine einfache, aber sehr wirkungsvolle Hebelumlenkung, deren Nachteil der große Raumbedarf war. Darauf folgten Umlenkhebel an den Off-Road (TY 250)- und Straßenmotorrädern (RD 350 LC), um das Federbein vertikal hinter dem Motor zu platzieren. Bei der RD 500 LC war das Federbein horizontal unter dem Motor angebracht (Yamaha).

vereinfacht auf die zuverlässige Messung des Abstands zweier Punkte, von denen einer auf den gefederten, der andere auf den ungefederten Teilen des Motorrads angebracht ist, (siehe Kapitel 2). Die Kraft, die wirksam ist, resultiert aus der Vorspannung der Feder und der Federrate.

Die Vorspannung, also die in der Feder gespeicherte Last, ist die Kraft, die notwendig ist, um die Feder überhaupt zu bewegen. Falls die Vorspannung zu hoch ist, federn das Gewicht von Motorrad und Fahrer die Radaufhängung nicht weit genug ein (es steht nicht genügend Federweg zum Ausfedern zur Verfügung), folglich bewegt sich das Motorrad voll ausgefedert. Bei manchen Bedingungen, zum Beispiel Moto Cross oder im Endurobereich, lassen sich Motorräder auf schnellen, welligen Kursen auf diese Art besser fahren, da der gesamte Einfederweg nötig ist, um Bodenwellen oder Sprünge zu meistern, bei denen die Radaufhängung voll beansprucht wird.

Die Verstellung der Federbasis ist ein ebenso zuverlässiger Weg, die Sitzhöhe zu regeln. Er beeinflusst sowohl die Bodenfreiheit als auch die Lenkgeometrie. Bei einem üblichen Radstand von 1400 Millimetern bedeutet die Änderung von 25 Millimeter Sitzhöhe an dem einen oder anderen Rad eine Verschiebung des Schwerpunkts um zirka zwölf Millimeter. Der Lenkkopfwinkel ändert sich um zirka ein Grad (da der normal gebräuchliche Bereich bei 24 bis 30 Grad liegt, ist das ein ganz entscheidender Wert). Durch einen steiler stehenden Lenkkopf verringert sich auch der Nachlauf.

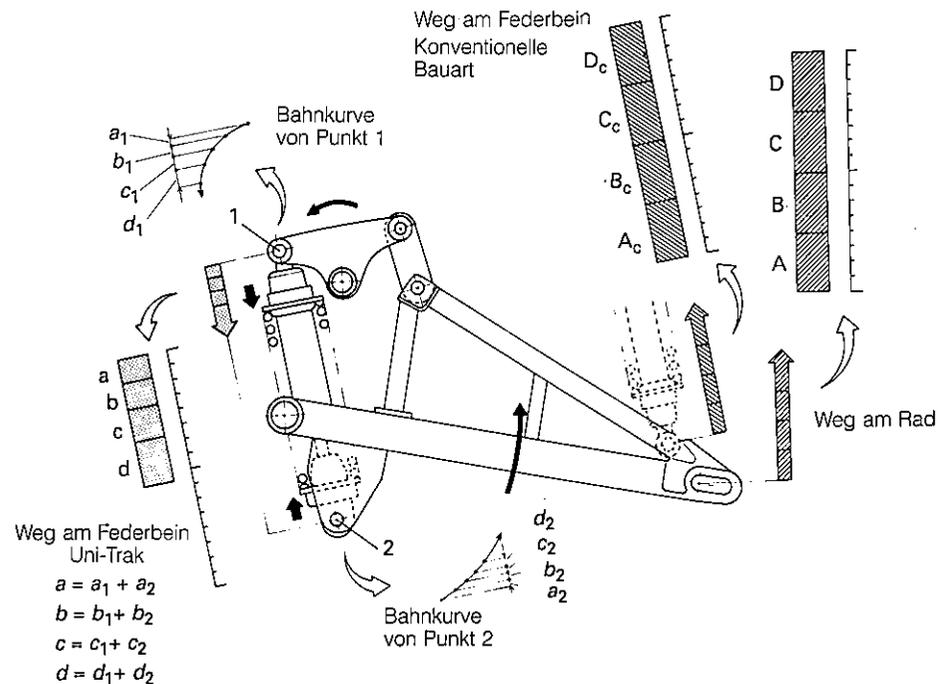


Abbildung 5.17 Kawasaki verwendete einen Kipphebelmechanismus an der ersten Uni-Trak-Umlenkung (Kawasaki).

Die Federrate ist die Kraft, die notwendig ist, um die Feder um eine Längeneinheit zusammenzudrücken. Die Ersatzfederrate am Rad gemessen ist die Kraft, die notwendig ist, um das Rad gegenüber dem Motorrad um eine Längeneinheit einzufedern. Falls das Verhältnis der Hebelumlenkung  $n$  ist (gemessen am Motorrad oder von einer Zeichnung abgenommen), kann man für die Feder annehmen:

$$\begin{aligned} \text{Federweg am Rad} &= n \times \text{Federweg} \\ \text{Kraft in der Feder} &= n \times \text{Radlast} \\ \text{Federrate} &= n^2 \times \text{Federrate am Rad} \\ \text{Dämpfergeschwindigkeit} &= (\text{vertikale})\text{Radgeschwindigkeit}/n \end{aligned}$$

Falls die Last auf zwei parallel angeordnete Federn aufgeteilt wird, halbieren sich Federkraft und Federrate. Die Dämpfergeschwindigkeit hängt von der Massenträgheitskraft, reduziert durch den Faktor  $n$  ab, die Dämpferkraft nimmt um den Faktor  $n$  ab. Das ist auf jede Hebelumlenkung anzuwenden. Bei manchen Umlenkungen ändert sich der Faktor  $n$  allerdings, wenn die Radaufhängung einfedert.

Falls die Radlast und die Federvorspannung bekannt sind, kann die statische Lage der Radaufhängung aus der Federrate und dem Hebelverhältnis  $n$  errechnet werden.

## Anti-Dive-Systeme

Die Radlaständerung beim Bremsen verursacht ein Einfedern der Vorderradaufhängung. Sie ändert die Höhe des Motorrads. Falls diese Bewegung schnell genug vor sich geht, ist sie sehr schwierig zu handhaben. Durch Anti-Dive-Systeme können zwei

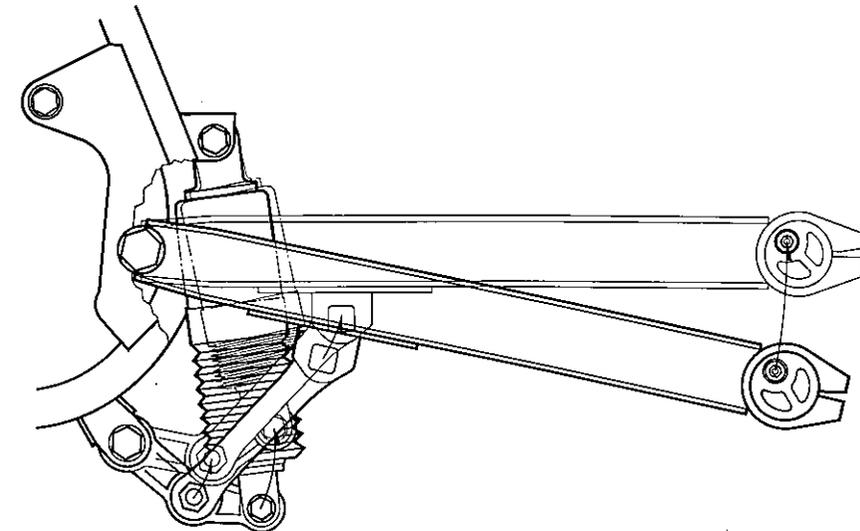


Abbildung 5.18 Ein anderes Kawasaki-Radaufhängungssystem mit einer umgedrehten Hebel-Winkelhebel-Konstruktion (Kawasaki).

Vorteile erreicht werden. Das Erhöhen der Druckstufendämpfung während dem Bremsen verringert das Tauchen. Durch Regeln der Schwerpunktshöhe während dem Bremsen kann ein optimaler Kraftschluß erzielt werden. Beide Aspekte sind detailliert in Kapitel 6 beschrieben.

1. Falls ein Motorrad beim Bremsen das Hinterrad abhebt, wäre ein stärkeres Eintauchen von Nutzen.
2. Falls das Vorderrad eines Motorrads zum Blockieren neigt oder die übertragbare Bremskraft deutlich zunimmt, wenn die Hinterradbremse mitbenützt wird, ist ein geringeres Eintauchen erwünscht. In der Regel ist Bedingung eins bei trockener, Bedingung zwei bei nasser Straße anzutreffen.

## Anti-Squat-Aufhängung

Während der Beschleunigung kann das gesamte Gewicht des Motorrads auf das Hinterrad verlagert werden. Die Radaufhängung muß in der Lage sein, diese Last aufzunehmen um die Höhe des Schwerpunkts so zu erhalten, daß maximaler Kraftschluß gegeben ist. Falls die Schwerpunktshöhe zu gering ist, dreht das Rad zu leicht durch. Falls sie zu groß ist, überschlägt sich das Motorrad zu leicht.

Wenn die übertragbare Kraft zwischen Reifen und Straße  $F$  ist, erreicht sie ein Maximum bei  $F_{max} = W_r \mu$ , wobei  $W_r$  die Radlast am Hinterrad und  $\mu$  der Kraftschlußbeiwert, zwischen Reifen und Straße ist. Falls  $F$  diesen Wert übersteigt, dreht das Rad durch. Bei einer Geschwindigkeit  $v$  in km/h und der entsprechenden Leistung in PS ist die Kraft am Reifen  $F = 600 \text{ PS}/v$ .

Bis zum Durchdrehen des Rades ist  $F$  die Kraft, die das Motorrad beschleunigt und ein Drehmoment  $Fy$  erzeugt, bei dem  $y$  die Höhe des Schwerpunkts ist, die versucht, ein Wheelie des Motorrads zu erzeugen. Dem entgegengesetzt wirkt die Gewichtskraft des Motorrads  $mg$ , welche ein maximales Moment  $mgx$  um das Hinterrad erzeugt, wobei  $x$  der Abstand des Schwerpunkts von der vorderen Reifenaufstandsfläche ist. Dieser Wert wird erreicht, wenn das gesamte Gewicht auf dem Vorderrad lastet (in diesem Fall ist  $W_r = mg$ ).

Falls  $Fy > mgx$  ist, führt das Motorrad einen Wheelie aus.

Falls  $F > F_{max}$  ist, dreht das Hinterrad durch.

Die Radlaständerung am Hinterrad wird vorgegeben durch  $W_r$ :

$$W_r = mg + Fy/w - mgx/w$$

wobei  $w$  der Radstand ist. Deshalb ergibt sich:

$$W_r = mg, \text{ wenn } Fy = mgx$$

Aus der Radlast kann die Kraft der Hinterradfeder errechnet werden, falls das Hebelverhältnis  $n$  ist. (siehe oben):

$$\text{Kraft an der Feder} = W_r n$$

$$\text{Federweg} = (P - W_r n) / s \text{ (gesamt)}$$

$$= (W_r - W_{r0}) / n s \text{ (Änderung der statischen Federlänge),}$$

wobei  $P$  die Vorspannung,  $s$  die Federrate und  $W_{r0}$  die statische Hinterradlast ist.

Das ist eine erste Annäherung, da die Einfederung die Schwerpunktshöhe geringfügig absenkt, was sich wiederum auf die Berechnung auswirkt, obwohl die Ausfederung der vorderen Feder den Schwerpunkt leicht anhebt. Es existiert außerdem ein untergeordnetes Drehmoment, welches das Überschlagsmoment verstärkt. Es ist in dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Es entsteht dadurch, daß das Hinterrad eine Winkelbeschleunigung erfährt. Das Rad neigt dazu, stehen zu bleiben und das Motorrad zu drehen. Das Massenträgheitsmoment des Rads verhält sich proportional zur Massenträgheitskraft des Motorrads und zur Größe der Beschleunigung. Es neigt dazu, die Front des Motorrads anzuheben, wenn der Gasgriff geöffnet wird, während das Vorderrad leicht wird und den Bodenkontakt verliert. Es gibt noch eine weitere Kraft, die versucht, den Federweg zu ändern. Sie kann bewußt genutzt werden, um das Eintauchen während der Beschleunigung zu verhindern. Sie wird dadurch

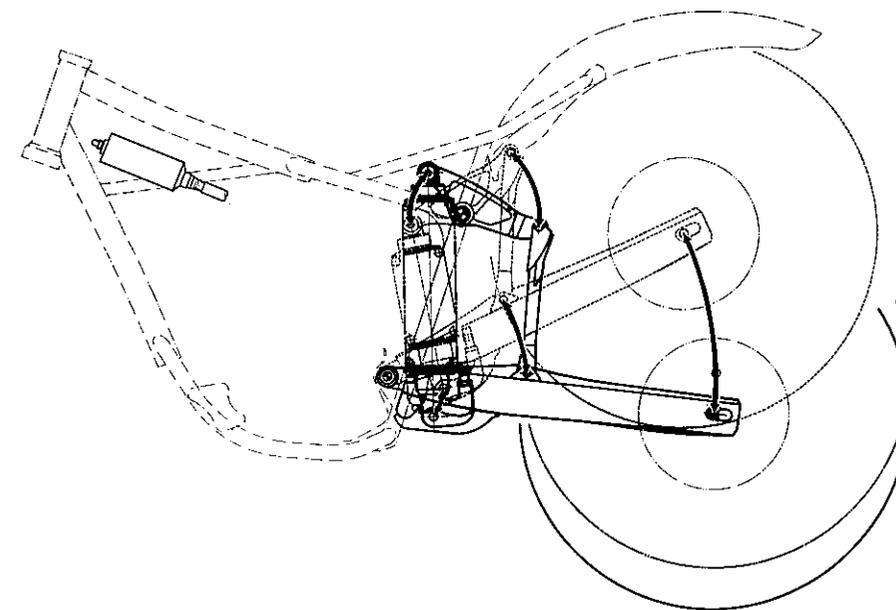


Abbildung 5.19 Suzuki's Full Floater nutzt ein unteres Gelenk und einen Kipphebel am oberen Ende, um die Feder beidseitig zusammenzudrücken (Suzuki).

verursacht, daß die Schwinge nicht parallel zum Boden steht, während die Zugkraft zwischen Reifen und Straße horizontal verläuft. Die Radlager können nur eine horizontale Kraft auf die Schwingenachse und die Schwinge übertragen. Wenn aber die Schwinge nicht eben steht, erzeugt die Zugkraft ein Moment  $F_b$ , wobei  $b$  die Höhe der Schwingenachse über der Radachse ist.

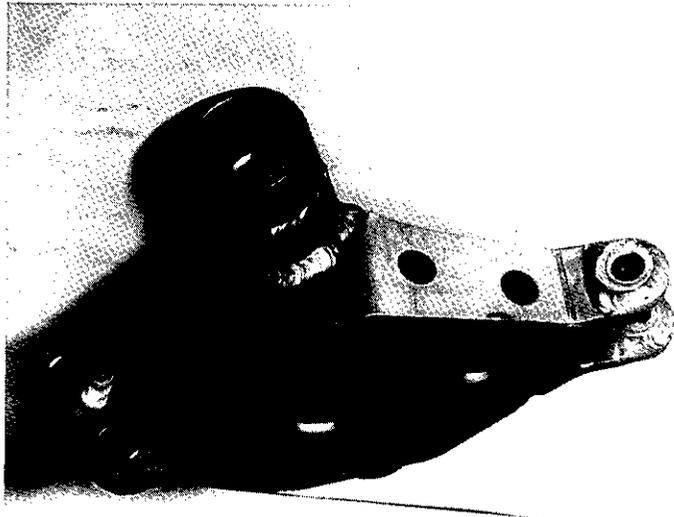


Abbildung 5.20 Rennmaschinen verfügen über Umlenk- und Kipphebel, um die Sitzhöhe und die Hebelumlenkung für die Feder einstellen zu können.

Falls die Schwingenachse höher als die Radachse liegt, versucht das Moment  $F_b$ , das Motorrad anzuheben und die Hinterradaufhängung auseinanderzudrücken. Gleichzeitig erzeugt der Kettenzug ein ähnliches, aber entgegengerichtetes Moment  $F_1 a$ , wobei  $F_1$  die Kraft in der Kette und  $a$  der Abstand zwischen Kette und Schwingenachse ist. Tatsächlich bildet die Schwinge und das Ritzel einen Übertotpunktmechanismus. Wenn alle drei Mittelpunkte in einer Linie liegen, ist die Kette am stärksten gespannt. Wenn das Rad höher oder tiefer steht, versucht die Kette es weiter zu verschieben (siehe Abbildung 5.14).

Diese Kräfte erzeugen ein Drehmoment im Schwingarm:

$$\text{Anti-Squat-Drehmoment} = F_b - F_1 a$$

$$\text{und } F_1 = F d_2 / d_1$$

wobei  $d_1$  und  $d_2$  die Durchmesser des Kettenrads und des Hinterradreifens sind. Das Drehmoment in der Schwinge, geteilt durch die Länge der Schwinge ( $L$ ), ist einer Kraft gleichbedeutend, die an der Achse wirkt. Multipliziert man diese mit dem Hebelverhältnis  $n$ , ergibt sich die äquivalente Kraft an der Federeinheit.

$$\text{Anti-Squat-Kraft an der Feder} = (F_b - F_1 a) n / L$$

Daraus ergibt sich die gesamte Kraft an der Feder mit

$$W_r n - (F_b - F_1 a) n / L$$

Das tritt auch ohne Kettenzug auf, das heißt  $F_1 a = 0$ , wie zum Beispiel im Fall des Kardanantriebs der BMW-Boxer, bei denen während der Beschleunigung starke Anti-Squat-Kräfte erzeugt werden.

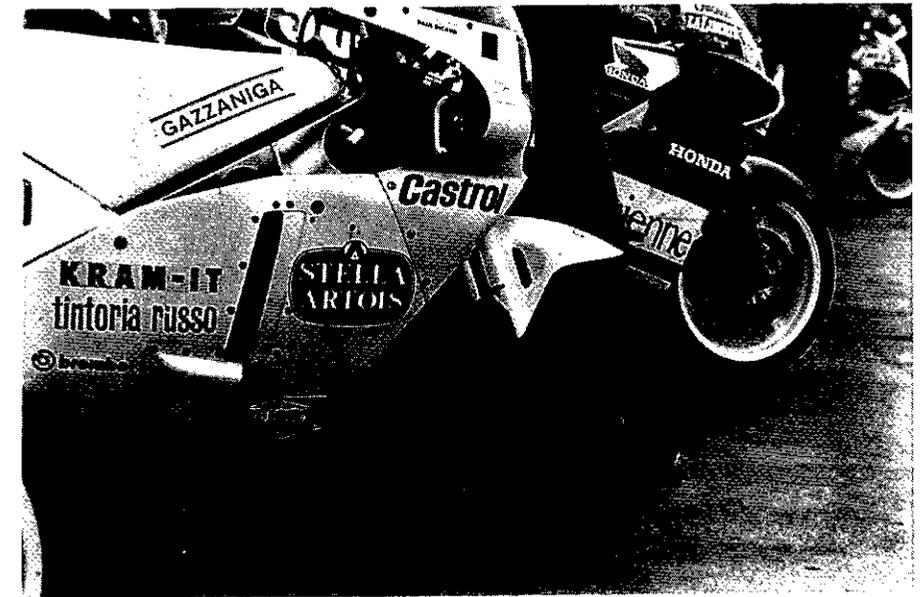


Abbildung 5.21 1987/88 tauchten Upside-Down-Gabeln mit leichten Gleitrohren unten und schwereren Standrohren mit dem Dämpfermechanismus oben auf. Kohlefaserbremssscheiben und Verbundräder verringerten zusätzlich die ungefederten Massen.

Die Federkraft kann nun genutzt werden, um die Federbewegung und die Höhe des Schwerpunkts während dem Beschleunigen zu beeinflussen. Die Federrate, die Federvorspannung und das Anti-Squat-Moment können so aufgeteilt werden, daß die Lage des Schwerpunkts einen maximalen Kraftschluß ergibt. Ein Rechenprogramm (ähnlich dem im Anhang, das eine Berechnung für die maximale Bremskraft durchführt), ist wahrscheinlich am sinnvollsten.

Der maximale Kraftschluß tritt dann auf, wenn:

$$f = mgx/y \text{ (beginnendes Wheelie) und}$$

$$F = mg\mu$$

(der Punkt, an dem das Hinterrad durchzudrehen beginnt und das Gesamtgewicht auf der Hinterachse ruht), das bedeutet:

$$x/y = \mu$$

So muß bei Bedingungen, bei denen  $\mu = 1$  ist (Renn- oder Sportreifen auf einer griffigen Fahrbahn), die Höhe des Schwerpunkts gleich dem Abstand zur Hinterradachse sein. Wenn  $\mu = 0,5$  ist (zum Beispiel bei nasser Straße), muß die Lage des Schwerpunkts nach hinten verlagert oder angehoben werden, bis seine Höhe den zweifachen horizontalen Abstand zur Hinterradachse ausmacht. Falls Tests eine Neigung zum Durchdrehen des Rads ergeben, sollte der Schwerpunkt angehoben oder nach rückwärts verlagert werden und eine stärkere Anti-Squat-Tendenz vorgesehen werden. Falls das Motorrad während der Beschleunigung zum Wheelie neigt, sollte die Lage des Schwerpunkts abgesenkt, nach vorn verschoben und oder eine geringere Anti-Squat-Wirkung benützt werden.

Die Anforderungen an bestmöglichen Kraftschluß sind nicht mit denen für optimales Bremsen vereinbar (siehe Kapitel 6). In diesem Fall ist es notwendig zu entscheiden, was wichtiger ist – einen Kompromiß zu schließen oder das Motorrad so zu konstruieren, daß der Fahrer sein Gewicht weit genug nach vorn und hinten verlagern kann, um die Lage des Schwerpunkts wie erforderlich zu verschieben. Durch eine Änderung des Radstands können vielleicht beide Anforderungen erreicht werden.

# Bremsen

Bremsen gehören zu den einfachsten Konstruktionselementen am Motorrad. In mancher Beziehung sind sie aber dessen leistungsfähigstes Teil. Falls ein Motorrad auf 190 km/h innerhalb von 400 Metern beschleunigen kann, ist es in der Lage, in weniger als der halben Entfernung abzubremsen. Versuche zeigten, daß die meisten Motorräder bei geringeren Geschwindigkeiten mit ungefähr einem g verzögern können. Das bedeutet, daß die Bremsen eine Kraft erzeugen müssen, die der Gewichtskraft des Motorrads entspricht. Sie wird selbstverständlich durch die Reifenhaftung begrenzt. Die Bremsen könnten oft noch weit mehr leisten.

Die Bremsen wandeln kinetische Energie in Wärme um. Ein Blick auf das Niveau der kinetischen Energie zeigt, was sie leisten müssen. Sie ist definiert durch die Hälfte der Gesamtmasse, multipliziert mit dem Quadrat seiner Geschwindigkeit  $0,5 mv^2$ . Betrachtet man eine Honda GL 1500 Gold Wing mit dem fahrfertigen Gewicht von üppigen 576 Kilogramm und eine Honda RS 250 mit einem möglichen rennfertigen Gewicht von 154 Kilogramm, beide inklusive Fahrer, dann zeigt Tabelle 6.1, was die Bremsen leisten müssen.

**Tabelle 6.1** Vergleich der kinetischen Energie

Motorrad	Masse kg	Geschwindigkeit v km/h	m/s	$v^2$ $m^2/s^2$	$1/2 mv^2$ Nm
GL 1500	576	88	24,4	598	172 224
RS 250	154	170	47,2	2230	171 710
GL 1500	576	170	47,2	2230	642 240
RS 250	154	326	90,6	8200	631 400

Die letzte Spalte gibt die kinetische Energie  $1/2mv^2$  und ihre Einheit Nm, dieselbe Einheit, die das Drehmoment hat, wieder. Beginnen wir mit der Gold Wing, die mit 88 Kilometern der Geschwindigkeitsbegrenzung in den USA dahinrollt. Das sind 24,4 Meter pro Sekunde. Das ergibt im Quadrat  $598 m^2/s^2$ , multipliziert mit der halben Masse des Motorrads ergibt sich eine Energie von 172.224 Nm. (Das Massenträgheitsmoment der rotierenden Teile sollte ebenfalls in die Masse der Maschine miteinbezogen werden. Sie läßt die Masse abhängig von der Geschwindigkeit größer erscheinen). Um ungefähr dasselbe Energieniveau zu erreichen, muß die

Honda RS 250 bereits 170 km/h schnell fahren. Anders ausgedrückt, vernichtet die Honda Gold Wing bei 88 km/h ungefähr soviel Energie wie die Honda RS 250 aus 170 km/h.

Wenn die Gold Wing nun auf 170 km/h beschleunigt, hat sie bei gleicher Geschwindigkeit mehr als die vierfache Energie gegenüber der RS. Falls sie aus dieser Geschwindigkeit in fünf Sekunden anhält (was einer Verzögerung von  $9,45 \text{ m/s}^2$ , also nahezu einem  $g$  entspricht und die halbe Zeit bedeutet, die sie braucht, um auf diese Geschwindigkeit zu beschleunigen, können wir die Leistung abschätzen, die die Bremsen entwickeln. Leistung ist die Arbeit pro Zeiteinheit. 1 PS ist definiert als  $75 \text{ kp m/s}$ , so daß die Bremsen fünf Sekunden lang pro Sekunde  $34445 \text{ kp m/s}$  umwandeln. Das entspricht einer Leistung von 47 PS für die RS 250 Bremsen. Tatsächlich wird nicht die gesamte Bremsleistung als Wärme über die Bremsen abgeführt, da der Luft- und Rollwiderstand mit dazu beitragen. Dieselbe Berechnung für die Gold Wing zeigt, daß 172 PS nötig sind, um dieselbe Verzögerung zu erreichen.

Die Bremskraft wird in der Scheibe oder Trommel erzeugt und vom Reifen übertragen. Das Rad wirkt dabei wie ein Hebel. Wenn die Trommeln oder Scheiben den halben Radius des Rads haben, steht nur die halbe Kraft der Bremsscheibe am Reifen zur Verfügung. Anders ausgedrückt, muß jedes Newton Kraft, das am Reifen wirkt, an der Bremse aufgebracht werden. Falls nun die Scheibe oder die Trommel denselben Durchmesser wie der Reifen erreichen könnten, würde dieses Verhältnis eins zu eins anstatt zwei zu eins werden. Daraus ist die Wirkungsweise von kleinen Rädern und großen Scheiben ersichtlich. Die großen Kräfte, die an der Scheibe entstehen, erfordern vom Fahrer einen hohen Grad an Gefühl und Erfahrung, um sie dosieren zu können.

Es gibt viele Variable, die dieses feinfühliges Gleichgewicht von Bremskraft und Verzögerung beeinflussen, wie Tabelle 6.2 zeigt.

Im allgemeinen ist die Kraft, die auf den Bremshebel oder das Bremspedal ausgeübt wird, dazu da, die Flüssigkeit unter Druck zu setzen (oder einen Seilzug zu betätigen).

Der daraus resultierende Druck wird benützt, um die Reibwerkstoffe der Bremsen gegen einen sich drehenden Rotor, entweder eine Scheibe oder eine Trommel, zu drücken. Es entsteht ein gewisser Betrag der Verformung, den wir als Gefühl registrieren. Falls zuviel oder zu wenig davon vorhanden ist, ist es schwierig, die Bremse zu dosieren. Sie fühlt sich entweder zu weich oder zu hart an.

Außerdem entsteht eine Gewichtsverlagerung. Die Bremskraft wirkt der Bewegung des Fahrzeugs entgegen. Die Massenträgheitskraft von Motorrad und Fahrer versuchen, mit gleicher Geschwindigkeit weiterzufahren. Wenn das Motorrad heruntergebremst wird, nimmt der Fahrer das als eine, ihm entgegengesetzte Bewegung wahr. Er wird nach vorne gegen das Motorrad gedrückt. Die Massenträgheitskraft des Motorrads wirkt in einer ähnlichen Art. Sie greift im Schwerpunkt an, der in etwa 630 bis 760 Millimeter über der Fahrbahn liegt, während die Bremskraft in der Reifenaufstandsfläche, also direkt auf der Fahrbahn, angreift. Daraus entsteht ein Moment, das versucht, das Motorrad um das Vorderrad zu drehen. Je höher diese Kraft und die Lage des Schwerpunkts ist, um so größer fällt auch das Drehmoment aus.

Die erste Auswirkung besteht darin, daß sich das Gewicht des Fahrers nach vorn auf den Lenker ebenso wie das Gewicht des Motorrads nach vorn verlagert, wodurch

**Tabelle 6.2** Bremsenbauteile

Teil	Auswirkung auf die Bremse andere Auswirkungen	
Rad- und Bremsscheibendurchmesser	Drehmoment Reibgeschwindigkeit	ungefederte Massen Massenträgheitsmoment
Scheibenwerkstoff	Reibung, Verschleiß Wärmeableitung	ungefederte Massen
Belagwerkstoff	Verschleiß, Wärmeableitung	ungefederte Masse
Belaggröße	spezifischer Druck Verschleiß	
Bremszange	Kraft auf den Belag hydraulische Übersetzung	ungefederte Masse
Hauptbremszylinder	hydraulische Übersetzung, (Handkraft/ Bremskraft)	Massenträgheit um den Lenkkopf, Gefahr der Beschädigung
Bremsleitungen	Verformung unter Druck »Gefühl«	Radaufhängung, Lenkeinschlag

die Radaufhängung einfedert (Tauchen). Der Fahrer spürt die Kraft zum Abstützen und das Tauchen. Falls dies in Abhängigkeit zum Druck am Bremshebel variiert, fühlen sich die Bremsen progressiv an. Falls eine wahrnehmbare Bewegung am Hebel stattfindet, wenn er härter gezogen wird, obwohl der Widerstand gegen diesen Druck anwächst, dann hat die Bremse eine berechenbare Dosierung. Der Fahrer kann voraussehen, was demnächst passiert.

Die zweite Auswirkung ist die, daß sich das Gewicht auf das Vorderrad verlagert und somit das Hinterrad entlastet wird. Der Kraftschluß am Vorderrad erhöht sich, während er am Hinterrad abnimmt. Wenn der Bremsdruck in der Vorderradbremse ständig erhöht wird, wächst auch die Verzögerung und somit die Gewichtsverlagerung. Eines von zwei Dingen kann im Grenzfall passieren. Entweder das Vorderrad blockiert und rutscht oder es baut weiter Haftung auf bis das Motorrad auf dem Vorderrad steht und das Hinterrad vom Boden abhebt. Es hängt vom Betrag des Kraftschlußbeiwerts zwischen Reifen und Straße, der Schwerpunktshöhe und dem Gewicht des Motorrads ab. Es gibt ein Rechenprogramm, das im Anhang ausgedruckt ist. Es rechnet die verschiedenen Kombinationen durch, sagt Blockieren oder Abheben des Hinterrads voraus und schlägt die optimale Geometrie für die höchstmögliche Verzögerung vor.

Um zu sehen, wie das System in den Einzelheiten arbeitet und wie es verbessert werden kann, ist es notwendig, der Reihenfolge nach Punkt für Punkt, angefangen beim Bremshebel bis zu den Bremsbelägen und Reifen, wie in Abbildung 6.2 gezeigt, durchzugehen.

## 1. Hebel

Die Kraft  $P$  wird von der Fahrerhand oder dem Fuß am Bremspedal ausgeübt. Die genaue Lage des Hebelarms ( $x$ ) ändert sich mit der Position der Hand und dadurch, wieviel Finger benutzt werden. Die Kraft  $F_1$  wird im Hauptbremszylinder oder im Bremszug gespeichert. Somit ist:

$$F_1 = Px/y$$

$F$  steigt durch Vergrößerung von  $P$ , durch stärkeres Ziehen (oder Verändern des Hebels so, daß es leichter ist, mehr Kraft auf ihn auszuüben), durch die Vergrößerung von  $x$  oder die Verringerung von  $y$  an. Man beachte, daß die Abmessungen  $x$  und  $y$  im rechten Winkel zu der Wirkungslinie der Bremskraft angreifen und sich mit dem Hebelarm der Hebel ändert. Gibt man dem Fahrer einen größeren Hebelarm, ist das eine einfache Art, die gesamte Bremskraft zu erhöhen. Daraus resultiert allerdings auch mehr Weg, falls zum Beispiel die Hand weiter außen angreift.

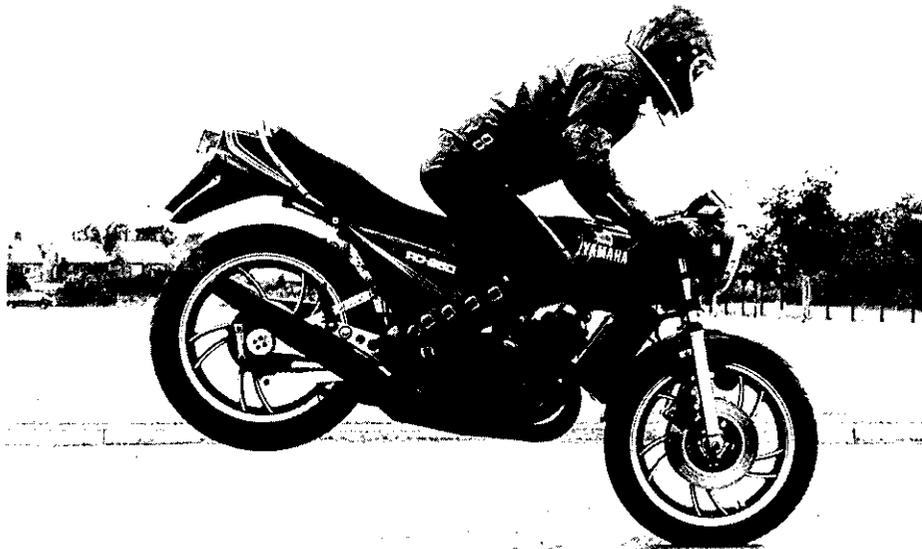


Abbildung 6.1 Ein rechtsdrehendes Drehmoment erhöht die Last am Vorderrad und verringert sie am Hinterrad.

Der Hebel kann gekrümmt sein, um einen komfortableren Griff zu erzielen (oder um eine eindeutige Griffposition zu erreichen). Oft gibt es eine Verstellmöglichkeit am Hebel. Sie sollte so vorgenommen werden, daß der Fahrer seine Finger schnell um den Hebel legen kann und diese einen natürlichen Winkel mit der Hand und dem Handgelenk bilden. Außerdem sollte er in der Lage sein, den Gasgriff unter Kontrolle zu haben, wenn er vollen Druck auf die Bremse ausübt.

Der Hebel sollte nicht weiter abstehen als die Reichweite des kleinen Fingers beträgt. Es ist günstig, den Hebel so weit wie möglich nach innen zu verlegen, um bei einem Zusammenstoß oder einer Kollision mit einem anderen Fahrer seine Beschädigung zu vermeiden (wobei die Bremse betätigt oder der Hebel beschädigt werden

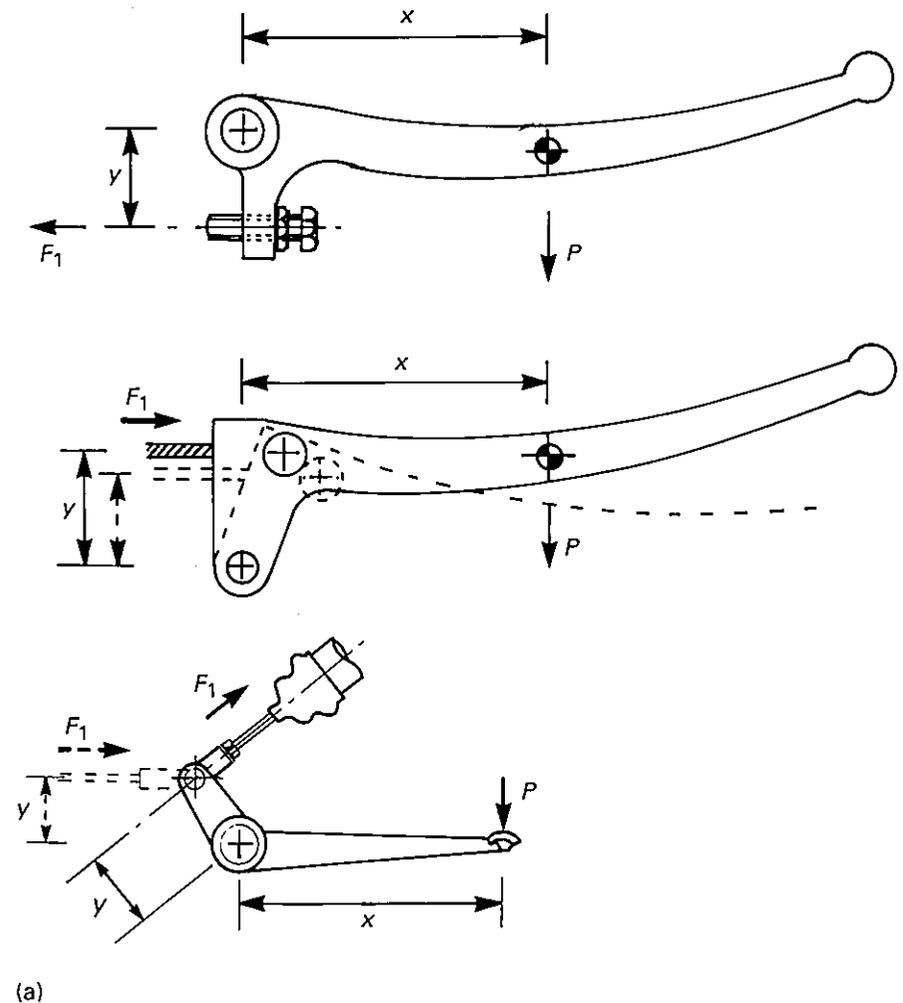


Abbildung 6.2 (a) Hebel- und Pedalabmessungen . Bezeichnungen, siehe Text

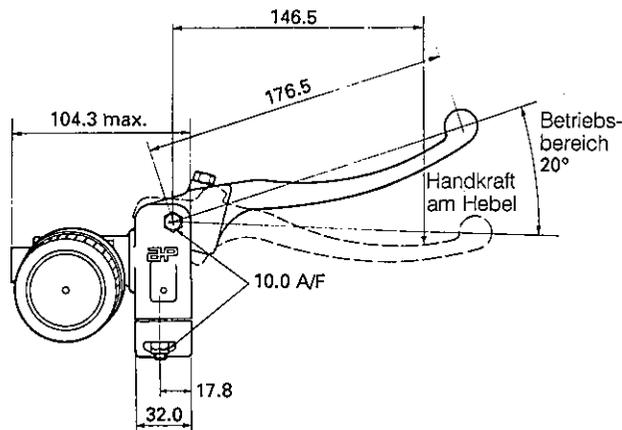
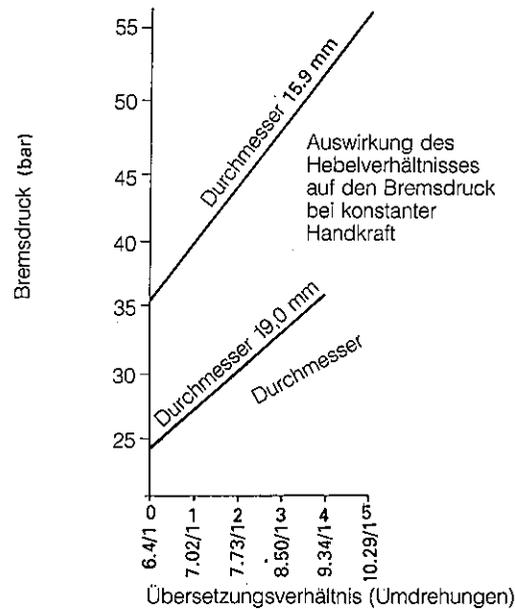
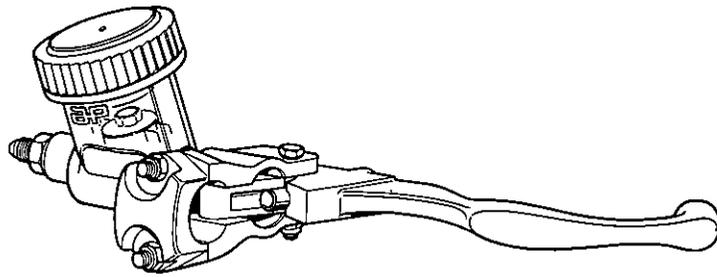


Abbildung 6.2 (b) AP-Racing stellt einen verstellbaren Hebel her, der dem Fahrer einen großen Verstellbereich bei einer festgelegten Handkraft zuordnet (Automotive Products).

könnte). Der Hebel sollte sich auf dem Lenker verdrehen können, bevor er sich verbiegt oder abbricht. Da die Klemmschraube nicht voll angezogen wird, muß sie gesichert werden.

Es ist äußerst wichtig daß der Hebel, der Bolzen, um den er sich dreht, und der Hauptbremszylinder beziehungsweise der Bremszylinder miteinander fest verschraubt sind. Jegliche Nachgiebigkeit wirkt sich als überflüssiges Spiel und Elastizität im Hebel aus.

Ein weiteres Problem besteht darin, daß der Hebel bei voller Bremsung bis an den Lenker heranreicht. Obwohl dies nicht durch Luft im Hydrauliksystem oder Dampfblasenbildung, aufgrund siedender Flüssigkeit verursacht wird. BMW K 100- Modelle leiden unter diesem Problem. Die Bremsen arbeiten bei normalen Verzögerungen sehr gut, haben aber bei einer Vollbremsung zu viel Hebelweg. Ein Grund kann der Mangel an Steifigkeit in den Bremsleitungen (oder in einem Bremszug oder Gelenk) sein. In diesem Falle werden Bauteile mit höherer Festigkeit benötigt (siehe Bremsleitungen unten). Hydraulische Bremsen stellen sich selbst nach, was bei den meisten seilzugbetätigten Bremsen nicht der Fall ist. Es kann zuviel Spiel durch eine verschlissene Scheibe oder durch zu schwergängige Gummidichtungen auftreten (siehe Bremszylinder, unten). Falls durch Einstellarbeiten dieses Problem nicht gelöst werden kann, bleibt nur noch die Wahl, den Hebel weiter vom Lenker wegzusetzen oder die Bremskraft zu erhöhen, so daß weniger Hebelkraft oder ein geringerer Weg benötigt werden.

## 2. Hauptbremszylinder und Bremsflüssigkeitsbehälter

Die wichtigste Abmessung des Hauptbremszylinders ist sein Kolbendurchmesser  $d_1$ , der manchmal am Gehäuse des Zylinders eingestempelt ist. Seine Querschnittsfläche  $A$  beträgt:

$$A_1 = \pi d_1^2 / 4$$

Der Druck  $p$ , der in der Bremsflüssigkeit durch die Kraft  $F$  erzeugt wird, beträgt:

$$p = F_1 / A_1$$

Dieser Druck wirkt auf den Kolben des Bremszylinders und erzeugt dort eine weitere Kraft  $F_2$ :

$$F_2 = p A_2$$

oder

$$F_2 = F_1 A_2 / A_1 \quad (6.2)$$

wobei  $A_2$  die Fläche des Bremskolbens ist. Beachten Sie, daß dies die gesamte Fläche aller Bremskolben ist. Bei nur einem Kolben, bei dem die Bremszange auf

Bolzen verschoben, und somit ein fester Belag in Berührung mit der dem Kolben entgegengesetzten Seite der Scheibe gebracht wird, wirkt die Bremszange wie ein Kolben, der den festen Belag betätigt.

In diesem Fall beträgt  $A_2 = \pi d_2^2/2$ , falls  $d_2$  der Durchmesser des Kolbens ist. Falls die Bremszange gegenüberliegende Kolben hat, beträgt  $A_2 = \pi n d_2^2/4$ , wobei  $n$  die Anzahl der Kolben ist. Beachten Sie, daß in Vierkolben-Sätteln der zuerst beaufschlagte Kolben oft einen kleineren Durchmesser hat.  $A_2$  ist die gesamte Fläche aller Kolben.

Gleichung 6.2 zeigt, wie die Kraft in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fläche der Bremskolben zu der Fläche des Kolbens im Hauptbremszylinder wächst. Falls  $A_2$  doppelt so groß wie  $A_1$  ist, beträgt  $F_2$  das Zweifache von  $F_1$ .

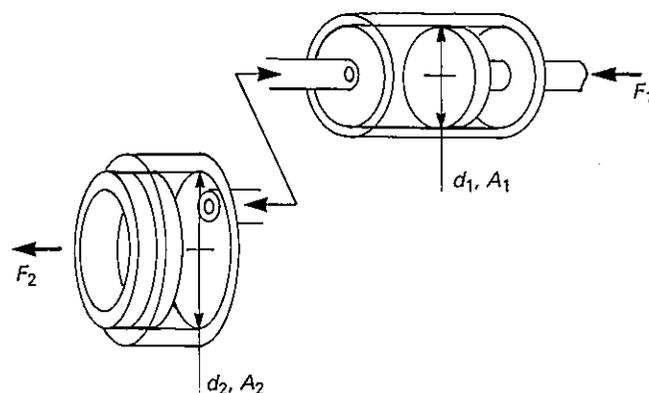


Abbildung 6.3 Das hydraulische Übersetzungsverhältnis ist durch das Größenverhältnis von Hauptbrems- zu Radbremszylinder festgelegt.

$A_2/A_1$  ist das hydraulische Übersetzungsverhältnis zwischen den beiden Kolben. Es verhält sich gleich wie  $d_2^2/d_1^2$  oder  $(d_2/d_1)^2$ . Es wirkt genau wie ein Hebel. Die ursprüngliche Kraft  $P$  wurde bereits durch einen Hebel vergrößert (siehe Gleichung 6.1). Beachten Sie, falls der Durchmesser des Radbremszylinders doppelt so groß wie der des Hauptbremszylinders ist, wird das hydraulische Übersetzungsverhältnis 4 zu 1. Wenn wir nun die Werte von Gleichung 6.1 einsetzen, wird ersichtlich, wie die Handkraft des Fahrers auf die am Radbremszylinder wirkende Kraft übertragen wird, die die Beläge an die Scheibe preßt.

$$F_2 = P \times A_2 / y A_1$$

Um die Bremskraft  $F_2$  zu erhöhen, ist es notwendig,  $P$ ,  $x$  oder  $A_2$  zu vergrößern oder  $y$  oder  $A_1$  zu verringern. Der Betrag der Reibung an den Dichtungen am Hauptbrems- oder Radbremszylinder ist dabei nicht berücksichtigt. Er reduziert sowohl  $F_1$  als auch  $F_2$ , und erhöht den nötigen Wert für  $P$ . Es können auch Rückzugsfedern benutzt werden, um das auszugleichen (siehe Seite 102). Beachten Sie, falls der Belag einen Weg  $z$  zurücklegen muß, um die Scheibe zu berühren, beträgt das Volumen der verdrängten Flüssigkeit  $z A_2$ . Dieses Volumen muß im Hauptbremszylinder bewegt werden. Der Weg des Kolbens am Hauptbremszylinder ist also  $z_1$ . Somit ist:

$$z_1 = z A_2 / A_1$$

Der Weg am Druckschwerpunkt des Hebels ist  $z_2$ . Somit ist:

$$z_2 = z_1 \times / y$$

oder

$$z_2 = z A_2 \times / A_1 y \quad (6.4)$$

Da all diese Faktoren die Kraft  $F_2$  verstärken, wächst auch der Hebelweg  $z_2$  im gleichen Verhältnis.

Der umgekehrte Fall ist ebenso denkbar. Es ist möglich, den Hebelweg durch Verringerung von  $z$  (Lüftspiel),  $A_2$  und  $\times$  zu verringern, oder  $A_1$  oder  $y$  zu vergrößern. Das erschwert, abgesehen vom Lüftspiel, die Betätigung der Bremse.

Es dürfen keine Nachgiebigkeiten am Hebel oder Zylinder und an den Bremsleitungen existieren. Grundvoraussetzung dafür ist, daß weder der Hebel am Bremszylinder noch die Bremsleitungen nachgeben. Nachgiebigkeiten wirken sich direkt auf den Hebelweg aus. Die Ausdehnung erhöht das Volumen des Hydrauliksystems, das von der Bremsflüssigkeit vom Hauptbremszylinder versorgt wird. Dieses Volumen kommt zusätzlich zum benötigten Weg am Kolben hinzu. Die Reibung in den Bolzen von Schwimmsätteln oder schwimmend gelagerten Bremscheiben müssen von der, am Belag zur Verfügung stehenden Kraft abgezogen werden. Sie kann durch die Verwendung eines Hochtemperaturschmiermittels, wie zum Beispiel Copaslip, verringert werden.

Die Gleichung für eine Trommelbremse ergibt eine Kraft  $F_2$  am Bremsbacken. Sie ist:

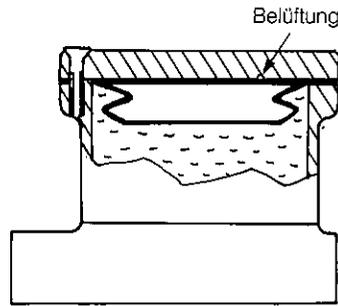
$$F_2 = P x a / y b$$

$a/b$  ist das Verhältnis zwischen Hebellänge und Nockenhöhe. Bei Betätigung des Hebels kann sich das Verhältnis  $a/b$  ändern. Die Bremse sollte so eingestellt sein, daß sie ein Maximum erreicht, wenn der Bremsbacken die Trommel berührt. Falls er sich über den Totpunkt hinaus bewegt, nimmt das Verhältnis wieder ab.

Die ersten Ausführungen von Hauptbremszylindern waren sperrig, schwer und neigten zu Schäden. Spätere Ausführungen waren kompakter. Viele haben entweder einen externen oder integrierten Behälter, der in verschiedenen Winkelpositionen angebracht werden kann, ohne daß die Gefahr besteht, daß Luft in den Zylinder gerät.

Der Grund dafür, daß überhaupt ein Behälter notwendig ist, liegt darin, daß die Flüssigkeit das Volumen, das durch den Belagverschleiß entsteht und die Luft wiederum das Volumen der Flüssigkeit ersetzen muß. Andernfalls würde der Hebel nicht in seine neutrale Ausgangsstellung zurückkehren. Falls andererseits ausreichend Federkraft zur Verfügung stände, um ihn zurückzudrücken, würden die Beläge zu weit von der Scheibe zurückgezogen, was wiederum einen zu großen Hebelweg zur Folge hätte, wenn die Beläge verschlissen sind. Eine flexible Faltenbalgmembrane ist zwischen der Bremsflüssigkeit und der Luft installiert, um einerseits zu verhindern,

daß Luftverschmutzungen die Bremsflüssigkeit verunreinigen, zum anderen, daß die Bremsflüssigkeit durch die Belüftungsbohrung im Vorratsbehälter dringt.



**Abbildung 6.4** Die Membrane im Boden des Hauptbremszylinders verhindert den Kontakt von Bremsflüssigkeit und Luft und erlaubt einen Volumenausgleich.

Bei Rennmaschinen, die nur auf wenig Bremsflüssigkeit angewiesen sind, wird der Bremsflüssigkeitsbehälter oft eingespart. Ihn ersetzt ein kurzes Stück flexibler Schlauch. Der benötigt wegen seiner Flexibilität allerdings eine Belüftung, ebenso wie eine Dichtung zwischen der Luft und der Bremsflüssigkeit.

Bereits geringe Undichtigkeiten können am Äußeren des Behälters als Kondensation erkannt werden. Die Flüssigkeit ist hygroskopisch, sie zieht Wasser an, nimmt es auf und vergrößert dadurch ihr Volumen. Das kann man erkennen, wenn man einige Tropfen in ein Glas gibt und über einen Zeitraum von mehreren Tagen beobachtet.

Bereits geringste Schmutzpartikel auf der Dichtungsoberfläche verursachen Undichtigkeiten. Bei Montage des Behälters in einem zu steilen Winkel ist die Gefahr groß, daß Luft in den Hauptbremszylinder kommt, besonders dann, wenn Vibrationen ein Aufschäumen bewirken.

### 3. Bremsflüssigkeit

Die meisten, im Handel erhältlichen Bremsflüssigkeiten erfüllen die Standards SAE J 1703, ISO 4925 und FMVSS 116 DOT 3, DOT 4 und DOT 5. Diese Normen legen Mindestanforderungen für Siedepunkt, Viskosität, Dichtungsverträglichkeit, Verträglichkeit von verschiedenen Bremsflüssigkeiten derselben Standards und Schutz gegen Metallkorrosion fest.

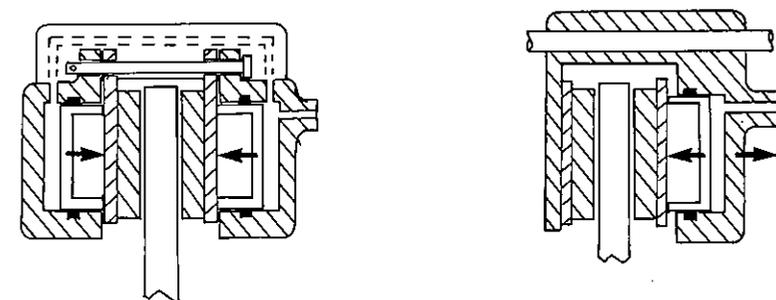
Die ersten drei Bremsflüssigkeiten haben nahezu die gleiche Zusammensetzung und werden für Straßenmotorräder am häufigsten verwendet (die benötigte Bremsflüssigkeit ist in der Regel auf dem Hauptbremszylinder oder dem Bremsflüssigkeitsbehälter vermerkt). Neben der Verträglichkeit mit anderen Flüssigkeiten ist der Naßsiedepunkt das Hauptmerkmal. Das ist der Punkt, an dem die Bremsflüssigkeit zu sieden anfängt, wenn sie mit Wasser verunreinigt ist. Vier Prozent Wasser können zum Beispiel den

Siedepunkt um dreißig Prozent herabsetzen. Die SAE, ISO und DOT 3-Normen verlangen einen Mindestnaßsiedepunkt von 140 Grad Celsius, während DOT 4 155 Grad Celsius vorschreibt. DOT 5 wurde für Silikonbremsflüssigkeiten vorgeschrieben, die zwar nicht hygroskopisch sind, sich aber bei hohen Temperaturen zusammendrücken lassen und sich deshalb nicht für Hochleistungsbremsen eignen. Zusätzlich zu diesen Bremsflüssigkeiten gibt es spezielle Flüssigkeiten, die für den Rennsport entwickelt wurden, wie zum Beispiel Ferodo Racing Brake Fluid und AP Racing 550 und 600 Bremsflüssigkeit.

AP's Bremsflüssigkeit entspricht der SAE J 1703, hat aber einen höheren Siedepunkt. AP 550 hat einen Mindestrockensiedepunkt von 290 Grad Celsius und einen Naßsiedepunkt von 145 Grad Celsius. AP 600 reicht von 300 Grad Celsius trocken bis zu 210 Grad Celsius naß.

Als grundsätzliche Regel gilt: Je höher der Siedepunkt, um so hygroskopischer ist die Flüssigkeit. Das bedeutet, daß sie öfters getauscht werden muß, da die Wasseraufnahme nicht nur den Siedepunkt herabsetzt, sondern auch Korrosion im Zylinder verursachen kann. Die Hersteller von Rennbremsflüssigkeiten verlangen, daß die Bremsanlage vor jedem Rennen sorgfältig entlüftet wird.

Um das System zu entlüften, demontieren Sie den Bremszylinder, so daß der Entlüftungsnippel so gehalten werden kann, daß er den höchsten Punkt des ganzen Systems darstellt. Halten Sie ihn eine Weile in dieser Position, um Luftblasen aufsteigen zu lassen. Luft im Hauptbremszylinder kann durch vorsichtiges Hin- und Herbewegen des Hebels bis zu dem Punkt, an dem die Bohrung zwischen Zylinder und Behälter öffnet, aufgelöst werden. Stecken Sie einen durchsichtigen Schlauch auf jeden Entlüftungsnippel und führen Sie ihn in ein Glas, das Bremsflüssigkeit enthält, so daß der Schlauch keine Luft zurück in die Bremszange ziehen kann. Stecken Sie einen Holzkiotz zwischen die Beläge. Falls die Konstruktion des Entlüftungsnippels sicherstellt, daß keine Luft angesaugt werden kann, lösen Sie den Nippel leicht und pumpen ständig Bremsflüssigkeit durch, indem Sie den Behälter gefüllt halten. Falls Luft hinter dem Nippel angesaugt werden kann, schrauben Sie ihn nach jeder Pumpbewegung zu.



**Abbildung 6.5** Prinzip der beiden Bauarten von Bremszangen.

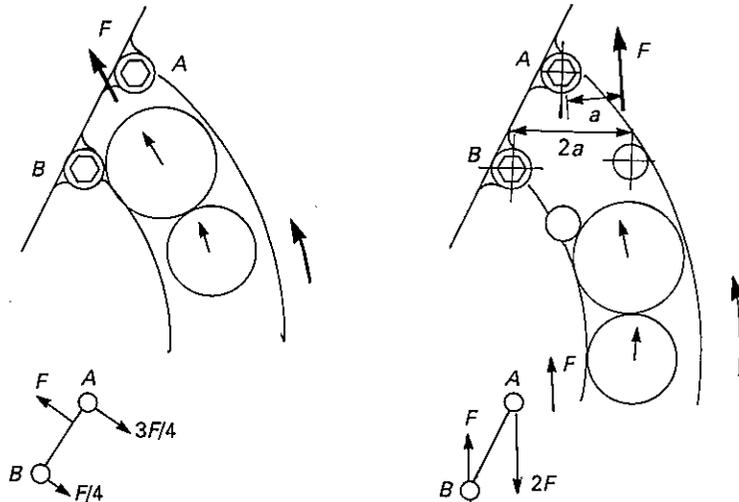
Links: Festsattel

Die Kolben zu beiden Seiten der Scheiben werden mit dem gleichen Druck beaufschlagt.

Rechts: Schwimmsattel

Der Druck auf den Kolben überträgt die Kraft vom Kolben auf die Scheibe und verschiebt die Bremszange (die auf Bolzen beweglich gelagert ist) von der Scheibe weg.

Luft im Hydrauliksystem ist kompressibel. Sie führt zu vergrößertem Hebelweg, ergibt ein teigiges Gefühl und begrenzt schließlich den Druck, der aufgebaut werden kann. Der Druck in den Bremsleitungen kann durch schnelles Pumpen am Hebel erhöht werden. Das ist ein typisches Merkmal für Luft im System und tritt auf bis die Luft durch das Entlüftungssystem entwichen ist.



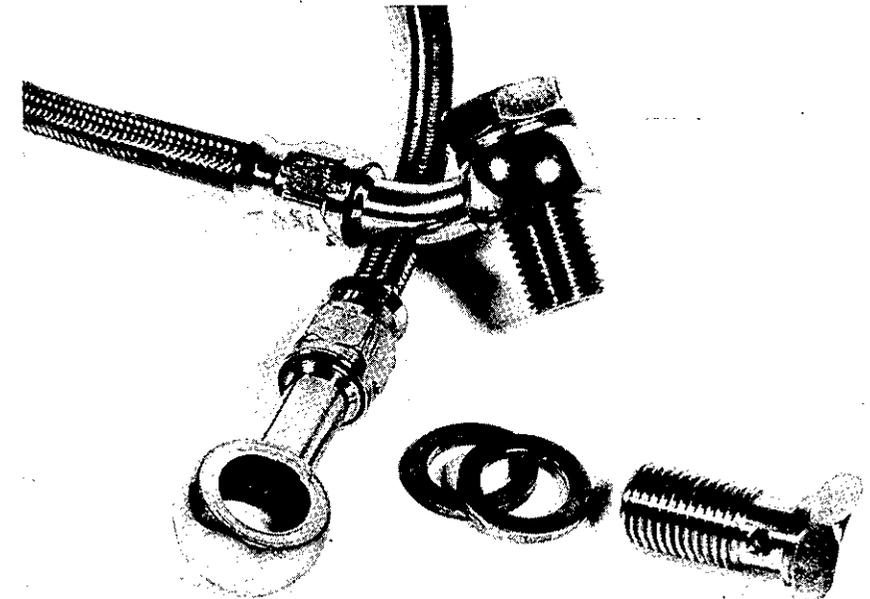
**Abbildung 6.6** Durch Versetzen der Bremszange können sich die Kräfte in den Befestigungsschrauben drastisch ändern. In diesem Fall steigt die Kraft in der oberen Befestigungsschraube um das 2,67-fache, während die untere Schraube eine um den Faktor vier geringere Kraft aufnehmen muß (bei gleicher Bremskraft). Die Richtung der Kraft hat sich ebenso geändert. Das Gußauge, das die Schraube B hält, wird nun hauptsächlich auf Zug statt auf Druck beansprucht (der Werkstoff ist auf Zug geringer belastbar als auf Druck).

Die gleichen Symptome treten zeitweilig auf, wenn die Flüssigkeit überhitzt wird, örtlich zu kochen beginnt und somit Dampfblasen bildet. Der Hebelweg vergrößert sich, die Bremse fühlt sich teigig an und kann nicht den vollen Druck aufbauen. Diese Erscheinung verschwindet, wenn die Bremse abkühlt und die Luftblasen kondensieren. Es wird oft als Fading bezeichnet, wobei »Bremsflüssigkeitsfading« die richtige Beschreibung wäre. Sie unterscheidet sich vollständig vom Belagfading (siehe Beläge unten).

#### 4. Bremsleitungen

Maximale Betriebsbremsdrücke betragen 35 bis 42 bar. Das reicht aus, um Bremsleitungen auszudehnen. Eine geringe Ausdehnung ist erwünscht. Sie erzeugt das Gefühl für die Bremse und begrenzt den Aufbau von zu hohen Drücken. Dadurch wird die Bremse progressiver. Zu hohe Ausdehnung erzeugt ein teigiges Bremsgefühl und zu großen Hebelweg. Sie verhindert einen optimalen Bremsdruckaufbau.

Man kann die, für die Straße beste Lösung dann verändern, wenn ein Straßenmotorrad für Rennen genutzt wird, die Leistung gesteigert wurde und somit die Bremsen stärker beansprucht oder andere Bremsen verwendet werden. Steifere Bremsleitungen sind dann notwendig. Goodridge UK ist der Hauptlieferant in Großbritannien mit dem eigenen Angebot, Leitungen von Earl's und der gesamten dazugehörigen Ersatzteile.



**Abbildung 6.7** Verschiedene Stärken von Bremsleitungen sind erhältlich. Die Auswahl der inneren Leitungen geht vom synthetischen Gummi über Nitril bis zu PTFE, gestützt von einem äußeren Gewebe aus Baumwolle, Nylon, Draht oder rostfreiem Stahl (Goodridge UK).

Für die meisten Anwendungen ist es wichtig, nicht zu übertreiben und ein vollständig starres Gefühl zu erzeugen. Eine geringe Nachgiebigkeit ist notwendig. In der Regel ist es möglich, eine Kombination von Leitungen zu bilden, die bei Bedarf eine ausreichende Steifigkeit ergeben, aber auch flexibel genug sind, um den Radbewegungen zu folgen. Die Beweglichkeit der Leitungen sollten sorgfältig über den gesamten Weg der Radaufhängung überprüft werden. Ebenso sollte der volle Lenkeinschlag kontrolliert werden, um sicherzustellen, daß sie nicht scheuern, eingeklemmt oder überdehnt werden. Die Firma Goodridge stellt Leitungen nach Muster her. Sie bietet in ihrem Katalog aber auch Anleitungen und Bausätze an.

## 5. Bremszangen

Es gibt verschiedene Konstruktionen von Bremszangen:

- (a) Einkolbenschwimmsattel
- (b) Doppelkolbenschwimmsattel
- (c) Einkolbenfestsattel mit schwimmender Scheibe
- (d) Zweikolbenfestsattel
- (e) Vierkolbenfestsattel
- (f) Vierkolbenfestsattel mit unterschiedlichen Kolbendurchmessern

Die ersten drei Ausführungen haben nur einseitige Kolben, die durch den Druck auf den Belag den Bremssattel oder die Scheibe verschieben und dadurch den gegenüberliegenden Belag zum Einsatz bringen. Von diesen ist die Ausführung (c) relativ selten, während (a) in der Regel bei Straßenmaschinen und Sportmaschinen kleinerer Leistung und (b) bei Straßenmotorrädern, Motocrossern usw. genützt wird. Diese Ausführungen haben gewisse Vorteile durch das geringere Gewicht, sie sind billiger und schmaler als Festsättel mit gegenüberliegenden Kolben. Der Nachteil ist, daß die Reibung in der schwimmenden Lagerung von der Bremsleistung abgezogen werden muß. Die Reibung steigt mit der Bremskraft. Der Verschiebemechanismus ist auch anfällig auf Straßenschmutz und Korosion. Regelmäßige Reinigung und Schmierung mit Copaslip ist die einzige Möglichkeit, ständige hundertprozentige Wirkung von schwimmenden Bremssätteln sicherzustellen.

In der Regel haben alle Hochleistungsmotorräder Festsättel, deren Beläge sich selbst ausrichten, obwohl in manchen Fällen die Scheiben auf Bolzen gelagert sind und sich daher eingeschränkt bewegen können.

Die Kolbendichtungen sind in der Hauptsache verantwortlich, um die Kolben von den Scheiben zurückzuziehen, wenn die Bremse geöffnet wird, obwohl auch ein leichter Seitenschlag der Scheibe die Beläge und Kolben zurückdrückt.

Spezielle Zulieferer haben Schmiermittel, wie zum Beispiel Lockheed Disc Brake Lubricant, eine Silikonmischung, die den Kolben vor Korosion schützt und beim Zusammenbau verhindert, daß die Dichtungen beschädigt werden. Falls die Dichtungen die Kolben zu weit zurückziehen, und somit ein zu großer Weg am Hebel entsteht, ist es möglich, Federn hinter den Kolben zu installieren (Antirückzugfedern). AP führt Federn mit 0,18 und 0,32 N/mm Federrate. Es ist wichtig zu überprüfen, daß der Kolben im Hauptbremszylinder nicht dort blockiert wird, wo die Zulaufbohrung vom Behälter sitzt. Da die Feder im Hauptbremszylinder den Hebel zurückdrückt, neigt der Unterdruck dazu, die Kolben zurückzuziehen, so daß keine neue Flüssigkeit im Hauptbremszylinder nachrücken kann.

Wenn im umgekehrten Fall die Beläge schleifen, sollten sämtliche Federn entfernt oder in der Federrate verringert werden, neue Dichtungen montiert oder der Scheibe ein leichter Seitenschlag gegeben werden.

Die Beläge sind oft mit Antiquietsch-Federn oder mit einem Hitzeschild versehen. Nissin-Beläge, die an einigen Hondas montiert sind, haben eine plasmabeschichtete Keramikrückplatte. Es kann notwendig sein, den Wäremeübergang zur Bremszange und Bremsflüssigkeit zu reduzieren, falls die Leistung des Fahrzeugs und die Bremsleistung gesteigert werden.

Wenn  $\mu_B$  der Reibungskoeffizient zwischen Belag und Scheibe ist, dann ergibt sich aus Gleichung 6.3 die Bremskraft an der Scheibe zu  $F_2\mu_B$ . Diese setzt ein Bremsmoment am Rad von  $F_2\mu_B r_B$  voraus, wobei  $r_B$  der wirksame Radius der Scheibe ist. Falls  $r_w$  der Rollradius des Rades ist, entsteht zwischen Reifen und Straßenoberfläche die Kraft  $F$ . Daraus ergibt sich:

$$F = F_2\mu_B r_B/r_w$$

oder wenn man aus Gleichung 6.3  $F_2$  ersetzt:

$$F = P \times A_2 \mu_B r_B / r_w \times y A_1 \quad (6.5)$$

Daraus erhält man die Bremskraft am Reifen in Abhängigkeit von der Handkraft am Hebel und den Abmessungen des Bremssystems. Um die Bremskraft am Reifen ( $F$ ) zu erhöhen, ist folgendes notwendig:

erhöhen	verringern
Hebelkraft $P$	Reifenrollradius $r_w$
Hebellänge $\times$	Hebellänge $y$
Kolbenfläche $A_2$	Fläche des Hauptbremszylinders $A_1$
effektiver Scheibenradius $r_B$	
Belagreibwert $\mu_B$	

Das zeigt auch, warum sich Bremscheiben im Rennsport in der heutigen Art entwickelt haben. Anfangs war es notwendig, den Radius in Abhängigkeit von der Radgröße zu erhöhen. Dann wurde die Vierkolbenzange entwickelt, die bei gleichem äußerem Durchmesser der Scheibe einen größeren wirksamen Durchmesser und einen dünneren Bremsring ermöglichte. Die Kolbenfläche konnte durch eine Doppelkolbenkonstruktion vergrößert werden, obwohl die Scheibe leichter wurde und ein geringeres Massenträgheitsmoment aufwies. Daraus resultiert eine geringere ungefederte Masse und ein geringeres Massenträgheitsmoment, was in dieser Weise nicht einmal in der Fahrwerksentwicklung gelang.

Der nächste Schritt ging in Richtung ungleicher Kolbendurchmesser. Kawasaki fand heraus, daß die Druckverteilung im Betrieb nicht gleich war. Die Verwendung eines kleineren Kolbens am auflaufenden Ende des Belags glich sie aus. Andere stellten wiederum fest, daß das ablaufende Ende des Belags sich stärker erwärmte, wodurch der Reibungskoeffizient sank und dadurch ein höherer Bremsdruck erforderlich wurde. Das führte wiederum zu einem kleineren Durchmesser an der auflaufenden Seite. Eine weitere Überlegung besagte, daß das ablaufende Ende durch stärkere Erwärmung schneller verschleißt. Um dem ungleichen Verschleiß vorzubeugen, war es notwendig, den kleineren Durchmesser am ablaufenden Kolben zu plazieren. Nissin, AP, Kawasaki, Suzuki, Yamaha und Honda installierten den Kolben mit dem kleineren Durchmesser am auflaufenden Ende. ISR installierte vier einzelne Beläge, einen für jeden Kolben mit gleichem Durchmesser.

Die verschiedenen Faktoren, aus Gleichung 6.5, zeigen, wie die Bremswirkung verstärkt werden kann, aber auch die daraus resultierenden Konsequenzen. Eine höhere Bremskraft bedeutet größere Wärmeentwicklung am Belag, die wiederum die Bremsflüssigkeit, den Belagwerkstoff oder den Scheibenwerkstoff überhitzen könnte.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, den Belag oder die Scheibe besser zu kühlen (siehe Kapitel 7, Aerodynamik) oder die Masse oder Oberfläche der Scheibe (siehe unten) zu ändern. Die Betriebstemperaturen können durch ein Thermoelement in der Entlüftungsbohrung oder durch Temperaturstifte ermittelt werden, die von AP-Racing erhältlich sind (siehe Kapitel 11 und Anhang).

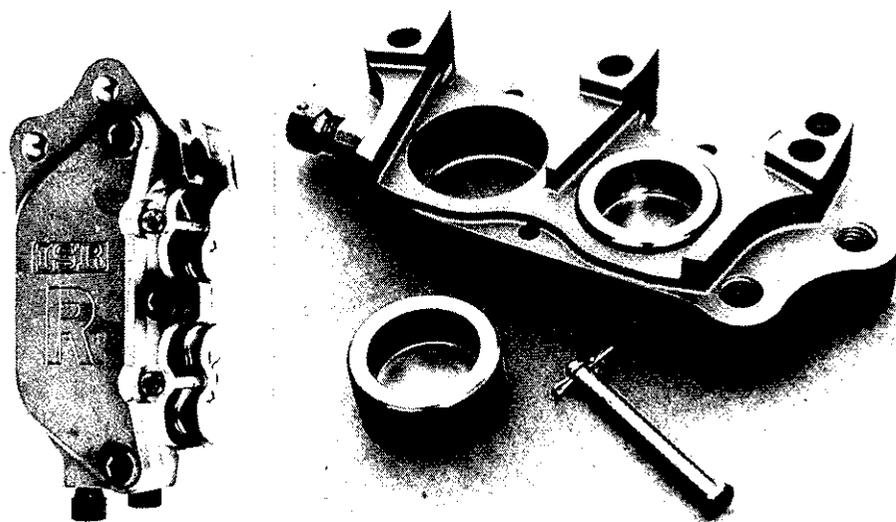


Abbildung 6.8 (a) und (b) Vierkolbenzangen von ISR haben Kolben mit gleichem Durchmesser und einzelne Beläge

Eine Erhöhung der Bremskraft ändert auch die Lage des Fahrzeugs während dem Bremsen und seine Neigung zum Blockieren des Rads oder zum Überschlag. Falls die Schwerpunktslage bekannt ist, kann dieses Verhalten aus Abbildung 6.19 errechnet werden.

Eine erste Annäherung ergibt:

$$R_f T_w = mg (w - cg_x) + F (cg_y) \quad (6.6)$$

$$R_f + R_r = mg \quad (6.7)$$

Wobei  $R_f$  das Gewicht auf dem Vorderrad,  $R_r$  das Gewicht auf dem Hinterrad,  $w$  der Radstand,  $m$  die Masse des Motorrads ( $mg$  Gewichtskraft des Motorrads),  $cg_x$  der Abstand des Schwerpunkts von der Vorderachse,  $cg_y$  die Schwerpunkts Höhe über dem Boden und  $F$  die Bremskraft am Reifen (6.5) ist.

Falls  $F > \mu_w R_f$  (wobei  $\mu_w$  der Kraftschlußbeiwert zwischen Reifen und Straße ist), beginnt das Rad zu rutschen. Der Grenzwert für die Kraft  $F_{max} = \mu_w R_f$ .

Falls  $F < F_{max}$  und  $F > mg_{cg_y}/cg_y$  ist, neigt die Maschine zum Überschlag (und zwar im Punkt  $R_f = mg$ ). Das Rechenprogramm im Anhang errechnet  $F$  für gegebene Kräfte und die Bremsgeometrie und erstellt die Grenzbedingungen.

Die Gewichtsverlagerung verursacht ein Einfedern der Vorderradaufhängung und ein Ausfedern der Hinterradaufhängung, wodurch sich die Höhe des Schwerpunkts  $cg_y$  ändert (zu einem gewissen Betrag auch seine Lage  $cg_x$ ). Eine zweite Annäherung muß das berücksichtigen (die Verformung der Feder hat auch einen Einfluß auf die Wahl der Federrate und das Anti-Dive-System). Die Kraft, die in den vorderen Federn gespeichert wird, ist  $(R_f - R_{f0}) \cos \varphi$ , wobei  $\varphi$  der Winkel der Gabel zur Vertikalen und  $R_{f0}$  die statische Last auf dem Vorderrad ist. Beachten Sie, falls ein Bremsmoment auf das gefederte Ende der Radaufhängung wirkt, muß diese Kraft von der Gesamtkraft abgezogen werden.

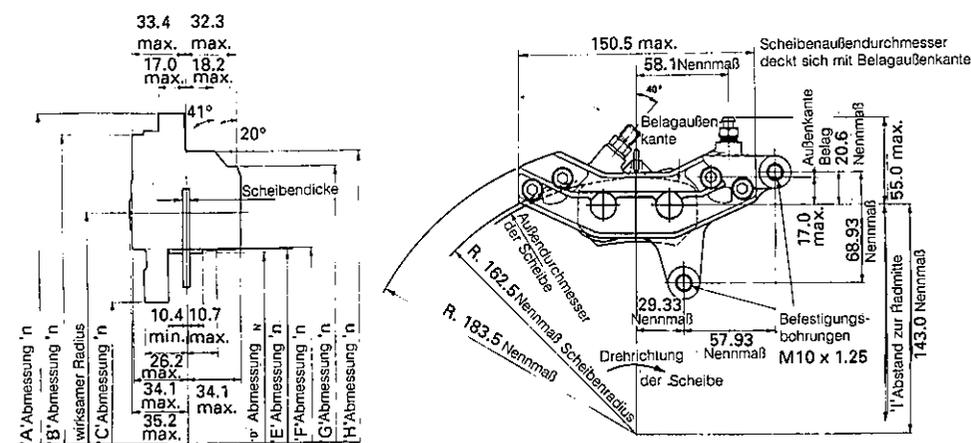
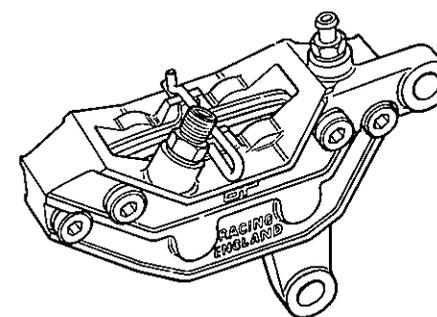


Abbildung 6.9 AP-Racing liefert vollständige Datenblätter für ihre Komponenten, wie diesem Vierkolben-sattel mit ungleichen Kolbendurchmessern. Rennbremszangen sind in der Regel entweder in Aluminium- oder Magnesiumlegierung erhältlich (Automotive Products).

Sie drückt die Radaufhängung um den Betrag von  $(R_f - R_{fo}) \cos\varphi/S$  zusammen, wobei  $S$  die gesamte Federrate (das heißt, die beider Federn) ist. Das gefederte Ende der Gabel verkürzt sich um  $(R_f - R_{fo}) \cos^2\varphi/S$ . Dadurch verringert sich auch der Radstand ( $w$ ) und die Lage des Schwerpunkts ( $cgx$ ) um den Betrag  $(R_f - R_{fo}) \cos \varphi/S$ .

Die reine Berechnung liefert in diesem Fall zu ungenaue Ergebnisse. Es ist einfacher, eine Maßstabszeichnung zu verwenden, um die Verlagerung des Schwerpunkts zu ermitteln.

Eine weitere Abschätzung ist erforderlich, um die Gewichtsverlagerung und das Überschlagsmoment zu berechnen, das durch die neue Lage des Schwerpunkts entsteht. Obwohl diese Berechnungen einfach auszuführen sind, ist es ermüdend, sie für verschiedene Werte zu wiederholen. Das ist einer der Vorteile eines Rechenprogramms, das im Falle einer Änderung eines Werts sofort eine Neuberechnung durchführt.

Es ist für die meisten Anwendungen genau genug. Um aber eine weitere, noch genauere Annäherung zu erreichen, müssen die aerodynamischen Kräfte berücksichtigt werden. Sie spielen bei höheren Geschwindigkeiten eine entscheidende Rolle. Sie wirken sich auf die Gewichtsverteilung und die Gewichtsverlagerung in folgender Weise aus:

$$R_f + R_r = mg - \text{Auftrieb} \quad (6.8)$$

$$R_f w = mg(w - cgx) + F(cgy) - \text{Widerstand } cpy - \text{Auftrieb } cpx$$

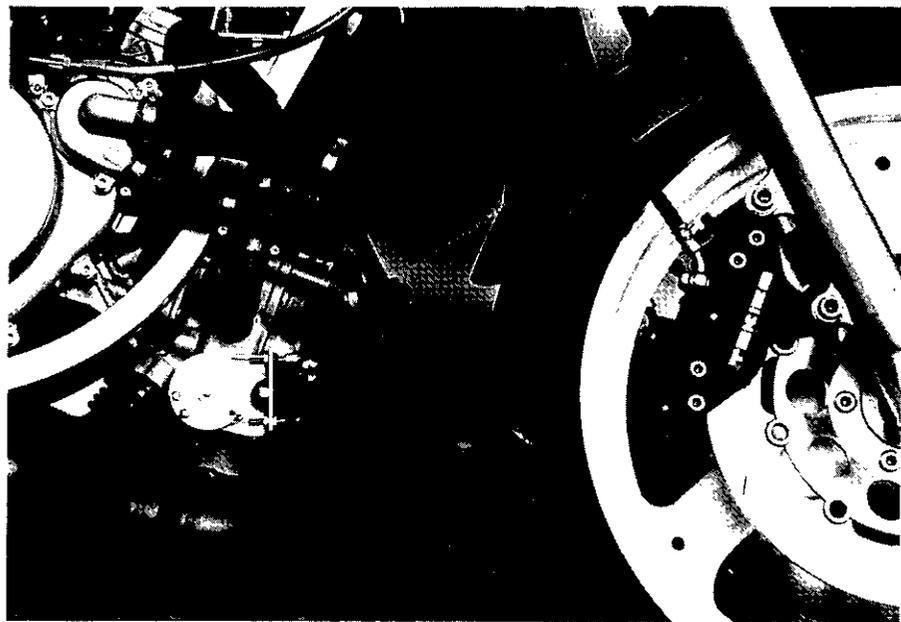


Abbildung 6.10 Tokico und Nissin liefern, ebenso wie OEM, Vierkolben-Bremszangen für die japanischen Hersteller.

wobei der Widerstand die Luftwiderstandskraft, der Auftrieb die aerodynamische Auftriebskraft,  $cpx$  den Abstand des Druckmittelpunkts hinter der Vorderradachse und  $cpy$  den Abstand des Schwerpunkts vom Boden bezeichnet.

Diese Daten können nur aus Tests ermittelt oder geschätzt werden, unter der Annahme, daß zum Beispiel  $cpy$   $cg_y$  und der Auftrieb gegen null gehen bis sich etwas anderes herausstellt.

Die Masse der Bremszangen hat entscheidenden Einfluß. Sie ist ungefedert und bewegt sich mit der Lenkung, so daß jede Massenreduzierung oder Verringerung des Abstands von der Lenkachse eine Verbesserung ergibt. Bremsättel waren früher in der Regel vor den Gleitrohren angebracht, womit sie sich so weit wie möglich von der Lenkachse entfernt am Gleitrohr befanden. Bei nahezu allen heutigen Konstruktionen sitzen sie hinter den Gleitrohren, praktisch auf Höhe der Lenkachse.

Eine einzelne Scheibe und Bremszange sollte gegenüber einer Doppelscheibenbremse vorgezogen werden, wenn die zusätzliche Bremskraft nicht wesentlich ist. Der Bremsattel ist in der Regel direkt am Gleitrohr oder an einer Halteplatte angeschraubt. In einigen Fällen sind die Bolzen in einem beweglichen Arm gelagert.

Die Bremskraft zwischen der Bremszange und der Scheibe beträgt  $F_{2\mu_B}$ . Falls der Scheibenradius annähernd die Hälfte des Rollradius beträgt, ist diese Kraft in der Regel zweimal so hoch wie die, die dem Gesamtgewicht der Maschine entspricht. Sie teilt sich zwischen den beiden Befestigungsschrauben annähernd gleich auf. Wenn Schrauben  $M 10$  benützt werden, beträgt die Querschnittsfläche eines jeden  $78,5$  Quadratmillimeter. Bei einem Motorradgesamtgewicht von  $227$  Kilogramm tritt eine Scherkraft von  $227$  durch  $78,5$  oder  $2,9$  Kilogramm pro Quadratmillimeter auf. Deshalb muß der Schraubenwerkstoff aus hochwertiger Qualität bestehen, in gutem Zustand sein, eine sichere Befestigung im Gleitrohr gewährleisten und fest angezogen sein.

Es muß sicher gestellt sein, daß die Bremszange so montiert ist, daß die Kraft gleichmäßig zwischen den beiden Schrauben aufgeteilt ist. Falls sie auf einer Platte montiert ist, dann muß diese dieselben Scherkräfte aufnehmen. Der Bremsattel muß so angebracht sein, daß die Haltekräfte nicht auf die beiden Schrauben gerichtet sind. In diesem Fall kann die Scherbeanspruchung in der einen stark reduziert werden, während sie in der anderen stark ansteigt. Das ist der Fall, wenn die Wirkungslinie, die von der Mitte der Belagfläche ausgeht, nicht zwischen den beiden Halteschrauben verläuft (siehe Abbildung 6.6).

## 6. Beläge

Die Beläge sind die am leichtesten auszuwechselnden Teile des Bremssystems. Die Wahl kann dabei auf den Erstausrüster oder auf verschiedene Nachrüster fallen, wobei es möglicherweise Rennbeläge gibt. Hohe Reibwerte sind besonders wichtig, da dieselbe Bremskraft bei geringerer Reibung durch höheren Druck oder eine größere Kolbenfläche in den Bremszangen ausgeglichen werden muß.

Wichtiger ist, daß Beläge ihre Leistungsfähigkeit über den gesamten Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich, den das Motorrad erreicht, aufrecht erhalten. Das kann nur durch Testen herausgefunden werden. Der Verschleiß und die Art, wie sich der Belag abnützt, ist wichtig für ein Straßenmotorrad.

Der örtliche Druck zwischen dem Belag und der Scheibe kann gesteigert werden, indem man die Belagfläche verringert. Eingearbeitete Nuten bewirken das und bilden Kanäle für die Abführung des Abriebs. Beide Maßnahmen helfen Bremsen, die bei starker Verschmutzung arbeiten. Sie können auch dem Bremsenquietschen vorbeugen. Man muß jedoch davor warnen. Belagmaterial kann Asbest enthalten. Tragen Sie eine Schutzmaske, blasen Sie die Bearbeitungsrückstände nicht mit Druckluft in die Umgebung.

Neue Beläge sind oft angeschrägt, um die ursprüngliche Kontaktfläche zu verringern. Dadurch wird der Einbettungsprozeß beschleunigt. Nuten in neuen Belägen sind dagegen meist einfache Verschleißanzeigen. Das Einbetten in der Einfahrphase kann durch gemäßigt hartes Bremsen erzielt werden, das in Intervallen durchgeführt wird, damit sich die Beläge zwischenzeitlich abkühlen können (bei ständigem leichten Bremsen ist die Gefahr des Überhitzens und Verglasens größer, siehe unten).

Die in den Belägen verwendeten Werkstoffe können sein:

1. organisch,
2. organisch mit Metallpartikeln,
3. Sintermetall,
4. Keramik oder Keramik/Sintermetall,
5. Kohlefaser (zusammen mit Kohlefaserscheiben).

Die Hersteller verwenden in der Regel Datenblätter, in denen die Werkstoffeigenschaften, insbesondere die Änderung der Reibung über der Temperatur und der Reibgeschwindigkeit, aufgelistet sind. Sie sind nötig, um die grundsätzliche Geometrie wie Scheibendurchmesser, Kolbendurchmesser, Zuspannkraft, usw. zu berechnen. Die Vorteile des keramischen Werkstoffs sind gute Verschleißeigenschaften und geringes Fading bei hohen Temperaturen und die geringe Wärmeübertragung (das heißt, von der Scheibenoberfläche auf die Bremsflüssigkeit). Der Belagwerkstoff muß mit dem Scheibenwerkstoff harmonieren. Der Belaghersteller liefert diese Informationen.

Tests, die wir 1978 durchführten, zeigten, daß der Belagwerkstoff den größten Einfluß auf die Leistungsfähigkeit der Bremsen bei Nässe hat (siehe Kapitel 11). Grundsätzlich gilt, je mehr Wasser dem Belag zugeführt wird, desto stärker nimmt der Reibungskoeffizient zwischen Belag und Scheibe ab. Bis zu einem bestimmten Niveau sinkt die Reibung und die Leistungsfähigkeit, zumindest bei den OEM-Mischungen, die 1970 benutzt wurden, drastisch. Andere Beläge zeigen diese Charakteristik bei Druck und Wasserverhältnissen, wie sie im Betrieb auftreten können, nicht. Die Tests wurden mit verschiedenen Scheibenwerkstoffen, genuteten und gebohrten Scheiben, verschiedenen Belaganordnungen und -drücken gefahren. Dabei spielte jedoch nur der Belagwerkstoff eine entscheidene Rolle bei der Leistungsfähigkeit.

Der Reibungskoeffizient für Belagwerkstoffe liegt im Bereich von 0,3 bis 0,5. Rennbeläge liegen eher am unteren Ende dieser Skala. Sie neigen aber auch weniger dazu, den Reibwert über große Bereiche von Temperatur und Geschwindigkeit zu ändern. Ein konstanter Reibwert wäre für die Verwendung bei Motorrädern ideal. Bei den meisten Werkstoffen fällt der Reibungskoeffizient jedoch kontinuierlich, wenn

höhere Temperaturen erreicht werden. Das ist auf die Entwicklung auf dem Automobilsektor zurückzuführen, bei dem ein leichter Unterschied zwischen links und rechts zum Schiefziehen führt. Die Bremsen mit dem höheren Reibwert heizen sich stärker auf. Wenn sich dann die Reibung reduziert, neigt das Auto dazu, sich selbst zu stabilisieren.

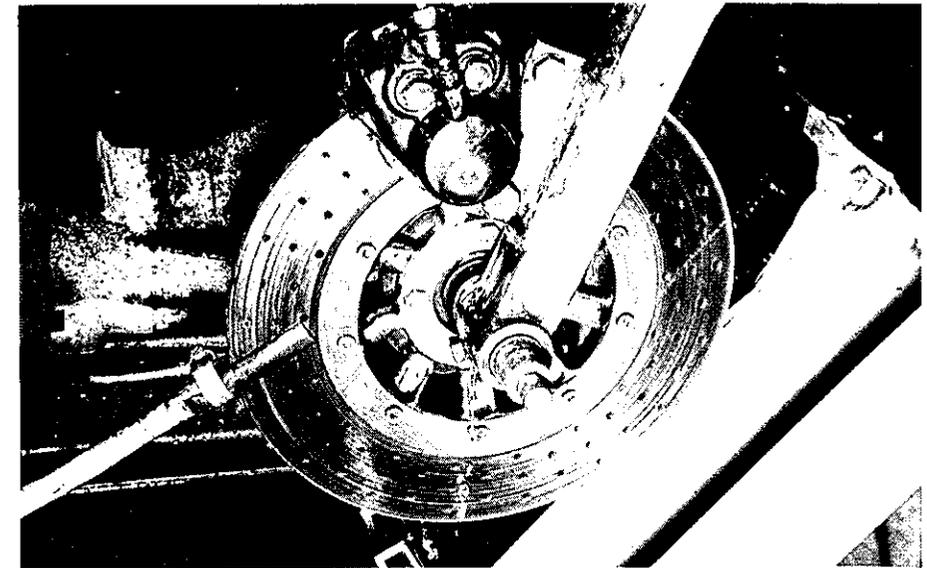


Abbildung 6.11 Nässetest-Prüfstand von Ledar gebaut (siehe Kapitel 11)

Die Scheiben beziehungsweise Trommeln und der Belag sollten nach dem Einbetten über die ganze Fläche eben und glatt sein. Ein Überhitzen des Belagwerkstoffs beschädigt den Werkstoff sofort an der Oberfläche, der dann geschwächt ist und bei anschließendem normalen Gebrauch schnell verschleißt. Leichte, ständige Benützung erzeugt eine Überhitzung. Sie kann beschädigte Partikel nicht von der Oberfläche abtragen, die sich dann mit einer harten, glänzenden Schicht (Verglasen genannt) einbetten. Starkes Bremsen reicht in der Regel, um diesen Belag aufzubrechen und abzutragen.

Organische Belagwerkstoffe beinhalten Fasern, die in Kunststoff getaucht sind, der aus Kohlefaser, Wasser- und Sauerstoff besteht. Wenn dieser teilweise überhitzt wird, verbrennt Wasser- und Sauerstoff. Zurück bleibt Kohlenstoff, der spröde ist und schnell verschleißt. Daher bleibt nichts zurück, was die organischen Fasern unterstützen kann. Während diesem Prozeß, der als Fading bekannt ist, bricht der Reibungskoeffizient zusammen, obwohl sich der Hebelweg unter Druck nicht ändert.

Dasselbe passiert mit einem Unterschied bei Belägen, die in Trommelbremsen benutzt werden. Die Reibung zwischen der Trommel und der auflaufenden Kante des Belags neigt dazu, den Belag von der Nocke oder dem Kolben wegzuziehen und in stärkeren Kontakt mit der Trommel zu bringen. Diese selbstverstärkende Wirkung wird

in Trommelbremsen ausgenutzt, die zwei oder vier auflaufende Backen haben (das heißt, die Nocke wirkt auf den auflaufenden Teil des Backens). Die Wirkung hängt von der Geometrie des Nockens und des Backens ab und steigt exponentiell mit dem Reibungskoeffizienten des Belags an. Falls die selbstverstärkende Wirkung zu groß ist, neigt die Bremse zum Einhaken und ist schwierig zu dosieren. Sie kann durch die Verwendung von Belägen mit geringerem Reibwert oder durch Anschrägung der auflaufenden Kante des Belags reduziert werden, so daß dieser in größerem Abstand zum Nocken mit der Trommel in Kontakt kommt.

## 7. Scheiben

Der wirksame Durchmesser bestimmt das Bremsmoment und zusammen mit der Radabmessung die Kraft, die zwischen Reifen und Straße erzeugt wird (siehe Gleichung 6.5). Unter der Annahme, daß eine einheitliche Bremskraft über die gesamte wirksame Fläche der Scheibe auftritt, liegt der wirksame Durchmesser in der Mitte zwischen dem inneren und äußeren Rand der wirksamen Fläche. Das reicht für die meisten Berechnungen aus, ist aber nicht ganz exakt, da zwischen dem inneren und äußeren Rand ein Unterschied in der Reibgeschwindigkeit besteht.

Außerdem sind die Dicke und das Gewicht zu berücksichtigen. Da sich die Scheibe mit dem Rad dreht, ist ihr Massenträgheitsmoment wichtig für die Gesamtleistung des Motorrads. Daher ist eine Reduzierung des Gewichts anzustreben. Ein größerer Scheibenradius erhöht nicht nur das Massenträgheitsmoment der Scheibe sondern auch die Kreiselkräfte. Die Anwendung von Vierkolbenzangen erlaubt einen großen effektiven Radius mit einer schmalen (deshalb leichten) wirksamen Fläche.

Die Dicke, speziell bei hoher thermischer Beanspruchung, ist ein Problem, vor allem wenn die Scheiben starr mit der Nabe verschraubt sind. Sehr dicke, aber innenbelüftete Scheiben schaffen Abhilfe durch gute Kühlung.

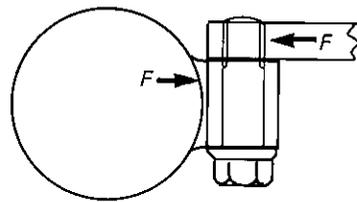


Abbildung 6.12 Die Befestigung des Bremssattels mit einem Bolzen in einem einzigen Arm.

Eine weitere Möglichkeit bieten schwimmend gelagerte Scheiben, die so dünn und leicht wie möglich ausgeführt sind und auf Bolzen gelagert werden, so daß sie sich frei bewegen, ausdehnen und zusammenziehen können. Durch eine geringe axiale Verschiebung können sie sich bei einigen Konstruktionen sogar relativ zum Rad bewegen. Trotzdem neigten einige Ausführungen anfangs zum Überhitzen und Brechen.

Egal ob die Scheibe direkt an die Radnabe angeschraubt oder über Adapter und Bolzen schwimmend gelagert ist, sind Bolzen und Schrauben hoch auf Scherung und Ermüdung beansprucht. Verwenden Sie geeignete Schrauben mit dem vorgeschriebenen Anzugsdrehmoment nur einmal. Benützen Sie Schraubensicherungsringe, flüssige Schraubensicherungen oder Sicherungsdraht, aber keinesfalls beschädigte oder verrostete Schrauben. Die Schrauben sollten hohe Festigkeit haben (die gesamte Scherkraft ist größer als an der Bremszangenbefestigung, obwohl sie auf mehrere Schrauben verteilt wird).

Die Passung und die Anlage der Scheibe im Adapter sollten einen einwandfreien Sitz gewährleisten.

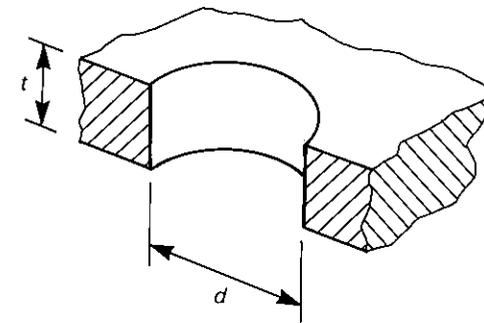


Abbildung 6.13 Bohrungen in den Scheiben sorgen nicht nur für geringeres Gewicht. Sie verändern, abhängig von den Abmessungen der Bohrungsdurchmesser  $d$  und der Scheibendicke  $t$ , auch die Oberfläche.

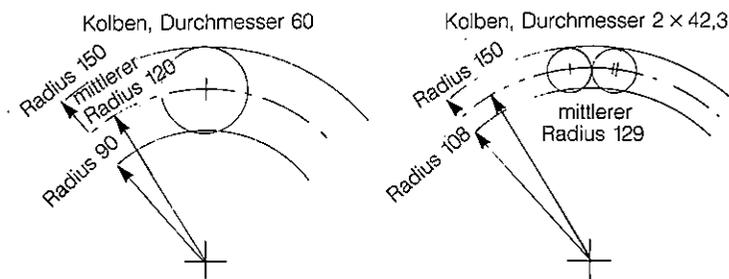
Das Bohren (und Nuten) von Bremscheiben kann verschiedene Auswirkungen haben: Erleichtern, Vergrößern der Oberfläche und Reinigen des Belags von Verschmutzungen.

Die Erleichterung der Scheibe hat wahrscheinlich die größten Auswirkungen. Jede Bohrung verringert Werkstoff und Gewicht. Selbstverständlich ist es wichtig, die Scheibe nicht zu schwächen. Bohrungen nahe beieinander auf dem gleichen Radius oder in radialer Anordnung anzubringen, ist nicht sinnvoll.

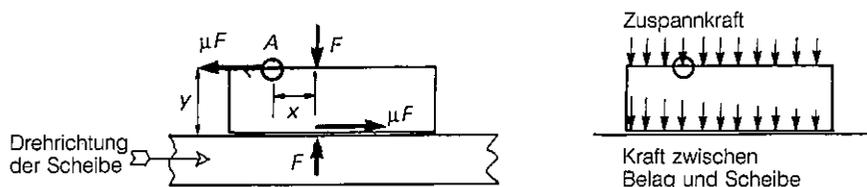
Da die Bohrungen am Belag vorbei laufen, verändert sich ständig die Kontaktfläche und damit der örtliche Druck. Das hilft vermutlich, den Belag vor Verglasung oder anderen Verunreinigungen auf der Oberfläche zu schützen.

Wenn die Scheibe weniger wiegt, erwärmt sie sich schneller. Sie erreicht bei einer vorgegebenen Wärmezufuhr eine höhere Temperatur. Bohrungen können die Oberfläche der Scheibe vergrößern, verringern oder auf dem gleichen Wert halten. Da die Kühlung der Scheibe in erster Linie von der Oberfläche abhängt, kann eine sorgfältige Auswahl der Bohrungsgrößen im Betrieb höhere oder geringere Temperaturen hervorrufen.

Falls die Dicke der Scheibe  $t$  und der Durchmesser der Bohrung  $d$  ist, beträgt die Belüftungsfläche der Bohrung, die von jeder Seite der Scheibe entfernt wurde,  $\pi d^2/4$ . Die Umfangsfläche der Bohrung ist  $\pi dt$ , so daß in Verbindung mit der Scheibe die Gesamtänderung der Oberfläche für  $n$  Bohrungen  $\pi n dt - \pi n d^2/2$  ausmacht.



**Abbildung 6.14 (a)** Der Vorteil von Vierkolbenzangen liegt in der Verwendung leichterer Scheiben. Falls die Scheibe denselben maximalen Radius von 150 Millimeter und die Bremszangen die gleiche Kolbenfläche aufweisen, hat die Vierkolbenzange einen größeren, mittleren Scheibenradius und ein größeres Bremsmoment von 7,2 Prozent bei gleicher Reibkraft zwischen Belag und Scheibe. Sie erlaubt auch einen um 24,3 Prozent schmalen Scheibenring, so daß sich das Gewicht um den gleichen Betrag verringert. Um, genau genommen, einen mittleren Radius zu erhalten, bei dem sich zu beiden Seiten die gleiche Belagfläche ergibt, ist es notwendig, den Mittelwert der Quadratwurzeln zu berechnen. Der effektive mittlere Radius ergibt dann 123,6 für die Zweikolbenzange und 130,5 Millimeter für die Vierkolbenkonstruktion. Der Gewinn an Bremsmoment beträgt dann 5,6 Prozent.



**Abbildung 6.14 (b)** Bei einem Belag, der gegen eine Scheibe gedrückt wird, und wie gezeigt, in einem Punkt A gelagert ist, verursachen die Kräfte auf den Belag ein Moment  $T (= \mu Fy - Fx)$ . Das führt dazu, daß der Druck an der auflaufenden Kante des Belags verstärkt und am ablaufenden Ende verringert wird. F greift im Druckmittelpunkt des Belags an. Um die Druckverteilung zu erhalten, ist es notwendig,  $Fx = \mu Fy$  zu setzen. Beachten Sie, daß x, wie hier gezeigt, positiv oder negativ und das auf den Belag wirkende Moment (bei steigendem Druck auf das ablaufende Ende) abhängig von den Abmessungen und dem Angriffspunkt der Haltebolzen des Belags positiv, null oder negativ sein kann. Bei Verwendung langer Beläge mit Kolben unterschiedlichen Durchmessers ändert sich die anfängliche Druckverteilung in der Art, daß sich das Druckzentrum zum größeren Kolben hin verschiebt.

Falls  $d < 2t$  ist, wird die Oberfläche größer.  
 Falls  $d = 2t$  ist, bleibt die Oberfläche gleich.  
 Falls  $d > 2t$  ist, nimmt die Oberfläche ab.

Die Änderung des Gewichts ist proportional zu  $\pi nd^2t/4$ , multipliziert mit der Dichte des Werkstoffs.

Der Werkstoff, der von den japanischen Herstellern bei Straßenmotorrädern bevorzugt wird, ist eine Legierung aus rostfreiem Stahl, während praktisch alle anderen Hersteller Gußscheiben bevorzugen. Bei der Verwendung in Rennmaschinen, bei denen die Kosten und der Verschleiß keinen hohen Stellenwert haben, wurden schon beschichtete Aluminiumlegierungen, Titan und Kohlefaser verwendet. Einen groben Überblick über die Eigenschaften einiger dieser Werkstoffe zeigt Tabelle 6.3.

Vorausgesetzt, daß Gußeisen billig und leicht zu produzieren ist, gute Verschleißigenschaften hat, und ein schlechter Wärmeleiter ist, und Wärmeschocks

widerstehen kann, ist es, abgesehen von der schnellen Korrosion, sinnvoll, darauf zurückzugreifen.

Der Seitenschlag für Bremscheiben liegt bei einer Scheibe mit den Abmessungen 5 mal 254 Millimeter in der Regel unter 0,15 Millimeter. Grundsätzlich wäre Seitenschlag null ideal. Falls aber die Hydraulik bewirkt, daß die Beläge schleifen (wie zum Beispiel bei den Yamaha RD 350-Modellen), ist ein geringer Seitenschlag (0,1 – 0,15 Millimeter) wünschenswert. Er drückt die Beläge von der Scheibe zurück, vermindert das Schleifen und vermeidet das Risiko des Überhitzens oder Verugasens der Belagoberfläche.

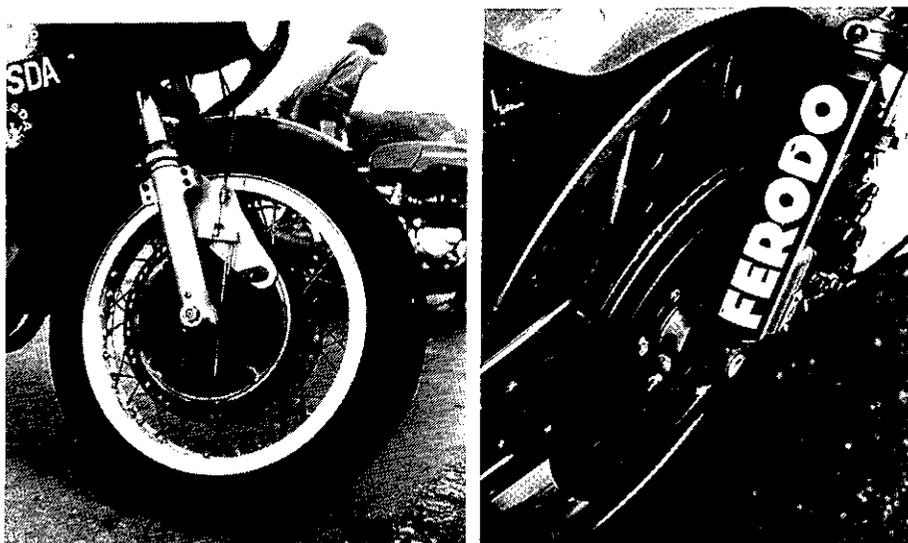
Falls das gesamte Belagspiel bekannt ist, kann der notwendige Hebelweg aus Gleichung 6.4 errechnet oder durch ein Rechenprogramm im Anhang ermittelt werden.

**Tabelle 6.3**

Scheibenwerkstoff	Grauguß	Stahl	rostfreier Stahl	Aluminiumlegierung	Titanlegierung
Dichte g/cm <sup>3</sup>	7,2	7,9–8,7	7,9–8,7	2,6–2,9	4,5
Härte HV	200–250	700–1000	130	–	–
Wärmeleitfähigkeit W/m-K	58	26–58	14	70–240	15,5
spezifische Wärme kJ/kg-K	0,5	0,42–0,49	0,5	0,94	0,47
Zugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	240–400	400–1000	400–1000	200–300	300–900
E-Modul x1000 N/mm <sup>2</sup>	121–175	206	206	70	110
Schmelzpunkt °C	1200	1450	1450	480–655	1670

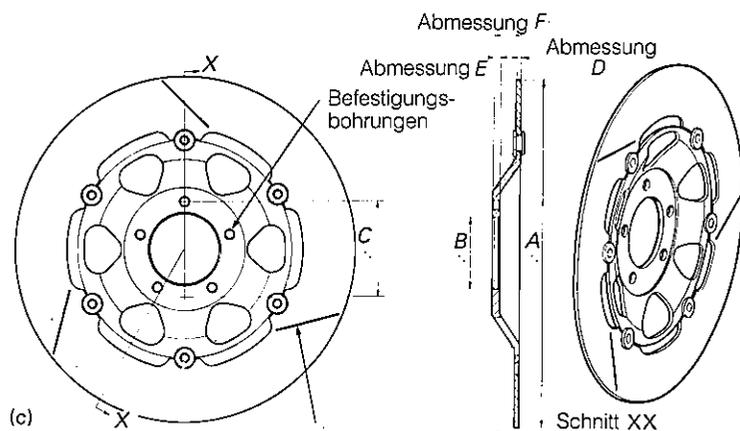
## 8. Anti-Dive

Anti-Dive ist das Zusammenwirken von Bremse und Vorderradaufhängung, das verhindert, daß die Federn zusammengedrückt werden und somit eine geringere Einfederung bewirkt. Man muß zwischen dem Einfederweg und der Einfedergergeschwindigkeit beim Bremsen unterscheiden. Berechnungen, wie Gleichung 6.6



**Abbildung 6.15** Bremsenentwicklung

(a) Diese Achtbacken-Trommelbremse (auf der Rückseite ist eine ähnliche Bremsankerplatte) war an der Dresda Triumph montiert, die 1970 die 24 Stunden von Barcelona gewann. (b) Die frühen, starr montierten Scheiben litten unter thermischen Problemen. Diese innenbelüftete Scheibe wurde an der Honda CB 1100 R verwendet.

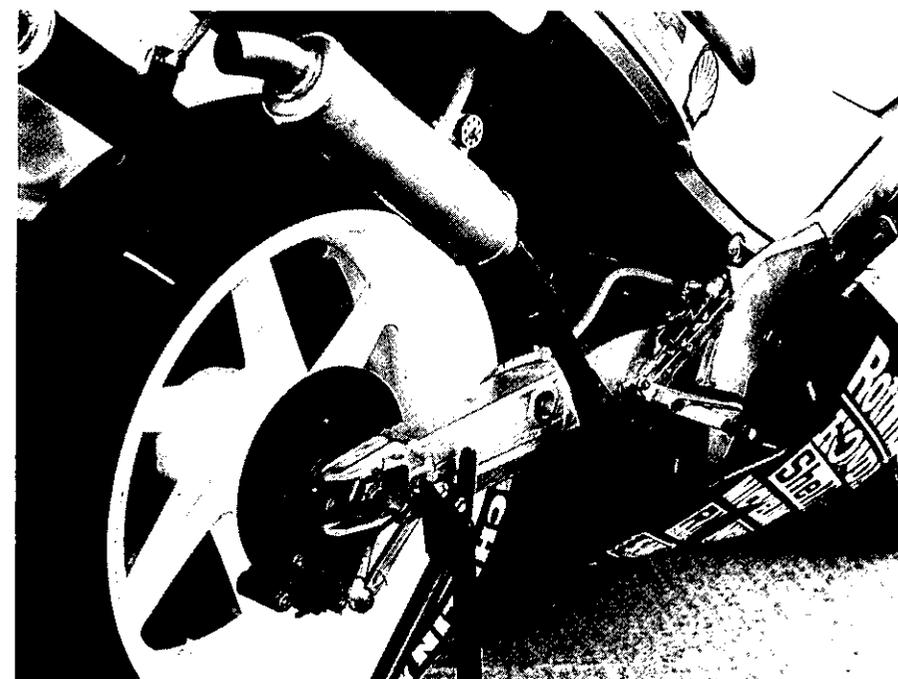


Drei schrägverlaufende Schlitze für rechte Bremsscheibe abgebildet, gegensinniger Verlauf bei linker Bremsscheibe

(c) Die bessere Lösung ist es, leichtere Scheiben zu verwenden, die von Bolzen auf einem Adapter gehalten werden. Sie geben den Scheiben ausreichend Bewegungsfreiheit sich auszudehnen (Automotive Products).

und das Rechenprogramm (siehe Anhang) zeigen, daß es eine optimale Höhe für den Schwerpunkt gibt, bei dem eine maximale Bremskraft erreicht werden kann. Der Betrag des Eintauchens kann manchmal beeinflusst werden, so daß die Schwerpunkts-höhe sich beim Bremsen in optimaler Lage befindet.

Wenn beim Bremsen der maximale Druck allmählich erreicht wird, nähert sich auch die Gewichtsverlagerung der endgültigen Position an. Falls der volle Druck sofort aufgebracht wird, kann das plötzliche Eintauchen der Vorderradaufhängung eine Regelung erschweren. Eine zeitweilige Anhebung der Federrate oder Druckstufen-dämpfung kann dazu verwendet werden, den Nachteil dieser schnellen Fahrzeugbewegung zu kompensieren, um dem Fahrer, unabhängig von der Änderung der Sitzhöhe, mehr Komfort und Kontrolle zu geben.

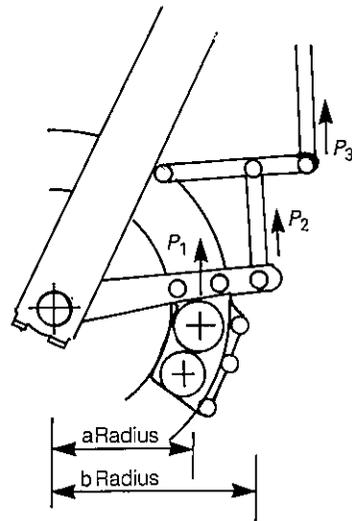


(d) Grand Prix-Motorräder (hier eine Honda von 1987) sind einen Schritt voraus. Es kommen leichte Kohlefaserscheiben zum Einsatz, die mit thermischen Belastungen besser fertig werden.

Es gibt drei Arten von Anti-Dive:

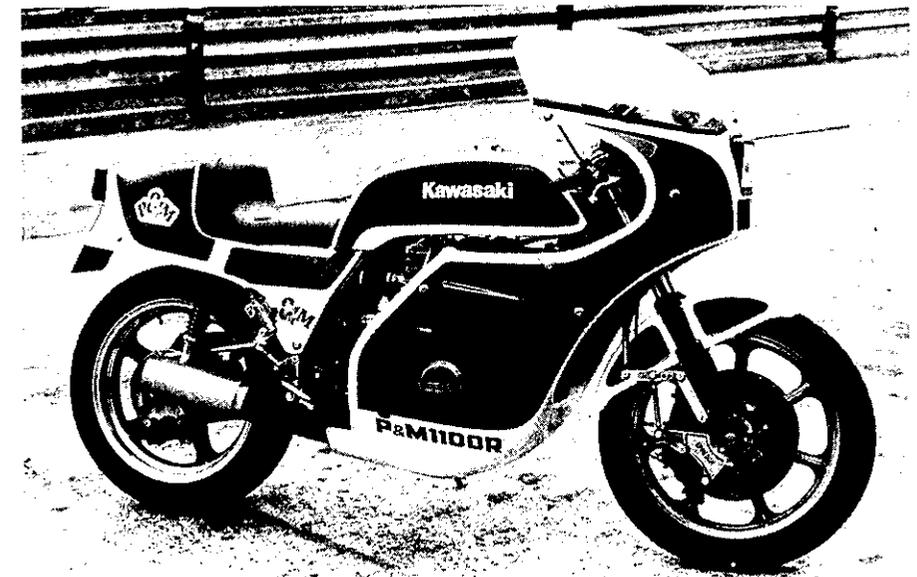
- (a) Einleitung des Bremsmoments in die Radaufhängung, um die Sitzhöhe und die Höhe des Schwerpunkts zu regeln.
- (b) Lastabhängige Radaufhängung, die teilweise die Sitzhöhe während dem Bremsen und den Weg, den die Radaufhängung eintaucht, regelt.
- (c) Nutzung der Bremse, um die Druckstufendämpfung zur Verringerung des Tauschens zu ändern.

Typ (a) gibt es in vielen Formen. Einige Gabeln mit Zug- oder Druckstreben hatten es als integrierten Bestandteil der Konstruktion. Eine ungewöhnliche Ausführung, die bei einer Honda in den frühen 70er Jahren auftauchte, war eine Vorderradaufhängung mit gelenkig gelagerten Hebeln, die tatsächlich während dem Bremsen ausfederte, so daß das Moment im Bremsanker augenscheinlich größer war als die Gewichtsverlagerung. Die Idee wurde von uns in einigen geschobenen Schwinggabeln verwirklicht, die wir für eine 125er Rennmaschine bauten. Sie war jedoch nicht perfekt ausgeführt und neigte dazu, die Radaufhängung vollständig zu blockieren, wenn die Bremse benutzt wurde. Andere untersuchten verschiedene Konstruktionen mit mehr Erfolg. Es gab eine BMW-Endurance-Rennmaschine, gefolgt von Kawasaki's Grand Prix-Rennmaschine, die Ron Williams Honda Britain F 1-Rennmaschinen und Peckett McNab-Motorräder, die alle ähnliche Hebelumlenkungen hatten. Das Drehmoment übertrug ein einstellbarer Hebel, so daß die auftretenden Kräfte in das gefederte Ende der Radaufhängung eingeleitet wurden.



**Abbildung 6.16** Mechanisches Anti-Dive. Das auf die Bremszange wirkende Moment kann durch eine Anordnung von mehreren Hebeln in eine kleinere oder größere Kraft übergeführt werden. In diesem Fall ist  $P_2 = P_1 a/b$ . Somit wird die aufzuwendende Kraft  $P_n$  in das gefederte Ende der Radaufhängung eingeleitet.

Die Reibkraft zwischen dem Belag und der Scheibe beträgt  $F_2 \mu_B$  (siehe Gleichung 6.3). Daraus muß das resultierende Moment auf die Bremszange  $F_2 \mu_B r_B$  sein, woraus  $r_B$  der wirksame Radius der Scheibe ist. In der Hebelumlenkung aus Figur 6.16 beträgt die Kraft in der ersten Strebe  $F_2 \mu_B r_B / r_1 \sin \alpha$ , woraus  $r_B$  die Länge des Hebelarms von der Radmitte aus und  $\alpha$  der Winkel zwischen diesem und der Strebe ist. Eine ähnliche Rechnung muß für die nachfolgenden Hebel aufgestellt werden, um die Kraft zu erhalten, die oben in die Radaufhängung eingeleitet wird. Das kann wiederum sehr schnell für verschiedene Werte errechnet werden, falls ein Rechenprogramm benutzt wird.



**Abbildung 6.17** Eine Straßenversion der P+M Formel F 1 – Maschine. Die gelenkig gelagerten Hebel haben eine Reihe von Bohrungen, so daß die Anti-Dive -Kraft eingestellt werden kann. Hier ist sie auf der niedrigsten Stufe justiert.

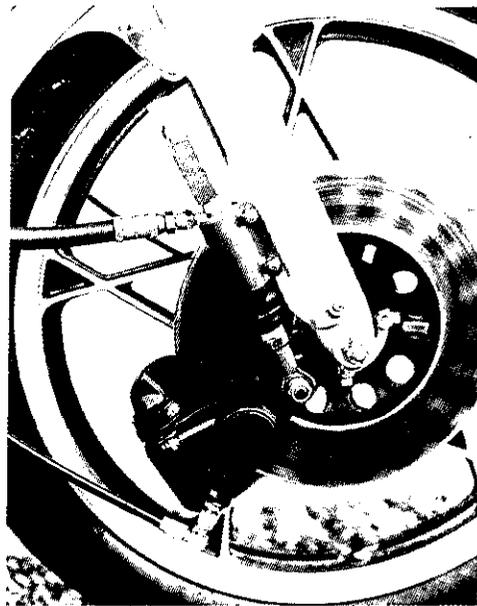
Typ (b), eine lastabhängige Radaufhängung kommt bei vielen Straßen- und Rennmotorrädern zur Anwendung. Wenn die Einfederung zunimmt, muß die Federrate (bei progressiver Federrate, siehe Kapitel 5) ebenso steigen. Progressiv gewickelte Federn und luftunterstützte Gabeln verhalten sich entsprechend. Die sich ändernde Federrate muß bekannt sein, um für eine gegebene Last die Einfederung errechnen zu können. Durch Anhebung des Ölstands in der Gabel wächst auch das Druckverhältnis an und ergibt dadurch eine stärker steigende Federrate. Einige Gabeln haben einen lastabhängigen Dämpfer. Wenn die Einfederung einen bestimmten Punkt überschreitet, schließt ein Ventil. Daraus resultiert ein starkes Anwachsen der Druckstufendämpfung.

Typ (c) gibt es in vielen Bauarten:

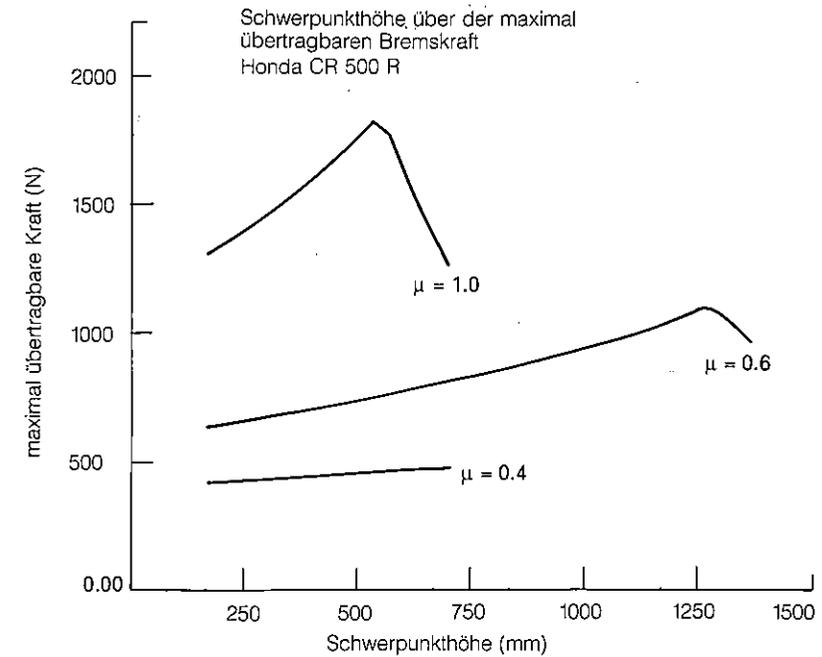
1. Der Druck in den Bremsleitungen wird verwendet, um ein Ventil im Dämpferkreislauf zu öffnen oder zu schließen, um höhere Dämpferkräfte zu erreichen (Suzuki, Kawasaki und Yamaha).
2. Die Verwendung eines Kolbens, der von der Bremszange betätigt wird. Die Bremszange wirkt während dem Bremsen auf den Kolben und erhöht die Druckstufendämpfung (Honda).
3. Durch den Bremslichtschalter wird ein elektrisches Magnetventil betätigt, das auf die entsprechenden Ventile im Kreislauf der Druckstufendämpfung wirkt (Kawasaki).

4. Eine Kombination (b) und (c) in einer australischen Patentanmeldung, bei der die Bremszange auf einen Kolben in der Hydraulik wirkt, so daß die Bremskraft sich auf den hydraulischen Kreislauf überträgt. Der Druck wird dazu verwendet, um zwei weitere Kolben am oberen Ende der Gabelfedern zu bewegen. Dadurch verschiebt sich die Federbasis, in Abhängigkeit von der Bremskraft.

Anti-Dive kann in seinen verschiedenen Ausführungen mehrere Aufgaben erfüllen. Es kann die Höhe des Schwerpunkts regeln. Es kann die Einfederung der Radaufhängungen während dem Bremsen verhindern und Stempeln reduzieren. Die Wirkung hängt jeweils vom Motorrad und der Straßenbeschaffenheit ab. Falls stärkere Federn oder eine höhere Dämpfung, zum Beispiel auf einem welligen Kurs, bessere Ergebnisse liefern, ist diese Art der Regelung den Aufwand wert. Wenn das Motorrad dazu neigt, am Vorderrad zu blockieren, kann die Anhebung des Schwerpunkts während dem Bremsen mehr Bremskraft ergeben (ebenso wie eine Schwerpunktsverlagerung nach vorn oder die Verwendung eines Reifens mit mehr Haftung). Mechanische Einrichtungen von Anti-Dive-Systemen können den Schwerpunkt während dem Bremsen anheben (oder daran hindern, zu stark abzusenken). Falls das Motorrad das Hinterrad während dem Bremsen anhebt, gibt es nur die Möglichkeit, den Schwerpunkt abzusenken (oder nach hinten zu verlagern). In diesem Fall wäre eine geringere Anti-Dive-Wirkung notwendig.



**Abbildung 6.18** Dieses Anti-Dive-System wurde von Barry Schultz in Australien um 1980 gebaut. Das auf die Bremszange wirkende Moment wird auf einen Hydraulikzylinder übertragen. Ein Nehmerzylinder am oberen Gabelbein drückt auf die Gabelfedern und verändert dadurch während dem Bremsen die Federbasis.



**Abbildung 6.19** Die Schwerpunkthöhe bestimmt die maximalen Bremskräfte am Vorderrad. Das zeigt sich, wenn man die Schwerpunkthöhe einer für Bergrennen modifizierten Honda CR 500 R ändert. Es ist offensichtlich wichtig, die Radaufhängungen so einzustellen, daß die Schwerpunkthöhe beim Bremsen auf trockener Fahrbahn in der Gegend von 800 Millimetern liegt. Bei Nässe ist sie um so günstiger, je höher sie liegt. Das Rechenprogramm im Anhang liefert Ergebnisse wie dieses sehr schnell. Durch Verschiebung des Schwerpunkts nach vorn oder Verringerung des Radstands erhält man verschiedene Werte für die optimale Höhe.

Der Wert des Anti-Dive als Mittel, die Bremskraft zu erhöhen, wurde während einiger Hochgeschwindigkeitstests auf der Zeitnahmegegraden in MIRA demonstriert. Dort gibt es eine zirka 270 Meter lange Bremsstrecke. Die schnellste Maschine, mit der wir dort fahren, war eine Suzuki GSX-R 1100, die aus einer Geschwindigkeit von 253 Kilometer pro Stunde mit genügend Auslauf zum Stehen kam. Die P + M Kawasaki 1100, die in Abbildung 6.17 gezeigt wurde, bremste auf nasser Fahrbahn genauso leicht aus einer Geschwindigkeit von 230 Kilometer pro Stunde. Wenn die Suzuki mit einem g verzögerte, (wobei sie nahe daran gelegen haben muß), verzögerte die P + M auf nasser Strecke mit 0,87 g.

Auf einer nassen Fahrbahn ist es offensichtlich, daß das Vorderrad leichter ins Rutschen kommt, als daß das Hinterrad abhebt. Dadurch hilft alles, was den Schwerpunkt anhebt, die Bremsleistung zu erhöhen.

Die graphische Darstellung in Abbildung 6.19 zeigt den Einfluß der Schwerpunkthöhe. Die Kurven errechnen sich aus den Daten einer Honda CR 500 R, die für Bergrennen modifiziert wurde. Dabei sind Beschleunigung und Bremsen äußerst wichtige Faktoren. Die Schwerpunkthöhe wurde gemessen (siehe Kapitel 2). Mit einigen Annahmen über die Reifenhaftung gaben wir die Daten in ein Rechenpro-

gramm ein, das im Anhang gezeigt wird. Die Schwerpunktshöhe wurde verändert und die Handkraft dann so weit angehoben, bis das Programm anzeigte, daß das Rad blockierte oder das Motorrad sich überschlug.

Aus diesen Grenzwerten zeichnete der Rechner das Diagramm in Abbildung 6.19, das zeigt, wie kritisch die Höhe ist. Es gibt die Schwerpunktshöhe während dem Bremsen an. Da das Programm auch die Radlasten errechnet, ist es möglich, die Federrate und die statische Sitzhöhe zu erarbeiten, die das gewünschte oder zumindest bestmögliche Resultat liefert. Die Ergebnisse müssen auf Straßentests übertragen werden. Dabei ergibt sich, daß wahlweise zwei Einstellungen notwendig sind: eine für griffige Fahrbahnen und eine für Strecken mit nasser oder rutschiger Oberfläche, bei denen ein hoher Schwerpunkt von Vorteil ist.

Diese Übung zeigt eine Reihe von interessanten Aussagen. Zuerst wie kritisch die Lage des Schwerpunkts ist. Ein Fehler von fünf Zentimetern in einer Richtung verringert die maximale Bremskraft um 320 Newton, also zwanzig Prozent. Eine Verschiebung von fünf Zentimetern in die andere Richtung wirkt sich weniger gravierend aus, würde aber immerhin noch 130 Newton oder acht Prozent der Gesamtkraft betragen. Bei einer Verschiebung in diese Richtung neigt das Vorderrad zum Blockieren. Da diese Daten für eine griffige Strecke zugrunde gelegt wurden, hat dieser Fall eher ernsthafte Auswirkungen auf einer schlechten oder nassen Oberfläche.

Zweitens, wo kann ein Testfahrer so klare Informationen erhalten wie hier? Einige Motorräder verhalten sich bei starkem Bremsen merklich besser als andere. Dagegen habe ich niemals gefühlt oder den Kommentar eines Fahrers gehört, daß ein Motorrad sich besser verhält, wenn es drei Zentimeter höher oder tiefer ist. Nun, da der kritische Punkt eingegrenzt ist, ist es relativ einfach, mit einer großen Höhe anzufangen, Tests zu fahren, und nach und nach das Motorrad abzusenken bis der Fahrer (und hoffentlich auch die Ergebnisse) ein optimales Niveau erreichen.

Drittens, da die Honda eine sehr hohe Maschine mit zirka 305 Millimetern Federweg ist, ist die erste instinktive Reaktion, sie so weit wie möglich abzusenken und dann die Tests zu beginnen. Selbstverständlich ist das nicht notwendig. Die Schwerpunktshöhe, die vom Programm vorgeschlagen wird, ist nicht unbedingt endgültig. Die Ergebnisse ändern sich, ebenso wenn man den Schwerpunkt vor- oder rückwärts verschiebt. Die endgültige Geometrie wird durch die Lage des Schwerpunkts während der Beschleunigung bestimmt (Verwenden Sie das Programm RL.BAS). Dann wählt man die Einstellung der Vorderradaufhängung, um eine optimale Höhe während dem Bremsen zu erzielen, sowie einen Wert für die Anti-Dive-Wirkung, falls notwendig.

Tatsächlich wird es notwendig sein, die gesamte Einstellung nachzurechnen, da alle Werte von der Fahrbahnbeschaffenheit abhängen. Falls sich das Motorrad unter einem Winkel  $\varphi$  zur Horizontalen an einer Steigung aufwärts bewegt, sind die Kräfte  $R_f$  und  $R_r$  nun die Radlasten im rechten Winkel zur Straßenoberfläche:

$$R_f + R_r = mg \cos \varphi$$

falls die Bremskraft  $F > \mu_w R_f$  ist, dreht der Reifen durch,

wenn  $F_{\max} = \mu_w R_f$  ist.

Das Motorrad überschlägt sich, wenn:

$$F < F_{\max}$$

und

$$F > mg (\text{cg}_x \cos \varphi / \text{cg}_y + \sin \varphi)$$

Für den Fall einer Bergabfahrt ersetzen Sie  $\varphi$  durch  $360 - \varphi$ , (wodurch der  $\sin \varphi$  negativ wird).

Ob ein Motorrad eine Anti-Dive-Einrichtung benötigt oder nicht, hängt vollständig von diesen Gleichungen ab. Bei Grand Prix-Motorrädern ist man davon abgegangen, sie zu verwenden, da diese sich immer überschlagen können. Sie benötigen, zumindest im Trockenen, eine Absenkung des Schwerpunkts, um die Bremsleistung zu verbessern. Viele andere Motorräder folgen einfach der Mode, die von den Grand Prix-Motorrädern eingeführt wurde, obwohl sie tatsächlich einen Nutzen aus einer Anti-Dive-Einrichtung ziehen können. Jedes Motorrad vom Crosser bis zum Straßenmotorrad, bei denen ein Blockieren des Vorderrads unter bestimmten Bedingungen entstehen kann, könnte Nutzen aus einer Anti-Dive-Einrichtung ziehen.

## 9. Pro Squat

Pro Squat ist das Gegenteil von Anti-Dive. Bei Einleitung des Bremsmoments in die Hinterradaufhängung werden die hinteren Federn zusammengedrückt. Dieser Effekt findet bei einigen Autos Anwendung (zusammen mit Anti-Squat, das die Hinterradaufhängung während dem Beschleunigen anhebt). Es kommt bei Motorrädern selten vor, da durch den kurzen Radstand und die große Schwerpunktshöhe während dem

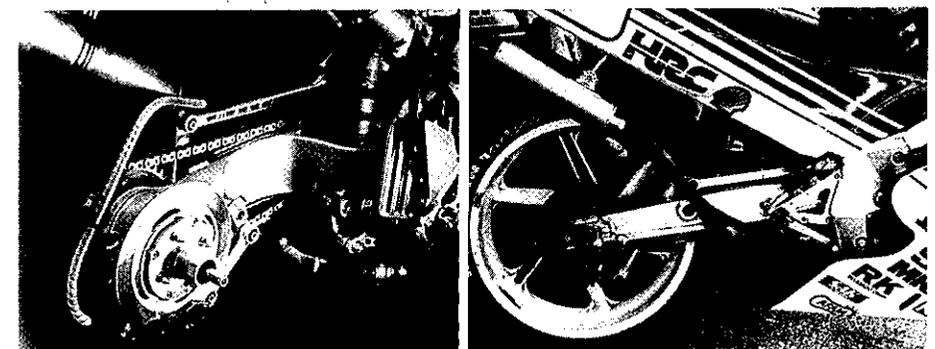


Abbildung 6.20 (a) und (b) Die Bremskraft am Hinterrad kann in die gefederten Teile des Motorrads in der Art eingeleitet werden, daß es die Hinterradfederung zusammen (Pro-Squat) oder, wie in diesem Falle, auseinanderdrückt. Honda benützte diesen Hebelmechanismus an der VFR 750 R (a) und an einigen Grand Prix-Rennmotorrädern, während andere, wie dieses Modell von 1987 mit Kohlefaserbrems Scheibe eine Hebelumlenkung hatten, um eine Anti-Squat-Wirkung zu erreichen (b).

Bremsen ein Abheben des Hinterrads möglich ist. Dadurch kann es nicht zur Bremskraft beitragen und sich nicht auf die Federbewegungen auswirken. Die Bremse ist so ausgeführt, daß die Kraft im Schwingarm versucht, die Feder zusammenzudrücken oder die gefederten Teile des Motorrads nach unten zu ziehen. Das ist nur von begrenztem Nutzen, da die Hinterradbremse nur dann wirksam ist, wenn das Hinterrad einigermaßen belastet ist. In diesem Fall gibt das blockierende Vorderrad die Grenzbedingungen vor. Eine Absenkung des Schwerpunkts, die zum Beispiel durch Pro-Squat erreicht wird, reduziert nur die Bremskraft, die notwendig ist, um das Vorderrad zu blockieren. Anti-Squat-Bremsen heben den Schwerpunkt an, wenn die Hinterradbremse betätigt wird. Sie erlauben vorn höhere Bremskräfte, wenn der Fahrer in der Lage ist, Vorder- und Hinterradbremse entsprechend zu modulieren. Erwähnenswert ist dabei noch, daß Honda Grand Prix-Motorräder zwischen 1987 und 1988 eine komplizierte Hebelübersetzung hatten, die die Hinterradaufhängung anhub, wenn die hintere Bremse betätigt wurde.

## 10. Anti-Blockier-Bremsen

Es ist wichtig, Anti-Blockier-Bremssysteme (ABS) zu betrachten, da sie bereits in verschiedenen Formen bestehen. In Automobilen haben sie schon ein beachtliches Potential gezeigt. Ob das System besser als ein erfahrener Fahrer ist, ist dabei nicht ausschlaggebend. Da das Anti-Blockier-System beim Pkw den Vorteil hat, nur eine (oder mehrere) Bremsen beeinflussen zu können, während der Fahrer über das Bremspedal stets alle vier betätigt. Bei Motorrädern hat es den Nachteil, nicht zwischen der Bremskraft und den in Schräglage auftretenden Kräften unterscheiden zu können. Die einfachen, erhältlichen Systeme (anfangs 1989) sind nur dann von Nutzen, wenn das Motorrad sich in geringer Schräglage befindet. Eine weiterentwickelte Regelung erlaubt in Zukunft vielleicht eine Bremsung während der Kurvenfahrt. Das ABS kann eventuell sogar bei Rennmaschinen Einzug halten, obwohl es für Straßen- und Tourenmotorräder entwickelt wurde, bei denen die Kosten und die Produkthaftung Vorrang vor erzielbaren Geschwindigkeiten haben.

## Trommelbremsen

Aus Sicht der reinen Leistungsfähigkeit haben Trommelbremsen den Nachteil, daß sie schwer sind und bei großen Durchmessern große Massenträgheitsmomente der Radnabe haben. Ihr Vorteil ist, daß sie durch einen simplen Zug oder ein Gestänge betätigt werden können und nur geringe Betätigungskräfte wegen der selbstverstärkenden Wirkung der Trommeln erfordern.

Abbildung 6.21 zeigt das Prinzip, wenn man ein kleines Element eines Bremsbelags mit einer Kraft  $F$ , die auf den Punkt  $A$  wirkt, gegen eine sich drehende Trommel drückt. Falls sich die Trommel im Uhrzeigersinn dreht, wirkt die Reibkraft zwischen ihr und dem Bremsbacken im Uhrzeigersinn auf den Backen, und entgegen dem Uhrzeigersinn auf die Trommel. Das Moment aller Kräfte, das im Punkt  $A$  wirkt, ist gleich null:

$$F_a = R_y + \mu R_x$$

woraus  $R$  die Reaktionskraft auf die Trommel entgegen dem Bremsbacken und  $\mu$  der Reibungskoeffizient zwischen den beiden ist.

Daraus ist

$$R = F_a / (y + \mu x)$$

Das ist der Fall, wenn die resultierende Kraft am ablaufenden Ende des Bremsbackens wirkt (sogenannter ablaufender Backen).

Falls nun die Richtung der Trommel umgedreht wird und entgegen dem Uhrzeigersinn läuft, dreht sich die Richtung der Reibkraft ebenso um. Daraus entsteht die Gleichung:

$$R_1 = F_a / (y - \mu x)$$

Für alle positiven Werte von  $x$ ,  $R_1$ , die größer als  $R$  sind, bedeutet das, daß die Reaktion auf die Trommel und die Bremskraft größer ist, wenn die Betätigungs kraft am auflaufenden Ende des Backens angreift (auflaufender Backen). Daher haben Trommelbremsen an Motorrädern in der Regel eine Betätigung über Nocken, die am auflaufenden Ende jedes Backens angreifen. Einige Konstruktionen haben vier oder sogar acht Backen.

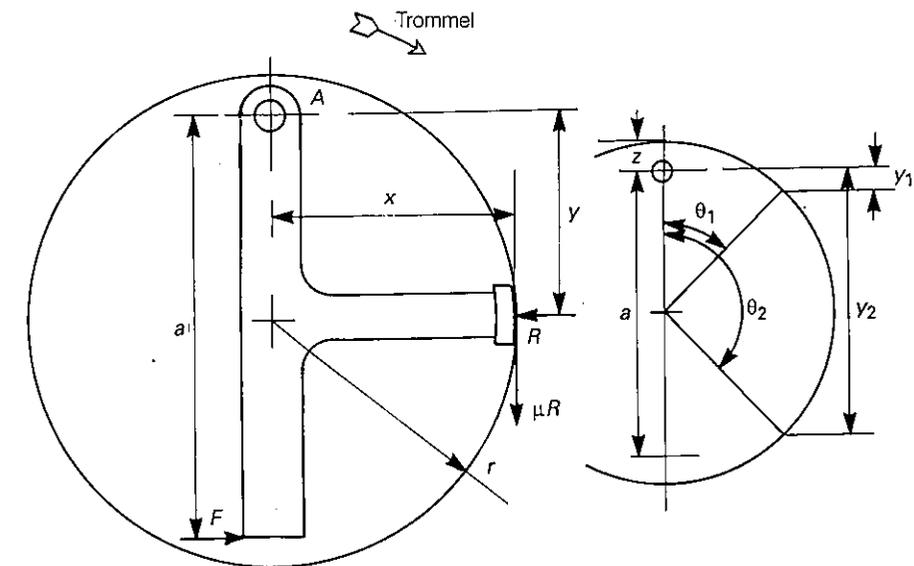


Abbildung 6.21 Prinzip einer Trommelbremse mit den wesentlichen Abmessungen und Kräften, die auf ein kleines Element des Bremsbackens wirken.

Wenn der Radius der Trommel  $r$  und der Abstand des Drehpunkts des Backens und der Trommel  $z$  ist, und sich der Backen um einen Winkel  $\varphi$  verschiebt, ist die gesamte Bremskraft die Summe aller Elemente über dem wirksamen Bogenmaß wie in Figur 6.21 gezeigt. Die Lage jedes Elements in Abhängigkeit zur Drehachse ( $x,y$ ) ist:

$$x = r \sin\varphi$$

$$y = r(1 - \cos\varphi) - z$$

die gesamte Bremskraft für jeden Backen beträgt:

$$\Sigma\mu R = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{\mu F a d\varphi}{r(1 - \cos\varphi) - z \pm \mu r \sin\varphi}$$

Beachten Sie, daß plus oder minus davon abhängen, ob der Backen auf- oder ablaufend ist.

Hersteller gehen dazu über, Bremsen durch einen sogenannten Bremsenfaktor zu beurteilen. Dieser ergibt sich aus der Bremskraft geteilt durch die eingeleitete Kraft. Er berücksichtigt den selbstverstärkenden Effekt und den Reibungskoeffizient. Für Trommelbremsen variiert der Bremsenfaktor zwischen eins und fünf. Er wächst exponentiell mit dem Reibungskoeffizient an. Eine zu große selbstverstärkende Wirkung ergibt speziell bei niederen Geschwindigkeiten eine schwierige Dosierung der Bremse und neigt dazu, Bremsenfading zu unterstützen. Sie kann reduziert werden, indem man Beläge mit einem geringeren Reibungskoeffizient benutzt oder das Bogenmaß, mit dem der Belag anliegt, verkürzt.

## Aerodynamik

Die aerodynamischen Kräfte, die auf ein Fahrzeug wirken, steigen mit dem Quadrat seiner Geschwindigkeit an. Da die Leistung das Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit ist, steigt die benötigte Leistung mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit. Anders ausgedrückt, falls vier PS notwendig sind, um eine Geschwindigkeit von 80 Kilometer pro Stunde zu erreichen, benötigt man für die doppelte Geschwindigkeit von 160 km/h ( $2^3 \times 4$ ) = 32 PS. Um 240 km/h zu erreichen, sind schon ( $3^3 \times 4$ ) = 108 PS) gleich 108 PS nötig. Ganz so einfach ist die Rechnung nicht, da einiges an Leistung aufgewendet werden muß, um den Rollwiderstand, die Reibung im Antrieb und den Bremsen und die Massenträgheit der bewegten Teile des Antriebs zu überwinden. Einige dieser Merkmale sind annäherungsweise konstant, andere sind von der Geschwindigkeit abhängig. Wenn jedoch die Geschwindigkeit ansteigt, überwiegen die aerodynamischen Kräfte. Es gibt einen Punkt, an dem für einen geringen Geschwindigkeitszuwachs eine enorme Mehrleistung benötigt wird, so daß es einfacher ist, die Widerstände zu reduzieren als nach mehr Leistung zu suchen. Das trifft für alle Geschwindigkeiten zu, außer wenn sie für 160 km/h einen 25 PS-Motor vorsehen, wenn ein 50 PS-Motor ebenso erhältlich ist. Außerdem ist es nicht einfach, Reduzierungen im Widerstand zu erreichen, wenn eine gewisse Größe und Form der Maschine nicht unterschritten werden kann und gewisse Grenzwerte, sowohl praktische als auch gesetzliche, die Formgebung bestimmen.

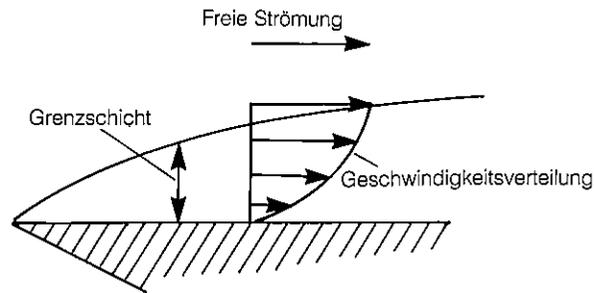
Wenn ein Körper mit hoher Geschwindigkeit die Luft verdrängt, bildet er eine Überdruckzone an seiner Vorderseite. Entlang den Seiten bricht die Strömung zum Teil ab und ergibt ein turbulentes Feld, das hinter sich eine Unterdruckzone bewirkt. Die Widerstandskraft ist die Differenz zwischen den Über- und Unterdruckzonen, die auf die projizierte Frontfläche des Motorrads wirken. Es entsteht Reibung zwischen der Luftströmung und der Verkleidung. Die ist jedoch bei den Geschwindigkeiten, die wir hier betrachten, sehr gering. Der Luftwiderstand leistet den mit Abstand höchsten Beitrag zum Gesamtwiderstand.

Der Luftwiderstand steigt, falls die Druckdifferenz wächst, die wirksame Fläche größer, die Geschwindigkeit höher und die Luftdichte größer ist:

$$\text{Luftwiderstandskraft} = 0,5 d A v^2 c_w$$

daraus ist  $d$  die Luftdichte,  $v$  die Geschwindigkeit,  $A$  die Frontfläche und  $c_w$  eine Konstante, der sogenannte Luftwiderstandsbeiwert, der ein Maß für die Windschüpfigkeit verschiedener Körper ist (bei gleicher Fläche, Geschwindigkeit und Luftdichte). Bei einer Temperatur von 0°C und einem Luftdruck von 1013 Millibar beträgt die Luftdichte 1,293 kg/m<sup>3</sup>.

Die Luft, die das Fahrzeug berührt, greift an ihm an und wird mitgerissen. Das heißt, die Geschwindigkeit relativ zum Fahrzeug beträgt null. Je größer der Abstand ist, um so stärker nimmt die Luftgeschwindigkeit progressiv zu (die Geschwindigkeitsänderung wird als Geschwindigkeitsgradient bezeichnet) bis sie die freie Luftgeschwindigkeit erreicht. Diesen Bereich zunehmender Geschwindigkeit bezeichnet man als Grenzschicht.



**Abbildung 7.1** Die Strömung nahe einer Oberfläche wird mitgerissen und hat die gleiche Geschwindigkeit. Mit zunehmendem Abstand verändert sich die Luftgeschwindigkeit allmählich (Geschwindigkeitsgradient) bis sie die freie Luftgeschwindigkeit erreicht. Diesen Bereich sich ändernder Geschwindigkeit nennt man Grenzschicht.

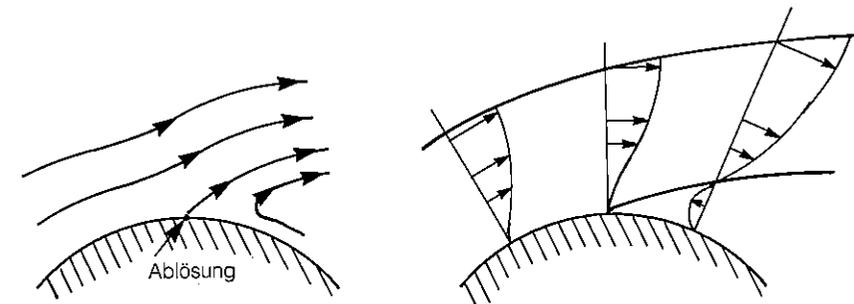
Ablösung erfolgt dort, wo sich die Grenzschicht von der Oberfläche löst. Die Strömung kann sich nach diesem Punkt umdrehen. Das führt zu einer großen Änderung in der Druckverteilung, was sogar Unterdruck bewirken kann. Mit hohem Druck an der Front und geringem Druck am Heck entsteht eine große Turbulenzzone und hoher Unterdruck, wenn die Ablösung in der Nähe der größten Breite des Fahrzeugs auftritt. Falls die Ablösung weiter nach hinten verschoben und der Sog schmäler gehalten werden kann, wirkt der Druck auf eine kleinere Fläche, der Widerstand ist geringer.

Die Widerstandskraft wirkt in der entgegengesetzten Richtung zur Bewegung des Fahrzeugs. Es ist auch möglich, daß eine Druckdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite des Fahrzeugs entsteht. Das verursacht aufwärts gerichteten Auftrieb oder abwärts gerichteten Abtrieb. Eine Druckdifferenz zwischen der einen und der anderen Seite des Fahrzeugs, versucht das Fahrzeug in Richtung des höheren Drucks zu drehen. Wenn eine Kraft seitlich angreift und das Druckzentrum hinter dem Schwerpunkt liegt, verhält sich das Fahrzeug wie eine Wetterfahne und dreht sich zur Seite des höheren Drucks. Ein gut ausbalanciertes Fahrzeug korrigiert sich selbst. Die Druckkraft dreht es zum Beispiel nach rechts, während ein Moment zwischen dem Druckzentrum und der Lenkachse es nach links einlenkt und zur rechten Seite neigt. Die beiden heben sich größtenteils gegenseitig auf. Falls das Druckzentrum sehr weit vorne liegt oder das Fahrzeug eine sehr große seitliche Fläche hat, wie es zum Beispiel bei den Vollverkleidungen der Rennmotorräder der 50er Jahre war, verursachen Seitenkräfte unvorhersehbare Kombinationen von Roll- und Giermomenten, woraus eine instabile Situation entsteht.

Falls sich ein Fahrzeug unter einem bestimmten Winkel zum Luftstrom bewegt (gieren), dann schließt die Frontfläche eine seitliche Projektion ein. Für ein langes, schmales Fahrzeug führt das zu einer deutlich größeren Fläche als die reine Frontprojektion. Dadurch ergibt sich bei gegebenen Druckverhältnissen ein größerer Widerstand. Die Kraft setzt sich aus dem Luftwiderstandsbeiwert mal der Fläche zusammen. Im allgemeinen können also die Widerstandskräfte reduziert werden durch:

1. Verringerung des Luftwiderstandsbeiwerts
2. Verringerung der Fläche,
3. Verringerung der wirksamen Fläche, das heißt Gestalten einer strömungsgünstigeren Form oder Verringerung des Luftwiderstandsbeiwerts

Punkt eins und drei hängen untrennbar miteinander zusammen. Eine schmale, strömungsgünstige Form durchdringt die Luft besser und verursacht minimale Turbulenzen oder Wirbelschleppen hinter sich (die meisten Fische und Vögel haben eine entsprechende Form entwickelt). Eine flache Platte mit der gleichen Frontfläche verhält sich so als ob sie viel größer ist und erzeugt ein breites Turbulenzfeld. Eine größere Druckkraft wirkt auf eine größere Fläche. Ein stumpf geformter Körper, wie zum Beispiel eine Kugel, erzeugt einen größeren Druckwiderstand, der aber nur auf seine tatsächliche Fläche wirkt.



**Abbildung 7.2** Dort, wo sich die Grenzschicht von der Oberfläche ablöst, entsteht eine Turbulenzzone, in der sich die örtliche Luftgeschwindigkeit sogar umdrehen kann.

Die Luft bei bodengebundenen Fahrzeugen zu zerteilen, ist schwierig. Punktförmige Frontflächen verursachen, selbst bis in Geschwindigkeiten von mehreren hundert Kilometern pro Stunde, keine großen Unterschiede. Wenn man eine Ablösung verhindern kann, und dadurch eine möglichst geringe Wirbelschleppe verursacht, ergeben sich, sogar bei geringen Geschwindigkeiten, Unterschiede. Die Form der Ellritze ist am strömungsgünstigsten. Sie bewegt sich mit dem stumpfen Ende voran. Bei Geschwindigkeiten, die Motorräder erreichen, wäre die Kugel aerodynamisch am günstigsten.

Das alles wurde schon vor langer Zeit erkannt. Jenatzy baute ein Rekordfahrzeug, das bereits 1899 99 Kilometer pro Stunde erreichte. Stromlinienprinzipien wurden in den zwanziger Jahren von Forschern und Konstrukteuren wie Rumpler, Dornier,

Bugatti, Jaray, Klemperer und in den dreißiger Jahren von Lange, Mauboussin, Lay, Kamm, Everling, Fishleigh, Heald und Reid angewandt. Das führte zu Konstruktionen wie Bugatti, Tatra 87, Chrysler Airflow, Volkswagen Käfer, Lange und später dem Citroen ID 19, Porsche 356 und 911.

In all diesen Fällen beabsichtigten die Konstrukteure die Luftströmung so lang wie möglich am Wagenkörper entlangzuführen, indem sie das Heck in einer sanft geschwungenen Form auslaufen ließen. Derselbe Gedanke liegt auch heutigen Konzeptcars und Rennwagen wie dem Peugeot Oxia, dem Porsche Carrera und 956, dem Peugeot 66, Mercedes C 111 und General Motor's 2002 zugrunde. Die Anforderungen an eine optimale Aerodynamik lassen sich aber nicht mit den praxisorientierten Bedingungen eines Alltagsautos in Einklang bringen. Wenn notwendige Details wie Spiegel, Kühler, unverkleidete Räder, Türgriffe, usw. angebracht werden, erweist es sich einfacher, eine praxistaugliche Form zu wählen und aerodynamisch zu optimieren. Deshalb haben auch Konzeptcars einen Cw unter 0,2, während fertige Produkte um zirka 0,3 liegen. Ein traditionelles Alltagsauto (0,4 oder mehr) könnte auf 0,3 abgesenkt werden und trotzdem noch praktische Anwendung finden. Die Audi 100-Generation zeigte das.

Soviel zu den Autos, denn bei Motorrädern wurde in dieser Richtung sehr wenig unternommen. Typische, verkleidete Motorräder sind vierzig Prozent schlechter als Autos. Ein Auto könnte die 1,66-fache Stirnfläche eines Motorrads haben und dabei denselben Luftwiderstand entwickeln. Rekordfahrzeuge verwendeten die übliche Form eines Torpedos. Für Rennmotorräder wurden in den 50er Jahren große Verkleidungen entwickelt. Man verbot sie daraufhin prompt, weil das weit vorn liegende Druckzentrum dafür verantwortlich sein sollte, daß die Motorräder instabil waren und hohe Giermomente aufwiesen. Die Delphin-Verkleidung, die gerade noch den Körper und die Beine des Fahrers schützte, wurde zur Norm und blieb größtenteils auf dem anfänglichen Entwicklungsstand stehen (sie wurden auch kaum verwendet) bis Straßenmotorräder Geschwindigkeiten von 230 km/h und Rennmaschinen Geschwindigkeiten von 260 km/h erreichten. Demnach hatten verschiedene Konstruktionen ein Prinzip aufgezeigt, bei dem Seiten- und Heckverkleidungen viel zu einer wirkungsvollen Stromlinie beitragen können. Sie wurden jedoch nie mit Methode entwickelt.

Seit den frühen 80er Jahren haben Motorradhersteller den Wert einer optimalen Verkleidung, den pragmatischen Weg, bei dem zum Beispiel Audi eine praxisnahe der rein theoretischen Tropfenform vorzog, erkannt. Sie nutzten es, um die Leistungsfähigkeit, die Fahreigenschaften und den Fahrerkomfort zu verbessern und neue Dimensionen im Styling zu erzielen.

Ursprünglich wurden Verkleidungen einfach um die Front eines bestehenden Motorrads gelegt. Jedes Ziel, die Windschlüpfrigkeit zu erhöhen, vereitelte die Vergrößerung der Frontfläche. Dann, als die ersten Brückenrahmen auftauchten, die seitlich am Motor vorbeigingen, wurde es einfacher, die Verkleidung zu befestigen und sie in die Maschine zu integrieren.

Die Verkleidung kann Scheinwerfer, Blinker, Spiegel und Instrumente aufnehmen, und einen großen Anteil der Masse und des Massenträgheitsmoments von der Lenkung fernhalten, was die Fahreigenschaften beträchtlich verbessert. Sie hält den Winddruck und das Wetter vom Fahrer ab, verbessert den Komfort und verringert die Ermüdung. Da sie im Gegensatz zu früher nicht mehr größer ausfällt als das Motorrad, verringert sie die Windkräfte und senkt das Druckzentrum ab. Das fördert die

Leistungsfähigkeit und verringert den Auftrieb an der Front des Motorrads. Gleichzeitig verbessert es damit die Stabilität und die Fahreigenschaften.

Auf diese Art kann das gesamte Motorrad optimiert werden. In der Verkleidung sind kleine Einlässe für die Kühler. Leitbleche verhindern, daß zuviel Luft unter den Tank gerät, wo sie nur Luftwiderstand verursacht. Luft wird gekühlt und unter hohem Druck zu den Vergasern geleitet. 1988 entwickelte eine Ducati 851 mit Kit im Stand nur 86 PS, erreichte aber 256 km/h (ein Indiz dafür, daß sie um 100 PS entwickelt, wenn sie sich mit dieser Geschwindigkeit fortbewegt). Vergleichen Sie diesen Wert mit der Honda CB 900 von 1979, die 83 PS leistete und 203 km/h schnell war oder der Suzuki GSX 1100 E von 1980, die mit einer Nachrüstverkleidung 120 PS benötigte, um 240 km/h zu erzielen.

Da es nur geringe Chancen gibt, eine stromlinienförmige Maschine zu entwickeln (die Regeln der FIM verboten Verkleidungen, die vor die Vorderachse reichten und bestimmten, daß Arme und Beine des Fahrers von der Seite gesehen werden können) ist der einzige Weg der, die bestehende Form zu optimieren. Um die Verhältnisse ins richtige Licht zu rücken, liegen bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h die möglichen Verbesserungen im Bereich von zwei bis fünf Kilometern pro Stunde, wenn zum Beispiel die Spiegel versetzt werden. Bei 80 km/h führt das zu einem vernachlässigbaren Gewinn. Umgedreht nimmt es an Bedeutung zu und ersetzt mehrere PS, wenn sich die Geschwindigkeit 240 km/h nähert. Es gibt verschiedene, wohlbekanntere aerodynamische Prinzipien, die an Details bei jedem Fahrzeug angewendet werden können. Eine stumpfe Form an der Front ist nicht ausschlaggebend. Die ersten wichtigen Flächen sind die, an denen die Verkleidung starke Rundungen oder eine plötzliche Formänderung aufweist. Die Gabel, das Rad, die Kanten der Scheibe und Verkleidung, Lufteinlässe, der Lenker, der Fahrer, all diese Formänderungen können ein Abreißen der Strömung von der Oberfläche bewirken und eine Turbulenzzone erzeugen. Falls das verhindert (oder verzögert) werden und die Verkleidung zu einer länger anliegenden Strömung beitragen kann, erzeugt das Motorrad einen geringeren Luftwiderstand.

Der Vorderreifen ist zuerst zu untersuchen. Die obere Seite bewegt sich mit der doppelten Geschwindigkeit des Fahrzeugs fort. Experimente ergaben, daß die Strömung sich unter einem Winkel von zirka 60 Grad vom obersten Punkt ablöst, das heißt, in einer Position um 10 Uhr, wenn das Motorrad von links betrachtet wird. Ein Kotflügel, der bis zu diesem Punkt verläuft, verhindert die Ablösung, und deckt die Höchstgeschwindigkeitszone des Reifens ab. Ironischerweise wäre das nach den FIM-Regeln nicht zulässig, falls aber der Kotflügel da ist, um Spritzwasser und Verschmutzung zu verhindern, und weniger als 45 Grad der Vertikalen abdeckt, wäre er erlaubt.

Derselbe Kotflügel kann die Gabelbeine abdecken und die Luft vom Motor zu der Seitenverkleidung ableiten. Die Radien von Kanten, die im Wind stehen, sollten so groß wie möglich sein. Es gibt einen kritischen Wert in der Gegend von 40 Millimetern. Geringere Radien verursachen eine Ablösung. Ein bestimmter Luftdurchsatz ist notwendig, um die Bremsen zu kühlen, was mit Sicherheit Turbulenzen verursacht. Aber eine turbulente Strömung mit geringem Druck hinter dem Vorderrad ist nicht schlecht. Sie verhindert, daß die Luft mit voller Geschwindigkeit auf den Motor trifft, was wie ein Schock wirken würde. Turbulente Luft mit geringer Geschwindigkeit ist für die Motorkühlung wirksamer, weil mehr Luft längere Zeit mit dem heißen Metall in

Kontakt kommt. Das ist für einen luftgekühlten Motor wichtig, wirkt sich aber auch bei flüssigkeitsgekühlten Motoren aus.

Kühlufteinlässe für Kühler oder Ölkühler sollten die Frontfläche des Motorrads nicht vergrößern und keine Stufen oder Ausbuchtungen bilden, die ein Abreißen der Strömung bewirken. Es ist günstiger, die Strömung im Bereich hinter der Gabel zu nutzen, wo sie eine geringere Geschwindigkeit als der freie Luftstrom hat (betrachten Sie das Motorrad als stehend und die Luft darum herum als bewegt). Führen Sie dann die Luft durch den Kühler und leiten Sie sie in einem Unterdruckbereich wieder ab. Dadurch kann ein Abreißen an der Front verhindert, Unterdruckbereiche an der Seite oder dem Heck ausgeglichen und somit die Widerstandskraft reduziert werden. Man kann dadurch auch vermeiden, daß heiße Luft vom Kühler auf andere Teile wie Zündungskomponenten oder Vergasereinlässe geleitet wird, die so kühl wie möglich arbeiten sollten.

Luftinlässe für Vergaser benötigen eine gleichmäßige Strömung hohen Drucks. Auch sie sollten nicht die Frontfläche vergrößern oder die Form stören und so klein wie möglich ausgeführt sein, um die benötigte Luftmenge sicherstellen zu können. Falls sie zu groß ausgeführt sind, verursachen sie einen zusätzlichen Widerstand, aber keinen Leistungszugewinn.

Die Strömungsverluste in Rohren hängen von deren Abmessungen ab. Sie verhalten sich proportional zur Länge und umgekehrt proportional zur Fläche. Wo eine Biegung besteht, wächst der Verlustkoeffizient über zehn Prozent, wenn:

$$r/d \leq 1 \text{ und } \varphi > 40^\circ$$

$$r/d \leq 2 \text{ und } \varphi > 45^\circ$$

$$r/d \leq 4 \text{ und } \varphi > 60^\circ$$

$$r/d \leq 6 \text{ und } \varphi > 90^\circ$$

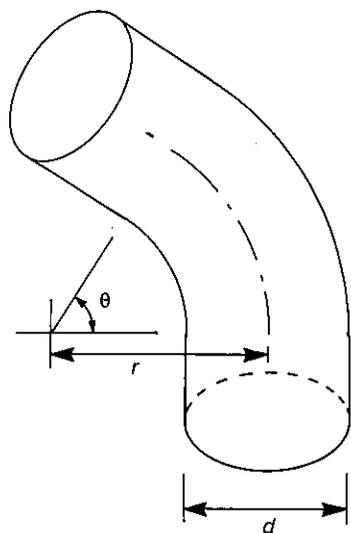


Abbildung 7.3 Strömungsverluste im Inneren von Rohren hängen von ihren Abmessungen, dem Durchmesser  $d$  des Rohres, dem Radius  $r$  der Biegung und dem Winkel  $\varphi$  der Biegung ab.

Dabei ist  $r$  der Radius der Biegung,  $d$  der Durchmesser des Rohrs und  $\varphi$  der Winkel, um den das Rohr gebogen ist.

Daher sollte für eine 90 Grad-Biegung der Radius der Biegung nicht enger als sechs mal der Durchmesser des Rohres sein, um die Verluste in vertretbaren Grenzen zu halten. Ein gewelltes Rohr verhält sich annähernd wie ein gerades Rohr mit beträchtlich kleinerem Durchmesser.

Der Eingang eines Rohrs sollte gut verrundet sein. Der Verlustkoeffizient für ein scharf abgeschnittenes Rohr kann mehr als 50 Prozent betragen ( das heißt, er verhält sich wie ein Rohr mit der halben Querschnittsfläche).

Querschnittsänderungen in Rohren sollten allmählich erfolgen. Im allgemeinen sollte ein Diffusor (ein sich erweiternder Konus) einen Winkel von nicht mehr als fünfzehn Grad haben. Der Verlustkoeffizient ist proportional zur Länge und der Querschnittsänderung. Eine Düse (sich verengender Konus) hat eine drosselnde Wirkung,

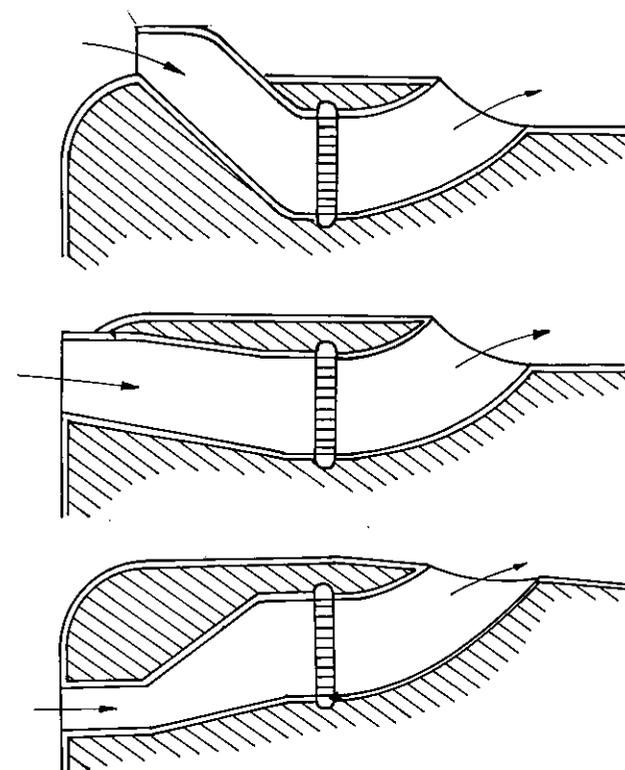


Abbildung 7.4 Mögliche Ausführungen von Kühlluftinlässen. Oben: ungünstige Ausführung. Der Luft-einlaß vergrößert die gesamte Frontfläche und bildet eine scharfe Kante, die Turbulenzen verursacht. Mitte: ungünstig. Ein großer, scharfkantiger Luft-eintritt, der mehr Luft als notwendig aufnimmt und im Inneren hohen Druck aufbaut. Unten: besser. Ein Luft-einlaß optimaler Größe, der genügend Strömungs-geschwindigkeit im Inneren sicherstellt. Er ist im Bereich hohen Drucks angebracht, vergrößert aber die Frontfläche nicht. Der Eintritt sollte verrundet und Druckaufbau am Kühler zu vermeiden. Möglicherweise können auch Turbulenzen auftreten, die einen maximalen Wärmeaustausch am Kühler sicherstellen. Der Ausgang wird in sanften Rundungen in einen Bereich niederen Drucks geleitet.

die einen Druckanstieg, in der Regel aber keine Turbulenz bewirkt. Plötzliche Erweiterungen in jeglicher Richtung verursachen Turbulenzen und verringern normalerweise die Strömungskapazität eines Rohres. Rohre und die dazugehörigen Einlässe sollten auf die Luftbedürfnisse des Motors (siehe Anhang) abgestimmt sein, obwohl die Strömung im Rohr offensichtlich mit der Geschwindigkeit des Motorrads variiert. Für Hochgeschwindigkeitsbereiche liefern kleinere Rohre den benötigten Luftdurchsatz bei geringstem Luftwiderstand.

Der Körper des Fahrers verursacht mit Sicherheit Ablösungen. Möglicherweise verringern Seiten- und Heckverkleidungen eine Verwirbelung der Strömung oder die Größe des Unterdruckbereichs. Tests mit Lkws, die in der Kolonne fahren, zeigten, wie erwartet, daß der Luftwiderstand beim zweiten und dritten Lkw um dreißig bis sechzig Prozent, je nach Abstand dazwischen, abnahm. Der Luftwiderstand des führenden Lkw's konnte ebenfalls um bis zu fünfzehn Prozent, einfach durch Anwesenheit der nachfolgenden Fahrzeuge verringert werden. Daher kann ein Gegenstand, der die Wirbelschleppung ausfüllt, selbst wenn er nicht mit dem Fahrzeug verbunden ist, den Widerstand reduzieren. Die gegenseitige Beeinflussung der Fahrzeuge kann zum Beispiel auf Autobahnen gespürt werden, wenn ein großer Lkw sehr dicht auf ihr Fahrzeug auffährt (ihr Fahrzeug beschleunigt dann) oder sie überholt (auf halber Höhe bremst die Interferenz ihr Fahrzeug ab, anschließend beschleunigt ihr Fahrzeug im Windschatten des Lkw's).

## Empirische Analyse

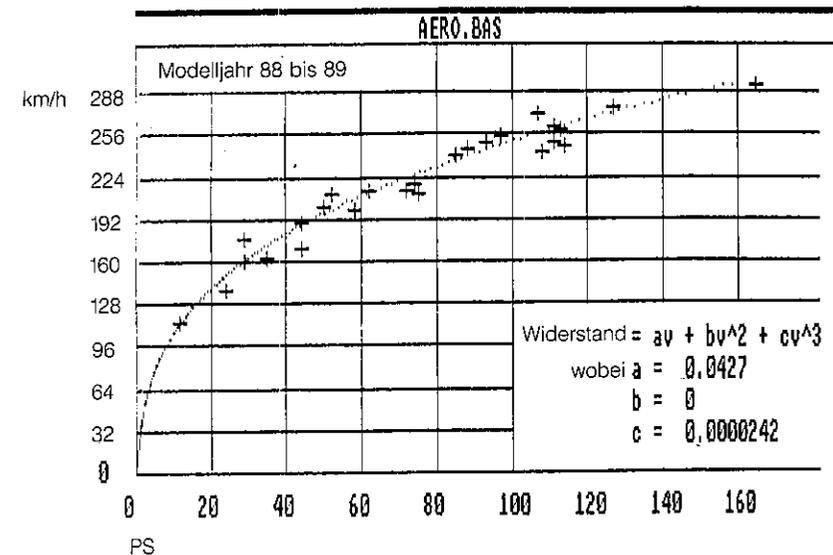
Die Formgebung der Verkleidung unterliegt in der Regel anderen Anforderungen wie dem Rennreglement oder praktischen Notwendigkeiten wie zum Beispiel Rückspiegeln. In diesem Fall muß sichergestellt werden, daß die Form nicht schlechter als nötig ist. Beim Testen tritt das Problem auf, daß die Veränderungen oft sehr gering sind. Sogar im Windkanal treten Probleme auf, die Wirkung des bewegten Bodens oder der Räder zu simulieren.

Um Änderungen im Straßentest herauszufinden, ist es wesentlich, daß sich das Wetter nicht stark verändert, da sich sonst die aerodynamischen Bedingungen ändern und kleine Unterschiede nicht reproduzierbar sind. Diese Probleme kann die Verwendung von Testreihen verringern, da über den gesamten Bereich verschiedener Wetterbedingungen abweichende Resultate korrigiert werden können.

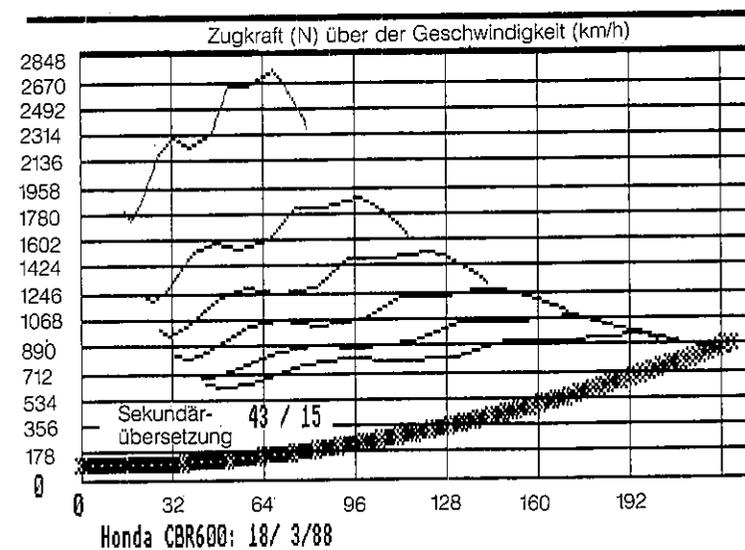
Wenn Sie zum Beispiel die Spitzenleistung über der Höchstgeschwindigkeit oder der maximalen Luftgeschwindigkeit) für mehrere Maschinen ausdrucken, ist es möglich, einen Durchschnittswert zu erhalten, aus dem ersichtlich ist, ob ein bestimmtes Motorrad vom Gros abweicht. Im Anhang gibt es ein Rechenprogramm für diesen Zweck. Es ist möglich zu sehen, wie sich Motorräder im Lauf der Zeit verändert haben, Motorräder ähnlicher Größe miteinander zu vergleichen oder aber auch eine Kurve für eine Maschine mit unterschiedlichen Motorleistungen auszudrucken.

Es ist auch möglich, eine charakteristische Kurve zu erstellen, die mit der gemessenen Leistung übereinstimmt und die Form hat:

$$\text{Widerstandkraft} = a + bv + cv^2$$



**Abbildung 7.5** Ein Rechenausdruck von 26 von Performance Bikes 1988 und 1989 getesteten Modellen zeigt die Höchstgeschwindigkeit über der Spitzenleistung (das Programm dafür steht im Anhang). Das Programm zeichnet auch eine Reihe von Kurven in der Form Widerstand  $hp = av + bv^2 + cv^3$ , wobei  $v$  die Geschwindigkeit und  $a$ ,  $b$  und  $c$  Konstante sind, die beliebig geändert werden können. Die abgebildete Kurve gibt die durchschnittlichen, aerodynamischen Eigenschaften sehr gut wieder. Sie kann genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit sehr genau vorauszusagen.



**Abbildung 7.6** Die Widerstandswerte aus Abbildung 7.5 werden hier verwendet, um die Kurve des Gesamtwiderstands im Vergleich zur Zugkraft der Honda CBR 600 herzustellen. Dort wo sich Zugkraft und Widerstandslinie kreuzen, tritt bei dieser Übersetzung die Höchstgeschwindigkeit ein.

wobei  $v$  die Luftgeschwindigkeit und  $a$ ,  $b$  und  $c$  Konstante für dieses Motorrad sind. Diese Charakteristik kann dann benützt werden, um die Leistung vorauszusagen und die benötigte Übersetzung für neue Leistungsvarianten auszuarbeiten. Beachten Sie dabei, daß die Widerstandskraft nicht vollständig aus dem Luftwiderstand besteht. Sie schließt ebenso den, von den Reifen verursachten Rollwiderstand, den Bremsenwiderstand und den Reibungswiderstand in den Radlagern und dem Triebstrang ein. Weitere Leistung wird vom Massenträgheitsmoment der rotierenden Teile verzehrt. Das spielt dann keine Rolle, wenn Gesamtberechnungen für die Übersetzung getroffen sind. Schwieriger ist es dagegen, die aerodynamische Komponente herauszuarbeiten.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für echte Tests, die in Kapitel 12 stärker aufgeschlüsselt werden. Sie sind:

1. Windkanal
2. Höchstgeschwindigkeit
3. Beschleunigung
4. Auslaufversuch

## 1. Windkanaltests

Bei diesen Tests werden die Widerstandskräfte und die Auftriebskräfte des Motorrads bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Gierwinkeln gemessen. Das Problem neben den Kosten für einen Windkanal im Maßstab 1:1 besteht darin, die Bewegung des Bodens oder der Räder zu simulieren.

Die Widerstandskraft  $= 0,5 \cdot dv^2 \cdot c_w \cdot A$ . Da die Luftdichte  $d$  und die Geschwindigkeit  $v$  einfach zu messen sind, während das bei der Frontfläche  $A$  schon schwieriger ist, wird der Wert  $c_w \cdot A$  oft als Vergleichsmaßstab benützt. Er gibt Auskunft über den Luftwiderstand des gesamten Motorrads, differenziert aber nicht, ob ein Wert aufgrund der guten Aerodynamik oder der schmalen Frontfläche gering ausfällt.

Die deutsche Zeitschrift MOTORRAD veröffentlichte in ihrer Ausgabe vom 21. März 1987 zusammen mit einigen Werten von Pkws, die aus der Klimakammer von VW stammen, Testergebnisse aus dem BMW-Windkanal, die in Tabelle 7.1 zusammengefaßt sind. Beide benützen das Produkt aus  $c_w \cdot A$ , wodurch Pkws größere Gesamtwiderstände haben. Eine Größenordnung ihrer Windschlüpfigkeit kann aber aus der Tatsache entnommen werden, daß die Frontfläche eines Big Bikes ohne Fahrer im Bereich von 0,55 bis 0,63  $m^2$  liegt. Die Frontfläche eines Pkws, wie dem Ford Escort, beläuft sich auf 1,8  $m^2$ , während ein größerer Pkw wie der Renault 25 eine Fläche von 2  $m^2$  hat. Obwohl Pkws ungefähr die dreifache Fläche aufweisen, haben sie nur die 1,5-fache Widerstandskraft, woraus sich ergibt, daß sie doppelt so windschlüpfrig sind wie die meisten Motorräder.

## 2. Höchstgeschwindigkeit

Bei einer bekannten Maximalleistung ergibt sich ein guter Vergleich für die aerodynamischen Qualitäten, da bei Höchstgeschwindigkeit der Luftwiderstand die

dominierende Größe ist. Oft gibt es Probleme, eine geeignete Meßstrecke zu finden. Die meisten Rennkurse haben Geraden, die nicht lang genug sind. Ein weiteres Problem ist die Kompensation der Windgeschwindigkeit. Eine Messung der Windgeschwindigkeit am Fahrzeug ist eine Möglichkeit, auf einen ruhigen Tag zu warten, eine andere.

**Tabelle 7.1** Vergleich der Luftwiderstandswerte

Fahrzeug	$c_w \cdot A$ ( $m^2$ ) mit liegendem Fahrer	Fahrer aufrecht
Honda RS 500 (1984)	0,243	—
Yamaha TZ 250 (1985)	0,269	0,366
Aprilia AFI	0,291	0,444
Yamaha TZR 250	0,296	0,421
Bimota DB 1	0,319	0,372
Ducati Paso	0,331	0,459
Ducati 750 SS	0,341	0,438
Honda CBR 1000 F	0,349	0,438
Yamaha FZR 1000	0,351	0,404
Kawasaki GPZ 1000 RX	0,354	0,474
Kawasaki GPZ 900 R	0,361	0,443
Honda VFR 750 F	0,366	0,447
Suzuki GSX-R 1100	0,398	0,430
Honda VF 1000 F	0,400	0,455
BMW K 100 RS	0,402	0,429
Suzuki GSX-R 750	0,410	0,455
Suzuki GSX 1100 EF	0,412	0,444
BMNW K 75 S	0,414	0,439
Yamaha FJ 1100	0,433	0,483
BMW R 100 RS	—	0,435
BMW K 100 RT	—	0,495
Honda XL 600 Transalp	—	0,515
Vincent Black Prince (1953)	—	0,562
Kawasaki KLR 600	—	0,565
Kawasaki 1000 GTR	—	0,605
Porsche 924	—	0,56–0,59
Renault 25 TS	—	0,61–0,63
Peugeot 205 GL	—	0,61–0,64
Ford Escort 1,3 GL	—	0,71–0,75
Citroen 2 CV	—	0,84–0,86

Motorraddaten, veröffentlicht in MOTORRAD, 3/1987, Pkw-Daten von B. Heil

Falls die Aerodynamik so weit verändert wurde, daß eine höhere Geschwindigkeit erreicht wird, müssen die Leistungscharakteristik und die Gesamtübersetzung in Betracht gezogen werden. Das Motorrad wird nicht schneller sein, wenn die Motordrehzahl in einen Bereich kommt, in dem die Leistung unter das benötigte Niveau für diese Geschwindigkeit abfällt.

Änderungen der umgebenden Bedingungen wirken sich sowohl auf die Motorleistung als auch auf den Widerstand aus. Der Luftwiderstand ist direkt proportional zur Luftdichte. Standardkorrekturfaktoren für Motortests zeigen, daß bei steigendem Luftdruck oder sinkender Temperatur das Motordrehmoment und der Luftwiderstand anwachsen. Der Luftwiderstand steigt aber stärker als die Motorleistung an. Falls der Luftdruck abnimmt, verringert sich auch die Luftdichte, das Motordrehmoment nimmt aber geringfügig stärker ab als der Luftwiderstand. Wenn die Lufttemperatur steigt, fällt die Luftdichte. In diesem Fall nimmt das Motordrehmoment weniger ab als der Luftwiderstand. Jede Zunahme der Luftfeuchtigkeit wirkt sich wie eine Zunahme der Luftdichte aus, wodurch der Luftwiderstand betroffen ist. Da sie aber ein zusätzlicher, untrennbarer Bestandteil der Luft ist, erhöht sich das Motordrehmoment nicht (tatsächlich entsteht daraus oft eine Verbesserung der Verbrennung und ein besserer Wärmübergang, der erhöhte Luftwiderstand behält aber die Oberhand).

### 3. Beschleunigungstests

Beschleunigungstests mit stehendem Start und durchgeschalteten Gängen erfordern Geschick und Gleichmäßigkeit vom Fahrer, einheitliche Bedingungen der Straßenoberfläche und sind schwierig zu messen. Die Aerodynamik ist nur eine von vier oder fünf Faktoren, die die Leistungsfähigkeit beeinflussen können. Durchzugsmessungen im großen Gang, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten, sind am verlässlichsten (falls es nicht möglich ist, die Höchstgeschwindigkeit zu erreichen), indem man die Zeit oder den Abstand von einer Geschwindigkeit zur anderen mißt. Auch hier ist wesentlich, daß kein Wind geht und die Luftdichte nicht mehr als einige Prozent variiert.

### 4. Auslaufversuche (siehe Kapitel 11)

Falls das Motorrad auf einer ebenen Straße auf eine bestimmte Geschwindigkeit gebracht und dann der Antriebsstrang unterbrochen wird, verzögert es mit einem Betrag, der proportional zum gesamten wirksamen Widerstand ist. Er ergibt sich aus einer Kombination von Luftwiderstand, Rollwiderstand, Widerstand in Antriebsstrang und Kupplung.

Aerodynamische Kräfte sind bei Höchstgeschwindigkeit am größten, weshalb Auslaufversuche bei hohen Geschwindigkeiten durchgeführt werden sollten. Falls davon ein höherer als der zweite Gang betroffen ist, ist es nicht möglich, in den Leerlauf zu schalten, um den Antriebsstrang zu unterbrechen. Um herauszufinden, ob der Kupplungswiderstand wesentlich ist, werden zwei Auslaufversuche mit der

Höchstgeschwindigkeit im zweiten Gang durchgeführt: einer im Leerlauf, der andere mit gezogener Kupplung. Falls der Kupplungswiderstand die Ergebnisse beeinträchtigt, muß er verringert werden, indem die Kupplung anders eingestellt wird oder die Tests im zweiten Gang durchgeführt werden.

Um die Verzögerung des Motorrads zu ermitteln, muß man den Zeitintervall zwischen den beiden Geschwindigkeiten messen. Die gesamte Widerstandskraft bei dieser Geschwindigkeit ergibt sich aus der Gesamtmasse, multipliziert mit seiner Beschleunigung (Beachten Sie, daß die Masse des Motorrads in diesem Fall wegen der Massenträgheit der rotierenden Teile größer ist als seine statische Masse). Daher müssen Sie bei der Auswertung dieses Tests sorgfältig vorgehen (siehe Kapitel 11).

Es kann nützlich sein, einen Wert für  $c_w$  oder  $c_w A$  herauszufinden. Es ist auch möglich, Änderungen der Windgeschwindigkeit und der Luftdichte zu korrigieren, der wahre Wert solcher Tests liegt aber im schnellen direkten Vergleich, bei dem solche Korrekturen nicht notwendig sind.

Die Tests sollen eine Änderung in der Aerodynamik des Motorrads registrieren. Sie zeigen auch Änderungen im Rollwiderstand und im Massenträgheitsmoment auf und können zum Beispiel benutzt werden, um die Wirkung schleifender Bremsbeläge herauszufinden (siehe Kapitel 11). In der Regel reicht es zu wissen, daß Verbesserungen in der Leistungsausbeute erreicht wurden. Daher sind die Zeiten für sich ausreichend, es ist aber wichtig, so viele Tests wie möglich durchzuführen, um fehlerhafte Ergebnisse auszufiltern (die in der Regel durch Bedienungsfehler verursacht werden) und von den restlichen einen Durchschnitt zu bilden oder eine Kurve auszudrucken, die die Streubreite der Ergebnisse zeigt. Diese Streubreite ist ein Maß für die Genauigkeit dieses Tests. Sie sollte so groß sein, wie die Veränderungen, die sie erarbeiten wollen.

Letztendlich sind Auslaufversuche ein geeigneter Weg zu überprüfen, ob sich irgendetwas seit den vorangegangenen Leistungstests verändert hat. Unterschiedliche Auslaufzeiten zeigen die Auswirkung von Änderungen, die sich in der Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigung niederschlagen.

### Modifikationen

Es gibt verschiedene Ansatzpunkte, die verbessert werden können:

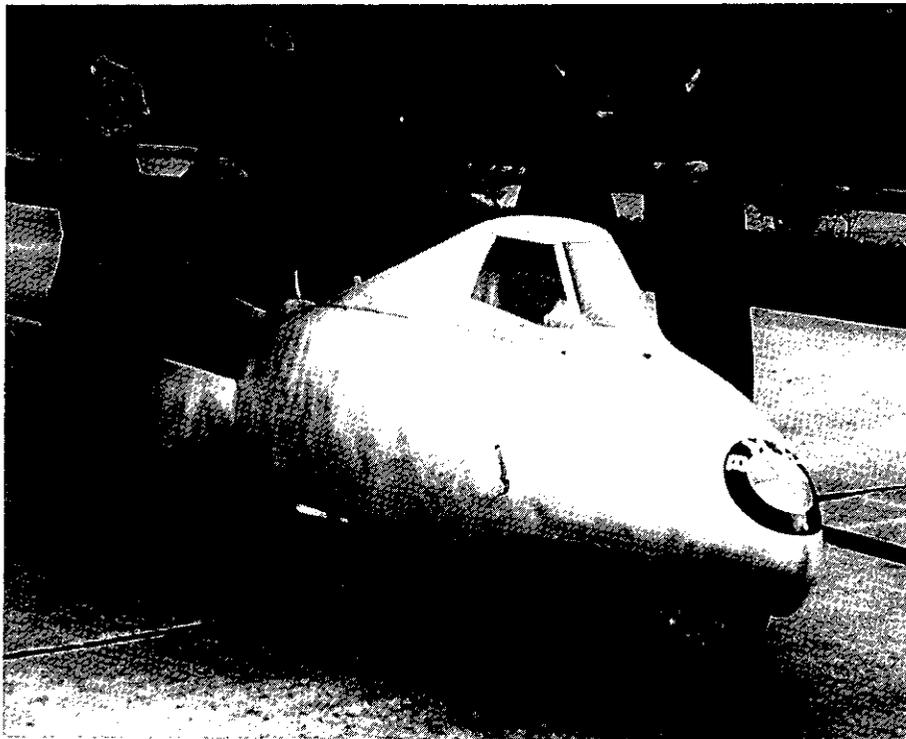
1. Verringerung der Frontfläche
2. Verringerung der projizierten Fläche durch geringere Gierwinkel
3. stromlinienförmige Gestaltung der Front
4. stromlinienförmige Gestaltung der Seiten und des Hecks
5. Optimierung von Details:
  - (a) äußere Form, abstehende Teile
  - (b) interne Durchströmung
6. Auftrieb, Instabilität
7. Verhalten bei Seitenwind

## Frontfläche

Wenn es nicht möglich ist, geringe Luftwiderstandsbeiwerte zu realisieren, ist die Frontfläche das wichtigste Kriterium. Für ein unverkleidetes oder nur wenig verkleidetes Motorrad ist es wesentlich, die Frontfläche auf ein Minimum zu verringern.

Es gibt verschiedene Wege, aber jeder hat weitere Auswirkungen, deren Wichtigkeit von der erreichten Geschwindigkeit abhängt. Der Luftwiderstand wächst exponentiell mit der Geschwindigkeit: unter 100 km/h ist er sehr gering, über 200 km/h überwiegt er. Zwischen diesen beiden Extremen ist es vielleicht wichtiger, eine wirksamere Radaufhängung, größere Bodenfreiheit, bessere Sitzposition usw. zu haben. All diese Punkte führen in der Regel zu einem größeren Motorrad.

Zuerst kann das gesamte Motorrad tiefer gelegt werden, was sich auf die Bodenfreiheit auswirkt. Kleinere Räder und eine abgesenkte Radaufhängung (die wiederum den Federweg verringert, sind die einfachsten Lösungen. Sie können aber dazu führen, daß es notwendig wird, den Motor im Rahmen anzuheben und die Position der Auspuffanlage zu verändern, zum Beispiel um die Schräglagenfreiheit aufrechtzuerhalten. Wenn man den Motor schmaler gestaltet, bringt das zwei Vorteile: Die Frontfläche verringert sich, und der Motor kann bei derselben Schräglagenfreiheit tiefer montiert werden.



**Abbildung 7.7** Die klassische Tropfenform wird hauptsächlich bei Rekordfahrzeugen angewendet. Das ist Ernst Hennes BMW von 1936, mit der er 272 km/h erreichte.

Oft ist es möglich, die Breite des gesamten Motorrads durch Montage schmälerer Lenker und Kühler zu reduzieren und die Größe abstehender Teile zu verringern. Es kann auch notwendig sein, die Taille des Motorrads enger zusammenzurücken, damit der Fahrer besser in das Motorrad integriert ist. Eine verkrampfte Sitzposition, bei der entweder die Knie oder Ellbogen des Fahrers abstehen, hilft der Aerodynamik nicht.

Falls die Sitzposition des Fahrers geändert werden kann, ist es günstig, den Fahrer tiefer zu setzen und die Verkleidung in der Höhe abzunehmen. Das bedeutet in der Regel ein Absenken der Lenkerhälften und des Sitzes. Durch Entfernung der Polsterung, falls notwendig, oder durch Herstellung eines Rahmenhecks mit geringeren Abmessungen). Anschließend wird die Verkleidung oder die Verkleidungsscheibe passend gekürzt.

Die wirksame Größe kann durch eine gute Stromlinie verringert werden. Im Vergleich zu einem unverkleideten Motorrad kann eine Verkleidung die Frontfläche um fünf Prozent vergrößern. Falls sie aber den Luftwiderstand um mehr als fünf Prozent verringert, entsteht daraus bereits ein Gewinn.

## Gierwinkel

Unter realen Bedingungen wird das Motorrad meist nicht bei Windstille genau frontalem oder Rückenwind gefahren. Es treten Seitenwindkomponenten auf. Die Luft trifft das Motorrad unter einem spitzen Winkel. Ein Seitenwind von 30 km/h und eine Geschwindigkeit des Motorrads von 160 km/h erzeugen einen relativen Winkel von etwas mehr als elf Grad zur Mittellinie des Fahrzeugs. Aus diesem Winkel betrachtet, wird das Motorrad beträchtlich größer und strömungsungünstiger.

Es ist sehr wichtig, den Widerstand in diesem Winkelbereich wegen der ansteigenden Widerstandskraft zu verringern. Durch sie und die seitliche Komponente muß die Lenkung in Windrichtung eingeschlagen werden, um das Fahrzeug auf Kurs zu halten, was wiederum zum Radieren der Reifen führt und somit den Rollwiderstand erhöht.

Der Anteil des Fahrers wird größer, daher ist eine kompakte, geduckte Sitzposition von Bedeutung. Eine starke Verrundung aller vertikalen Kanten ist hilfreich. Bei Betrachtung des Motorrads unter einem Winkel von fünf bis zehn Grad zeigen sich unnötig gewölbte Proportionen. Der Neigungswinkel der Scheibe, die Art, wie die Frontverkleidung mit dem Kotflügel harmonisiert und der Sitz die Position des Fahrers festlegt, sind Bereiche für Verbesserungen.

## Stromlinienförmige Front

Ein breiter Körper ist bei Geschwindigkeiten unter 320 km/h ebenso wirkungsvoll wie ein punktförmiger, außer bei Schräganströmung (siehe oben), bei der eine flache Gestaltung die Frontfläche vergrößert. In der Regel ist es besser, eine etwas breitere Verkleidung zu verwenden, die die Luftströmung sanft um die Hände und Hebel führt als eine enge, bei der die Luftströmung an all diesen Kanten abreißt.

Die Seiten der Verkleidung sollten abgeschrägt und gerundet sein, so daß an der Front verdrängte Luft an der Seite entlang geführt wird. Sämtliche Kühlluft einlässe sollten nicht an der Frontfläche untergebracht werden. Sie haben in der turbulenten Strömung hinter den Rädern und der Gabel, mit einem Ausgang im Bereich geringen Drucks, eine günstigere Position, um die gewünschte Strömung sicherzustellen.

Scheinwerfer, Blinker oder Rückspiegel sollten soweit wie möglich integriert sein und nicht außen vorstehen. Luft einlässe zur Versorgung des Motors sind im Bereich hohen Drucks, also der Startnummer oder des Scheinwerfers mit einem gutverrundeten Eintritt und der geringsten Größe für die benötigte Luftmenge am günstigsten plaziert. Falls die Luft zwischen Eintritt und Einlaß unkontrolliert fließen kann, senkt sie den Druck in der Luftbox und somit die Leistung des Motors.

Die Verkleidung kann möglicherweise neu gezeichnet werden, um diese Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Der Kotflügel sollte so geformt sein, daß er den oberen Kreisbogen von sechzig Grad des Reifens abdeckt und die Luftströmung vom Motor ableitet. Beachten Sie, daß der Kotflügel eines Motorrads einen Bereich von mindestens dreißig und nicht mehr als 45 Grad vom höchsten Punkt des Reifens aus gemessen abdecken soll.

## Stromlinienförmige Seiten- und Heckverkleidung

Hinter der Windschutzscheibe entsteht ein Spalt zum Fahrer. Daher ist eine Leitkante von Vorteil, deren Breite und Winkel wichtige Faktoren sind. Hinter der Scheibe entsteht eine abwärts gerichtete Luftströmung, die in ihrer Form bei allen Geschwindigkeiten gleich verläuft. Sie können sie fühlen, indem Sie Ihre Hand während der Fahrt entlang der Verkleidungsscheibe führen. Das funktioniert am besten bei einem Straßenmotorrad, falls die Strömung den Helm trifft und gerade genügend Druck auf dem Visier erzeugt, um ein Beschlagen zu verhindern und die Regentropfen abzuleiten. Das funktioniert naturgemäß bei aufrechter Sitzposition des Fahrers.

Für geringsten Widerstand neigt sich der Fahrer. Die Scheibe leitet dann die Luftströmung in einer Linie über den Helm des Fahrers und seinen Rücken.

Die abschließende Kante der Verkleidung verursacht einen Zusammenbruch des Luftstroms. Falls das nicht passiert, wird das von den Armen des Fahrers und seinen Beinen mit Sicherheit übernommen. Gemäß dem FIM-Reglement müssen sie frei bleiben. Wenn sie jedoch hinter die Verkleidung geduckt werden können, und die Verkleidung im Bereich der Taille etwas breiter geformt ist, kann die Strömung an einer Verwirbelung gehindert werden, bevor sie an einem spitz auslaufenden Heckteil entlangläuft und einen schmalen wirkungsvollen Sog hinterläßt. Das Leistungsvermögen von Walfischen übersteigt bei weitem ihre Kraft. Der Grund liegt in ihrer aquadynamischen Gesamtform, die aber immer noch nicht ausreicht, um ihre Leistungsfähigkeit zu erklären. Ein Unterseeboot, das nach der Form eines Delphins gebaut würde und dessen Leistung hätte, wäre nicht so schnell wie dieser. Der Grund für den Unterschied liegt in der Haut und den Schichten unter der Haut, die es ihr erlauben nachzugeben und jedem Wirbel und jeder Welle zu folgen. Falls die Verkleidung gleiches und somit ein Ablösen der Strömung verhindern oder die Strömung sofort wieder zur Anlage bringen könnte, wäre sie aerodynamisch sehr wirkungsvoll.

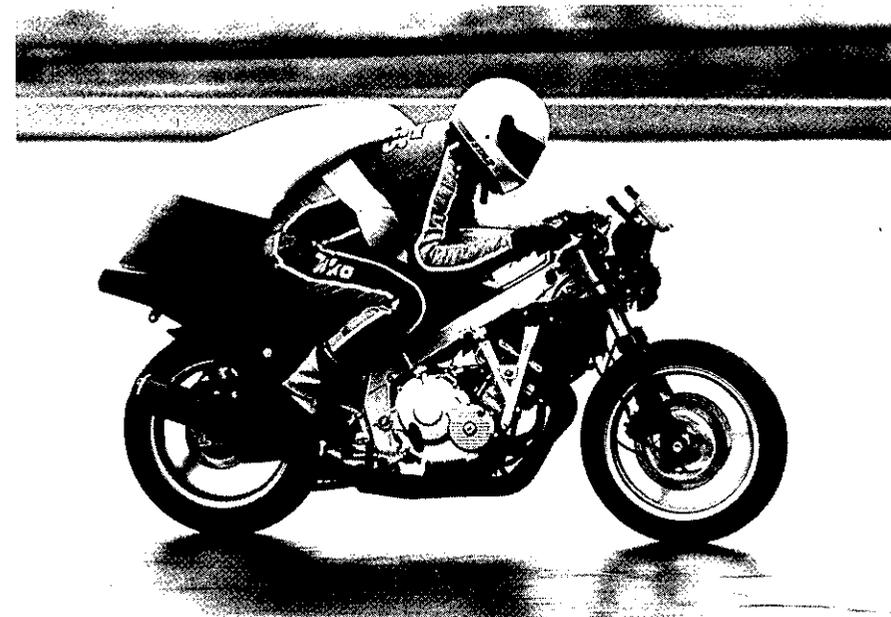


Abbildung 7.8 Seiten- und Heckverkleidungen können Vorteile bringen. Die sind jedoch hinfällig, wenn Seitenwind auftritt.

Spitz zulaufende Seitenverkleidungen und der Sitzhocker können das Hinterrad und weitere abstehende Teile, wie zum Beispiel Auspuffanlage und Anbauteile wie Elektrik oder Ölkühler mit Abluftführungen im Unterdruckbereich abdecken. Verkleidungen dürfen, im Gegensatz zu Kotflügeln, Sitzen und Nummerntafelhaltern, nicht über die Hinterradachse hinaus stehen.

## Detailoptimierung

Die meiste Entwicklungsarbeit fällt unter diese Kategorie. Bei einer speziell vorgegebenen Konstruktion ist es eine wichtige Aufgabe, aerodynamische Grundsätze anzuwenden. Ziehen Sie jede Komponente in Betracht, schauen Sie, ob sie weggelassen oder verkleinert werden kann, runden Sie die Kanten und formen Sie das Heck stromlinienförmig.

Zu vermeiden sind scharfe Kanten, plötzliche Übergänge im Querschnitt oder Stufen und alles was die Frontfläche vergrößert. Viele Detailänderungen sind zu gering, um sie für die meisten von uns im Einzelnen durch Testmethoden zu erfassen. Die Summe aller Arbeiten ist aber den Aufwand wert.

Die innere Durchströmung kann einen großen Anteil am gesamten Widerstand ausmachen. Sie sollte durch Ableitung der Strömung um die Frontverkleidung und durch Begrenzung der Ausmaße der Eintrittsöffnungen verringert werden. Gleichzeitig



(a)



(c)

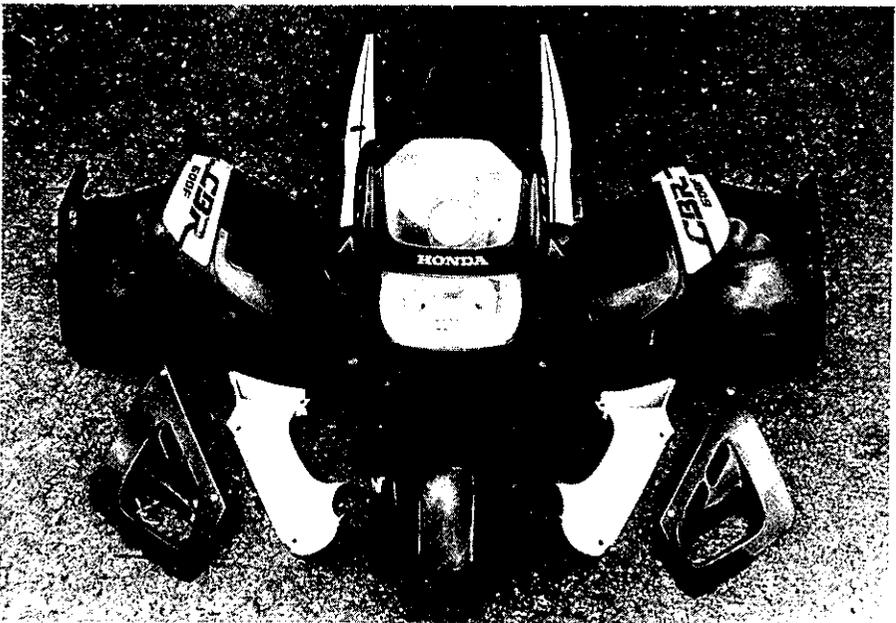


Abbildung 7.9 (a), (b) und (c) Viele Kleinigkeiten führen zum Endergebnis und zu zehn Kilometern mehr oder einer Verringerung des Luftwiderstands von 17 Prozent.



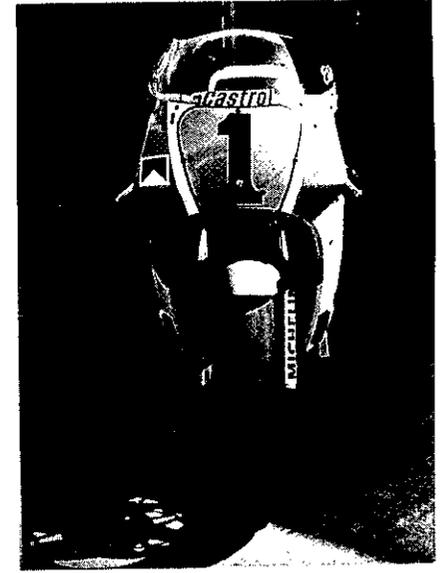
(a)

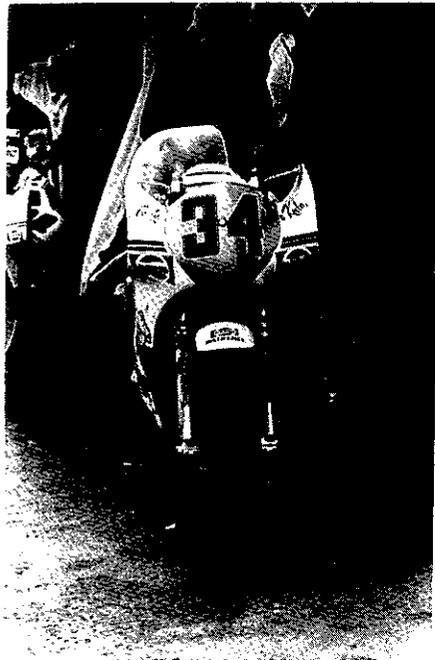


(b)



Abbildung 7.10 (a),(b),(c) und (d) Vergleichen Sie von 1987 (a) 11 (b) Honda (c), Lawsons's Yamaha und (d) Mamola's Yamaha mit...





(a)



(b)



(c)

Abbildung 7.11 ...der (a) Suzuki  
(b) Yamaha und (c) Cagiva von 1988

ist es wichtig, dafür zu sorgen, daß heiße Luft vom Kühler oder Ölkühler nicht über die Zündspulen oder das Luftereinlaßsystem abgeleitet wird.

Einige Motorräder verfügen über ein Staudruckeinlaßsystem, bei dem Luft an der Front des Motorrads gesammelt und in die Luftfilterbox gedrückt wird. Andere haben eine Luftfilterbox mit dem Einlaß unter dem Sitz des Motorrads, verfügen über offene Vergaser oder individuelle Filter für jeden Vergaser. Ein nach außen abgeschlossener Raum, der von Tank, Verkleidung und dem Rahmen gebildet wird, stellt eine wirkungsvolle Luftfilterbox dar. Es ist zwar keine luftdichte Box, die Luft wird aber aus Bereichen zur Verfügung gestellt, die vermutlich geringen Druck haben, wenn das Motorrad mit hoher Geschwindigkeit fährt. Das kann sowohl die Gemischbildung als auch die Leistungsabgabe beeinflussen.

Kühleinlässe haben eine doppelte Funktion. Sie müssen genügend Luft zuführen, um den Motor oder das Motoröl auf vernünftigen Temperaturen zu halten. Gleichzeitig sollen sie ein Minimum an Luftwiderstand erzeugen.

Die grundsätzlichen Regeln lauten:

1. turbulente Luftströmung im Kühler oder den Kühlerippen ergeben einen besseren Wärmeübergang.
2. Der Luftwiderstand nimmt mit der örtlichen Luftgeschwindigkeit ab. Langsame Luft im Kühlluftereinlaß erzeugt also einen geringen Widerstand. Der Kanal am Kühler sollte deshalb größer sein als am Luftereintritt.
3. Der Luftereinlaß sollte die Frontfläche des Motorrads nicht vergrößern und die Stromlinienform nicht stören. Sein Eintritt sollte sanft verrundet sein.
4. Druckspitzen auf den Kühler sollten gering sein.
5. Die Luftgeschwindigkeit im Kühler und am Auslaß sollte hoch sein, was wiederum mit Anforderung zwei kollidiert. Nichts desto weniger kann die Form des Kühlers die Luft gleichrichten und die Durchflußgeschwindigkeit erhöhen.

Die Frontfläche des Kühlers ist proportional zum Energiedurchsatz des Motors, der annähernd gleich der genutzten Motorleistung ist. Er ist umgekehrt proportional zu:

1. der Fahrzeuggeschwindigkeit
2. der Luftdichte
3. der spezifischen Wärme bei konstantem Druck
4. der Temperaturdifferenz zwischen dem Luftereinlaß und dem Kühlmittel am Kühlereingang
5. der Luftgeschwindigkeit im Kühler
6. dem Wirkungsgrad des Kühlers, der definiert ist durch  $(t_1 - t_2) / (t_1 - t)$ , wobei  $t_{1,2}$  die Ein- und Auslaßlufttemperaturen sind und  $t$  die Einlaßtemperatur des Kühlmittels ist.

Für Testzwecke muß die optimale Betriebstemperatur auf Motorprüfständen festgelegt werden, wobei der ungünstigste Fall zugrunde gelegt wird (bei einem Straßenmotorrad der Leerlauf nach einer Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit). Der Kühler muß mit den ungünstigsten Bedingungen fertig werden (oder ein zusätzlicher Kühler angebracht werden). Dann muß der Staudruck, der auf den Kühler wirkt, unter echten Bedingungen gemessen und verringert werden, oder ein kleinerer Kühler zum Einsatz kommen.

## Auftrieb und Instabilität

Es ist nicht möglich, den Auftrieb vorauszusagen. Falls die Luft, die über die Oberseite des Motorrads fließt, einen höheren Druck hat als die darunter, entsteht eine aufwärts gerichtete Kraft. Die Widerstandskraft, die am Druckzentrum in einigem Abstand über der Fahrbahn angreift, erzeugt ein Drehmoment, das dieselbe Wirkung hat und die Vorderachse anheben will. In beiden Fällen wird das Gewicht auf der Vorderachse reduziert. Das führt, wie einige Studien zeigen, zu Instabilität (oder erzeugt Instabilität bei einer geringeren Geschwindigkeit).

Falls die Luftströmung Abtrieb erzeugen kann, drehen sich diese Tendenzen um. Der einzige Weg herauszufinden, ob positiver oder negativer Auftrieb auftritt, besteht darin, den Weg an der Vorderradaufhängung während der Fahrt zu messen (siehe Kapitel 11). Falls die Gabel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Motorrads ausfedert, entseht positiver Auftrieb.

Die einzige Möglichkeit, das zu verhindern, besteht darin, die Front so zu formen, daß die Luft nach oben abgeleitet wird, um negativen Auftrieb zu erzeugen. Möglicherweise kann bei hohem Druck im Bereich unter dem Scheinwerfer ein Spoiler an der Unterkante der vorderen Verkleidung helfen.

Da die Widerstandskraft selbst die Front des Motorrads anhebt, reduziert also auch jede Widerstandsverringerng den Auftrieb.



Abbildung 7.12 Zur Untersuchung, ob die Luft am Lufteinlaß dieser CBR 600 einen Druck in der Airbox erzeugt, wurde ein Manometer zwischen Airbox und der beruhigten Luft hinter der Windschutzscheibe miteinander verbunden.

## Seitenwind

Da Motorräder frei rollen und gieren können und ein Giermoment entgegengesetztes Rollen verursacht, können Seitenwinde komplizierte Reaktionen hervorrufen.

In erster Linie verursacht der einseitige Druck eine Kraft. Das kann mithilfe eines vierrädrigen Spielzeugs mit nicht lenkbaren Rädern demonstriert werden. Wenn man im Stillstand Druck auf eine Seite ausübt, bewegt es sich dann, wenn die Kraft groß genug ist, die Reifen zum Rutschen zu bringen (oder es überschlägt sich, wenn es im Vergleich zu seiner Spur sehr lang ist). Wenn es sich fortbewegt, reicht schon eine geringe seitliche Kraft, um es in diese Richtung abzulenken. Das zeigt den Unterschied zwischen Schlupf und Gleiten der Reifen. Die Kraft des Seitenwinds neigt dazu, jedes Fahrzeug in die gleiche Richtung zu bewegen wie der Wind.

Zweitens wirkt der Seitenwind auf das Druckzentrum, das sich über der Fahrbahn befindet. Er erzeugt ein Moment, das das Motorrad in die gleiche Richtung wie der Wind zum Rollen bringt. Die Größe des Rollmoments hängt von der Windstärke, der seitlichen Fläche und der Höhe des Druckzentrums ab.

Drittens bewirkt jede Kraft, die einseitig am Motorrad angreift aufgrund des Nachlaufs der Lenkung ein Einschlagen des Vorderrads nach dieser Seite. Deswegen lenkt das Motorrad dort hin, wo es der Wind drückt. Ein Einschlagen (siehe Kapitel 1) nach links verursacht ein sofortiges Rollen des Motorrads nach der rechten Seite und umgekehrt. Die zuerst angreifende Kraft bewirkt ein Rollen des Motorrads in den Wind und hebt die Wirkung der zweiten Kraft auf. Ein steilerer Lenkkopf und ein größerer Nachlauf erhöhen die Auswirkung dieser Reaktion.

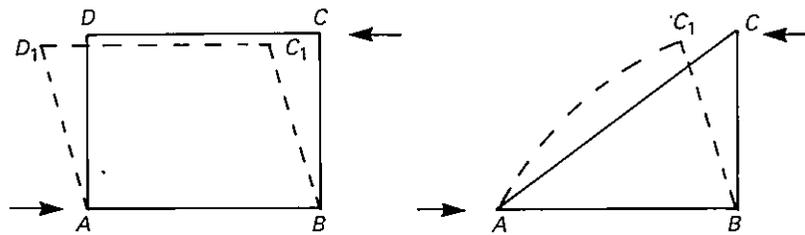
Viertens: Falls das Druckzentrum des Motorrads hinter (oder vor) dem Schwerpunkt liegt, verhält es sich wie eine Wetterfahne. Die Windkraft verursacht ein Moment, wodurch das Motorrad eine Gierbewegung in den Wind hinein macht, falls das Druckzentrum nach hinten verschoben ist oder sich mit dem Wind dreht, falls das Druckzentrum nach vorn verschoben ist. Dieser Effekt kann sich auf die (dritte) Auswirkung auf die Lenkung addieren oder subtrahieren und verschiedene Schräglaufwinkel an Vorder- und Hinterreifen erzeugen. Unter vielen Bedingungen heben sich diese Einflußgrößen gegenseitig auf. Motorräder können sich bei Seitenwinden, sogar bei stürmischen Winden, völlig stabil verhalten. In der Regel hält ein Motorrad bei einem geringen Rollwinkel den Geradeauslauf aufrecht. Es dreht sich leicht mit dem Wind und erfordert einen geringfügigen Druck auf eine Seite des Lenkers, um den ursprünglichen Kurs beizubehalten. Turbulente Winde schütteln das Motorrad ganz offensichtlich, es reagiert aber schneller als der Fahrer. Das Schlimmste, was der Fahrer tun kann, ist zu versuchen, der eindrehenden Wirkung des Seitenwinds entgegenzuhalten. Während er reagiert, hat sich die Windkraft geändert oder ist verschwunden. Seine Reaktion wirkt gegen eine nicht mehr existierende Kraft und bewirkt ein Rollen oder Abweichen des Fahrzeugs, das größer als notwendig ausfällt. Er muß daraufhin seinen Kurs weiter korrigieren. Am besten ist es, einen weit entfernten Punkt anzupeilen und so zu lenken, daß das Motorrad sich auf diesen Punkt zubewegt, ohne Rücksicht auf das Schütteln und Rollen, das der Wind verursacht. Der Fahrer muß akzeptieren, daß, wenn er einen geraden Kurs einschlagen will, das Motorrad nicht länger senkrecht steht. Das schränkt die Kurvenmöglichkeiten in beiden Richtungen ein.

*Sattl*

# Rahmen und Fahrwerksdetails

Die wichtigste Anforderung an einen Rahmen ist die, eine leichte und steife Verbindung zu bilden, die die Räder in derselben Ebene hält oder in der Ebene, in die sie die Lenkung stellt. In der Art, wie sich die Radaufhängungen entwickelt haben, bedeutet es, daß der Rahmen die Schwinge, Schwingenlagerung und den Lenkkopf starr in Ebenen zu halten haben, die horizontal zu den Achsen der Radaufhängungen und vertikal zur Lenkachse stehen.

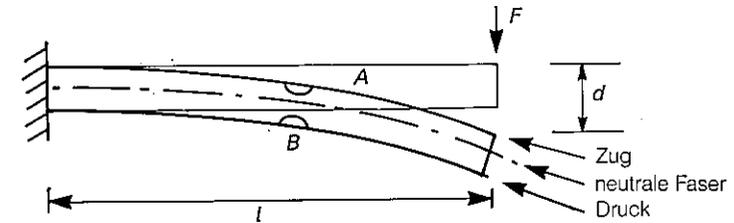
Die Lager müssen mit dem Antriebsmoment, den Bremskräften (in horizontaler Richtung) und mit den Kräften in der Aufhängung (in vertikaler Richtung) fertig werden. Der Rahmen muß den Motor aufnehmen, der auch dazu benützt werden kann, die Rahmenstruktur zu verstärken, indem er zur dritten Seite eines Dreiecks wird und den Fahrer und die notwendige Ausrüstung trägt.



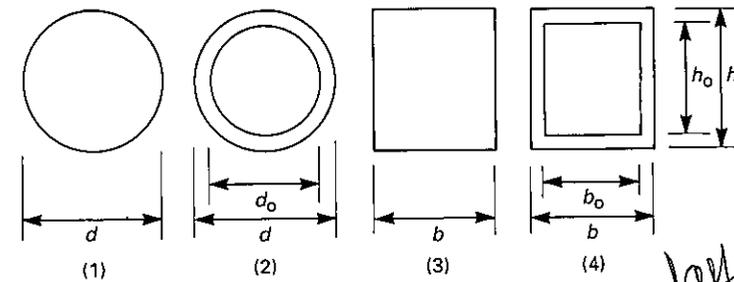
**Abbildung 8.1** Ein Dreieck ergibt eine viel steifere Struktur als ein Viereck. Um es auszulenken, müssen mindestens eine Seite und alle Ecken verformt werden. Ein Viereck kann durch alleinige Bewegung der Eckpunkte verformt werden.

In früheren Jahren wurden die Rahmen als Rohrkonstruktionen entwickelt. Es gibt eine ganze Menge von Beispielen leichter, dreieckiger, räumlicher Rahmen, die eine direkte und steife Verbindung zwischen Hinterrad und Steuerkopf herstellen. Ein Dreiecksverband ergibt ein gute Steifigkeit in der Ebene des Dreiecks. Wenn mehr als drei Komponenten, zum Beispiel in Form eines Quadrats, eines Rechtecks oder eines Vielecks mit mehreren Seiten zu einer Struktur verbunden sind, ist es einfach, diese Form in eine Raute oder in ein Parallelogramm überzuführen, da ausschließlich die Verbindungspunkte verformt werden müssen. Daraus kann eine neue Form hervorgehen, ohne daß eine der Streben, die die Struktur bilden, deformiert wird. Die Steifigkeit hängt vollständig von den Verbindungspunkten ab. Steifigkeit ist nicht immer das gleiche wie Festigkeit. Festigkeit ist der Widerstand gegen einen Bruch unter Last. Er hängt vom Werkstoff ab. Steifigkeit ist der Widerstand gegen eine Deformation unter Last. Er hängt von der Form ebenso wie vom Werkstoff ab.

Falls drei Seiten miteinander zu einem Dreieck verbunden sind, kann es nur dann verformt werden, wenn die Gelenke nachgeben und eine oder mehrere Streben gebogen, auseinander gezogen oder zusammengedrückt werden.



**Abbildung 8.2** Wenn ein Balken gebogen wird, steht die konvexe Seite unter Druck, die konkave unter Zug. Irgendwo zwischen den beiden gibt es eine neutrale Faser, die spannungsfrei ist. Eine Bohrung, eine Kerbe oder eine Schweißnaht verursachen Spannungskonzentrationen, falls sie in der, am meisten beanspruchten Zone liegen. In unserem Fall können sie in Punkt A oder B den Träger ernsthaft schwächen. Die Verformung d hängt von der Kraft F und der Länge l und Steifigkeit des Balkens ab, so daß  $d = F l^3 / (3EI)$ , wobei E der Elastizitätsmodul des Werkstoffs und I das Flächenträgheitsmoment des Querschnitts ist.



*dayanbar*

**Abbildung 8.3 (a)** Vergleich der Steifigkeiten verschiedener Querschnitte:

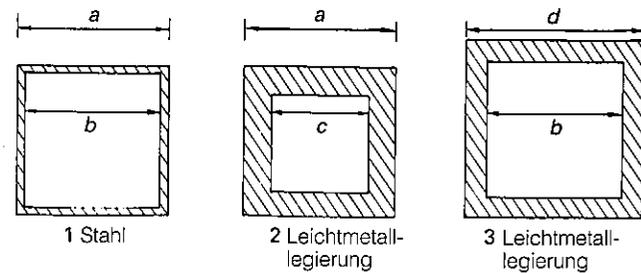
	Querschnitt 1	Querschnitt 2	Querschnitt 3	Querschnitt 4
Widerstandsmoment gegen Biegung	$\pi d^3/32$	$\pi(d^4-d_0^4)/32d$	$bh^3/6$	$(bh^3-b_0h_0^3)/6h$
Widerstandsmoment gegen Torsion	$\pi d^3/16$	$\pi(d^4-d_0^4)/16d$	$nb^2h$	-
Flächenträgheitsmoment	$\pi d^4/64$	$\pi(d^4-d_0^4)/64$	$bh^3/12$	$(bh^3-b_0h_0^3)/12$
Querschnittsfläche	$\pi d^2/4$	$\pi(d^2-d_0^2)/4$	$bh$	$bh-b_0h_0$

**Fußnote 1**  
Dieselben Werte können für einen H,I oder C-förmigen Querschnitt angewendet werden, solange die Querschnittsbreite dieselbe, das heißt, die gesamte Breite  $b - b_0$  ist.

**Fußnote 2**  
Der Wert n hängt vom Verhältnis  $h/b$  ab.

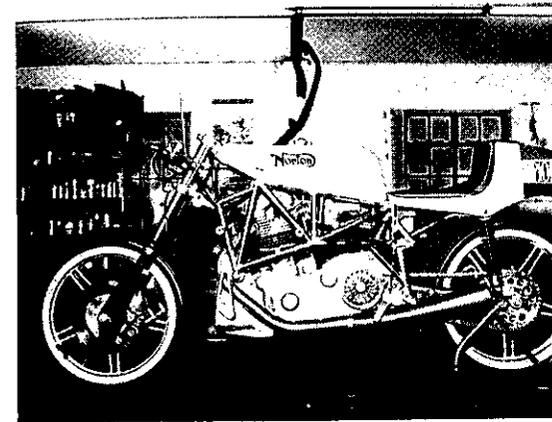
h/b	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
n	0,208	0,231	0,246	0,267	0,282

Als Radaufhängungen mit Schwingen entwickelt und Motorräder sehr kompakt konstruiert wurden, legte man den Rahmen um den Motor herum. Diese Fahrwerke hatten für ihr Gewicht eine geringe Steifigkeit. Es gab einige Versuche, eine direkte Verbindung zwischen der Schwingenachse und dem Steuerkopf herzustellen. Sie bestanden gewöhnlich aus einem einzigen Rohr mit großem Durchmesser, aber auch aus Profilen, Preßblechteilen und Gußstücken (sogenannten Monocoque-Konstruktionen). Versuche, Rahmen aus Dreiecksverbänden herzustellen, wiederholten sich in regelmäßigen Intervallen. Die komplizierte Herstellung und die schlechte Zugänglichkeit überwogen aber gegenüber ihrem Potential an Steifigkeit. Für die Leistungen alter Ein- oder Zweizylinder war der Schleifenrahmen absolut ausreichend.

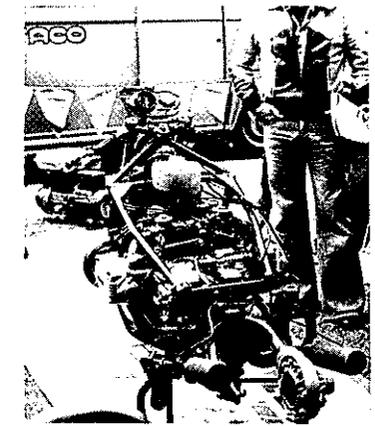


**Abbildung 8.3 (b)** Stahl hat ungefähr die dreifache Festigkeit und das dreifache Gewicht von Aluminiumlegierungen. Ein Stahlprofilquerschnitt (1) könnte durch ein Profil aus Aluminiumlegierung ersetzt werden (2), so daß die äußeren Abmessungen und das Gewicht oder (3) die inneren Abmessungen und das Gewicht gleich bleiben. Die Tabelle unten zeigt die Steifigkeit von Profilen aus Aluminiumlegierung im Vergleich zu Stahlprofilen unterschiedlicher Wandstärke. Da Aluminiumlegierungen nur ein Drittel der Festigkeit von Stahl haben, muß die Steifigkeit mehr als dreimal so groß sein, um einen Vorteil zu erzielen. Wenn also die äußere Abmessung festgelegt ist, hat Stahl einen Vorteil in der Steifigkeit, obwohl bei Verwendung von sehr geringen Wandstärken kaum Unterschiede auftreten und die großen Wandstärken von Aluminiumlegierungen leichter zu schweißen, bohren usw. sind. Wenn die äußeren Abmessungen nicht begrenzt werden, zeigen Aluminiumlegierungen einen Vorteil in der Steifigkeit bei gleichem Gewicht des Werkstoffs. Das gleiche gilt für runde Querschnitte. Rechteckige I- oder achteckige Querschnitte und ungleiche Wandstärken können höhere Steifigkeit in einer Richtung und geringere Steifigkeit unter neunzig Grad zu dieser Richtung ergeben.

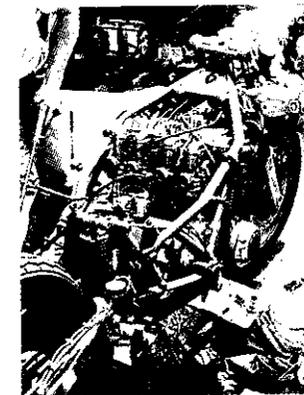
1 Stahl		2 Aluminiumlegierung gleiches Gewicht gleiches a		3 Aluminiumlegierung gleiches Gewicht gleiches b	
a	b	c	Steifigkeit (Stahl = 1)	d	Steifigkeit (Stahl = 1)
4	33	8,2	1,86	51,2	4,14
	36	26,2	2,37	47,0	3,63
	37	30,1	2,53	45,4	3,47
	38	33,6	2,69	43,7	3,31
	39	36,9	2,85	41,9	3,15
	39,9	39,7	2,99	40,2	3,02



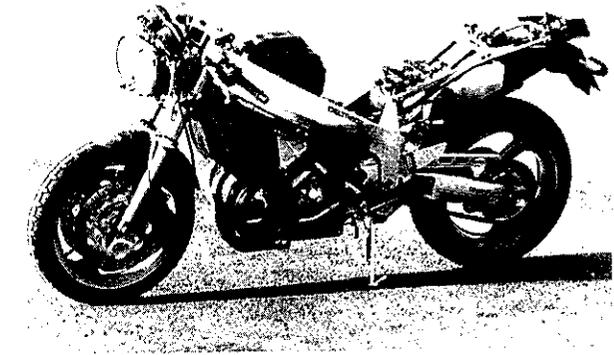
(a)



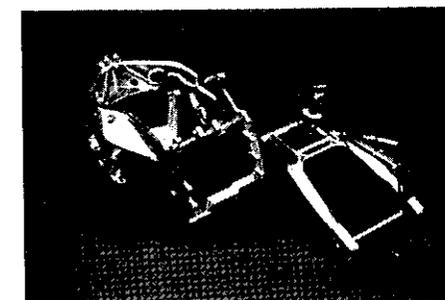
(b)



(c)



(d)



(e)

**Abbildung 8.4 (a)** Der, voll aus Dreiecksverbänden bestehende Rahmen der Norton-Werkstwin, konstruiert von Peter Williams

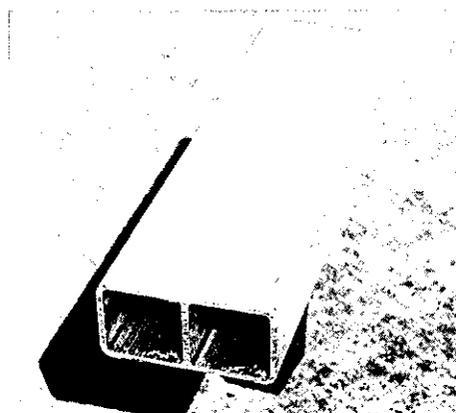
**(b)** Inspiriert von den zweckgebundenen Godier-Genoud-Kawasakis der frühen 70er Jahre, konstruierten Langstreckenteams ihre Rahmen buchstäblich um die Triebwerke. Dieses Motorrad von Honda Suisse aus dem Jahre 1974 verwendete einen Gold Wing-Motor.

**(c)** Die Bimota-Konstruktion von 1978 hatte die Schwingenachse konzentrisch zum Kettenritzel, um Änderungen der Kettenspannung zu eliminieren.

**(d) und (e)** Die größeren Querschnitte von Leichtmetalllegierungen ergeben eine größere Steifigkeit im Verhältnis zum Gewicht. Sport- und Rennmaschinenrahmen entwickelten sich zu diesem Brückenrahmenprinzip, das bei Yamaha für die FZR-Serie verwendet wird.

Als die Leistungen anstiegen und Komponenten wie Reifen und Radaufhängungen einer sprunghaften Entwicklung unterlagen, die eine weitere Leistungssteigerung zuließ, wurde der Rahmen bald zum schwächsten Glied. Ende der 60er Jahre hatte Honda immense Probleme mit ihrer 500er Grand Prix-Rennmaschine. Einige Jahre später begann die Rahmenentwicklung erneut mit den leistungsstarken Formel 750-Maschinen und den unhandlichen 1000 Kubikzentimeter-Endurance-Rennern.

**Abbildung 8.5** Zusätzliche Versteifungsrippen verstärken den Querschnitt weiter. Spondon Engineering verwendete diesen Achter-Querschnitt in einer 7020er Legierung, die keine anschließende Wärmebehandlung mehr benötigt.



Entwicklungen, wie Peter Williams' John Player Nortons, die Rohrrahmen und Monocoque-Konstruktion verwendeten, und die Godier Genoud Kawasaki, führten zu neuen Anregungen in der Rahmenkonstruktion. Da sich die Radaufhängungen verbesserten, und mehr Federweg ermöglichten, stieg die Beanspruchung des Rahmens weiter. Als die Leistungen anwuchsen, wurde die Rahmensteifigkeit immer wichtiger.

Die Konstruktion änderte sich langsam, vom ehemals über den Motor geführten zum um den Motor gelegten Rahmen (dem Brückenrahmen), zum Beispiel bei Bimota, Moto Martin, Nico Bakker, Honda RCB. Schwingen mit kastenförmigen Querschnitten, die über Umlenkhebel am Federbein abgestützt waren, tauchten auf. Wo Dreiecksverbände nicht möglich waren, halfen kastenförmige Querschnitte, größere Biegekräfte aufzunehmen. Aluminiumlegierungen setzten sich immer stärker durch. Mit einem Drittel der Festigkeit und einem Drittel des Gewichts von Stahl haben Leichtmetallegerierungen auf den ersten Blick keinen Festigkeits/Gewichtsvorteil, sondern den Nachteil geringerer Dauerfestigkeit. Die Steifigkeit hängt jedoch vom Querschnitt des Werkstoffs und dem Abstand der Achse, um die er gebogen wird, ab (deswegen sind Rohre mit großem Durchmesser biegesteifer als solche mit kleinerem Durchmesser, die dasselbe Gewicht haben). Leichtmetallegerierungen haben eine geringere Dichte als Stahl. Sie beanspruchen mehr Raum bei einem gegebenen Gewicht. Daher muß ein ähnlicher Querschnitt bei gleicher Zugfestigkeit und dem gleichen Gewicht des Werkstoffs eine größere Wandstärke haben, wenn er aus Leichtmetallegerierung gefertigt ist. Er muß deshalb auch steifer sein. Umgedreht kann die gleiche Steifigkeit auch eine Reduzierung des Gewichts bringen. Beachten Sie, daß Aluminiumlegierungen – 7020 ist eine Ausnahme – eine Wärmebehandlung nach der Bearbeitung brauchen.

Von oben betrachtet sieht ein Brückenrahmen wie ein A aus. Zwischen der Basis ist ausreichend Raum für das Federbein, die Luftfilterbox und die Elektrik. Die breite

Führung des Rahmens erleichtert es, eine Verkleidung anzubringen. Der Tank sitzt darauf und benötigt keinen mittigen Tunnel.

Die Konstruktion eines Rennrahmens, auch wenn sie denselben Grundsätzen wie ein Straßenrahmen folgt, ist sehr unterschiedlich. Geringere Wandstärken und leichtere und teurere (und schwerer zu verarbeitende) Werkstoffe werden bei Rennrahmen verwendet. Das Ergebnis ist eine erstaunliche Gewichtsreduzierung. Die Rahmen der Yamaha TZ und RD 350-Modelle sind konstruktiv sehr ähnlich. Tabelle 8.1 zeigt jedoch wie große der Unterschied ist.

**Tabelle 8.1** Gewichtsvergleich zwischen Yamaha RD 350 und TZ 350

Gewichtsvergleich Motorrad	Vorderachslast	Hinterachslast	Gesamtgewicht (kg)
TZ 350	56,2 (50,7%)	54,4	110,6 ohne Kraftstoff
RD 350	70,5 (48,1%)	76,2	146,7 Tank halb voll
(RD komplett ohne Verkleidung, diese wiegt 12,7 Kilogramm)			

Das Potenzial für die Rahmenentwicklung ist immens. Im Fall der Yamaha ergibt sich immerhin eine Gewichtseinsparung in der Größenordnung von 25 Prozent, und die Möglichkeit, radikale Veränderungen der Frontfläche, der Gewichtsverteilung und der Lenkgeometrie herzustellen. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung des Rahmens sollte auf die Lage des Schwerpunkts und die ungefähre Größe des Radstands in Verbindung mit optimaler Steifigkeit, optimalem Gewicht und geringer Frontfläche des Motorrads gerichtet werden. Einzelheiten der Lenkgeometrie können durch Änderung der Sitzhöhe, durch unterschiedlichen Versatz der Gabelbrücken oder einstellbare Gabelbrücken und durch Änderung der Länge der Schwinge erzielt werden.

Je nach Einsatzzweck des Motorrads unterscheiden sich die Anforderungen stark. Der Rahmen kann zuerst unter Berücksichtigung der Räder und dann, in Abhängigkeit vom ungefähren Radstand und der Lage des Schwerpunkts konstruiert werden. Für eine vorgegebene Leistung kann die beste Auslegung für Beschleunigen und Bremsen herausgefunden werden (Benützen Sie die Gleichungen aus Kapitel 5 und 6 oder das Rechenprogramm, das im Anhang aufgelistet ist). Annahmen über Reifenhaftung basieren auf vorangegangenen Tests, auf Beobachtungen von ähnlichen Maschinen und auf Daten der Reifenhersteller. Als eine erste Annahme kann ein Kraftschlußbeiwert von 0,8 bis 1,0 für Mischungen von sportlichen Reifen für Straßenmotorräder angenommen werden, der für Rennreifen auf 1,1 bis 1,2 (1989er Saison) ansteigt und für Dragster-Rennreifen noch höher liegt.

Ein längerer Radstand ergibt bessere Stabilität, dafür aber einen größeren Kurvenradius bei gleichem Lenkeinschlag, und weniger Gewichtsverlagerung während dem Bremsen oder Beschleunigen bei festgelegtem Schwerpunkt. Ein Rechenprogramm ist das ideale Instrument, um vielfältige Änderungen zu erarbeiten. Wenn die Räder und der Schwerpunkt gezeichnet werden können, muß der Rahmen den Motor und den Fahrer so aufnehmen, daß die Lage des Schwerpunkts in die gewünschte Position kommt und folgende Anforderungen erzielt werden:

1. Frontfläche
2. Bodenfreiheit
3. Schräglagenfreiheit
4. Federweg

Je nach Art des Fahrzeugs fallen die Prioritäten unterschiedlich aus. Wenn Motor und Fahrer in die Zeichnung aufgenommen sind, wird die Breite des Rahmens von diesen Anforderungen diktiert, wobei eine maximale Steifigkeit bei geringstem Gewicht erreicht werden muß.

Der Betrag des Federwegs und die Änderungen, die er verursacht, bestimmen die Auslegung und die Art der Radaufhängung. Es gibt nun genug Daten, um eine Konstruktionszeichnung zu erstellen, aus der weitere Einzelheiten erarbeitet werden können (wie Änderungen der Radflucht, die Lenkgeometrie, der Lenkanschiag, der Wendekreis, die Lage des Kraftstofftanks und anderer Anbauteile).

## Fahrwerksdetails

Die Konstruktion des Motorrads muß seinen Verwendungszweck berücksichtigen und wahrscheinliche Sturzschäden, Wartung, usw. in Betracht ziehen. Eine Langstreckenrennmaschine braucht Räder und Bremsbeläge, die schnell gewechselt werden können. Sturzteile wie Fußrasten müssen schnell austauschbar sein. Um bei der Fehlersuche Zeit zu sparen, muß der gesamte Kabelbaum mit einem einzigen Stecker montiert werden.

Das erfordert eventuell eine Änderung in der Gesamtkonstruktion. Es beeinflußt Dinge wie die Wahl der Radabmessungen, die Art der Bremsen, usw. Andere Modifikationen, wie zum Beispiel Motor-Tuning, können höhere Anforderungen an das Chassis zum Beispiel durch verstärkte Vibrationen stellen. Eine sorgfältige Beachtung der Detailkonstruktion hilft, die Verlässlichkeit zu steigern und den Gebrauch zu erleichtern. Gründe, um Teile zu ändern, haben, entsprechend ihrer Priorität, folgende Reihenfolge.

1. geringe, ungefederte Massen
2. geringes Gewicht, insbesondere Gewicht, das am weitesten von der Lenk- oder der Rollachse des Motorrads entfernt ist.
3. Erzielung eines besseren Schutzes der verbauten Teile oder Erleichterung der Wartung
4. Verbesserung der Leistungsfähigkeit auf andere Art, wie zum Beispiel Aerodynamik, Fahrerkomfort, usw.

Modifikationen sollten nach diesen Kriterien und dem Risiko, ein Teil zu verbessern und gleichzeitig ein anderes zu schwächen, beurteilt werden. Es ist oft einfach, ein Teil auf Kosten der Zuverlässigkeit zu erleichtern. Es hängt davon ab, wie lang ein solches Motorrad eingesetzt wird.

Während der Entwicklungs- und Testzeit ist es wichtig, Fehler aufzudecken und die Standzeit von Verschleißteilen zu ergründen. Sogar bei Kurzstreckenrennen ist es

wichtig, den Bremsbelagverschleiß durch genügend Bremsflüssigkeit zu ersetzen. Dünnere Beläge heizen sich schneller auf und übertragen mehr Wärme auf die Bremsflüssigkeit. Die Zeit, die gebraucht wird, um die Reifen anzuwärmen, oder die Aufheizung der Stoßdämpfer, bei der Dämpferkraft verloren geht, der Ölverbrauch des Motors, die notwendige Batteriekapazität, all diese Dinge müssen bekannt sein.

Es kann erforderlich sein, zusätzliche Instrumente während dieser Phase zu montieren, zum Beispiel, um die Öltemperatur, die Bremsentemperaturen, die Batteriespannung und Über- und Unterdruckbereiche um das Motorrad zu überwachen und auf Zug beanspruchte Bolzen und Streben regelmäßig zu überprüfen.

Rahmen sollten regelmäßig auf Brüche, Risse in der Lackierung oder auf Rost oder rostiges Wasser am Äußeren der Stahlrohre überprüft werden. Einige Rahmenbauer haben bei der Entwicklung neuer Konstruktionen Bohrungen im Zentrum jeder geschweißten Verbindung angebracht, so daß jedes Rohr mit dem nächsten kommunizieren kann. Sie haben den ganzen Rahmen abgedichtet und eine Bohrung zur Druckmessung oder eine Druckkontrolleuchte angebracht. Dann kann der gesamte Rahmen mit einigen bar unter Druck gesetzt werden. Jeder Riß oder Rahmenbruch zeigt sich dann sofort als Druckverlust an.

Halten Sie alles, einschließlich der Kosten, schriftlich fest. Es hilft Ihnen in der Zukunft, Budgets zu planen und stellt sicher, daß alles überschaubar bleibt. Es beeindruckt außerdem zukünftige Sponsoren.

Die Art der Arbeit, die höchstwahrscheinlich anfällt, ist alphabetisch aufgelistet (siehe unten).

## 1. Bremszangen

Falls die Bremsleistung erhöht wurde, wird mehr Wärme erzeugt. Es kann notwendig werden, ein Wärmeschild hinter dem Belag zu montieren. Einige Hersteller tun das von Haus aus. Nissin hat zum Beispiel ein keramisches Hitzeschild in den Vierkolbensätteln, die bei einigen Hondas verbaut werden. Als Alternative kann eine Flüssigkeit mit einem höheren Siedepunkt (die öfters gewechselt werden muß) oder eine bessere Kühlung verwendet werden. Der Werkstoff des Hitzeschildes sollte inkompressibel und ein schlechter Wärmeleiter sein und hohen Temperaturen widerstehen können.

Schwimmsättel müssen mit Copaslip auf den Bolzen geschmiert werden, um maximalen Kontakt von Belägen und Scheibe herzustellen. Dadurch wird auch Klemmen und Bremsenquietschen vermieden.

## 2. Bremsscheibe

Ein geringer seitlicher Schlag ist besonders bei sehr schnellen Motorrädern wünschenswert, da er die Beläge zurückdrückt und somit deren Schleifen und Überhitzen vermeidet. Auslauftests (siehe Kapitel 11) können aufzeigen, wie stark die Beläge schleifen. Zu starker Seitenschlag erhöht den Hebelweg.

Die Überhitzung der Scheiben zeigt sich letztendlich durch Verfärbung des Metalls und anschließenden Bruch. AP bietet einen Bereich von temperaturempfindlichen Stiften und Farben an. Deren Farbe zeigt, welche Temperatur erreicht wurde. Der Scheiben- oder Belaghersteller gibt Auskunft über die maximal erlaubte Temperatur seiner Produkte.

### 3. Bremstrommeln

Bremstrommeln werfen sich manchmal durch Überhitzung oder Verschleiß. Die Trommel wird unrund, woraus sich ungleichmäßiger Kontakt und somit Rubbeln ergibt. Die Trommel muß konzentrisch ausgedreht oder ein neuer Laufring eingezogen werden. Die Beläge sollten so eingestellt sein, daß nur dann Kontakt entsteht, wenn die Bremse benützt wird. Ohne Betätigung sollten die Beläge nicht schleifen.

### 4. Bremsbeläge

Ein auflaufender Backen erzeugt an seinem auflaufenden Ende eine selbstverstärkende Kraft, die die Bremse giftig und schwierig zu bedienen machen kann. Die Wirkung kann durch Feilen einer Fase an der auflaufenden Kante verringert werden. Voraussetzung ist jedoch, daß geeignete Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden, um Staub des Bremsbelages zu vermeiden, der vermutlich Asbest enthält. Trommelbremsen mit zwei oder vier Bremsbacken müssen so eingestellt sein, daß jeder Backen gleichzeitig in Kontakt mit der Trommel kommt.

### 5. Bremsbeläge, Bowdenzüge für Bremsen, usw.

Sie sind alle schwer beweglich und steif und können leicht die Lenkbewegung begrenzen oder am Steuerkopf scheuern. Sie zeigen dabei die gleichen Symptome, wie ein zu fest angezogenes Steuerkopflager oder ein zu starker Lenkungsdämpfer. Verlegen Sie sie so, daß die Lenkung nicht davon betroffen ist. Bei flexiblen Hydraulikschläuchen sollte überprüft werden, daß sie sich unter vollem Betriebsdruck nicht aufweiten. In der Regel ist um die Leitung ein schmaler Ring zur Kontrolle montiert. Falls dieser sich nicht ohne Kraftaufwand über die volle Länge des Schlauches schieben läßt, sollte der Schlauch ersetzt werden (siehe Kapitel 6, Hydraulikschläuche und Flüssigkeit).

### 6. Bremsleitungen

Schmieren Sie die Bremsleitungen sorgfältig (außer es handelt sich um Nylonleitungen) und überprüfen Sie sie auf Überdehnung und sichere Montage.

## 7. Kettenflucht

Die Kette ist eine Quelle von Leistungsverlusten. Sie verschleißt schnell, wenn sie trocken läuft, verschmutzt oder schlecht eingestellt ist. Falls sie zu stramm gespannt ist, zerstört sie die Getriebelager und beeinträchtigt die Bewegung der Radaufhängung. Notieren Sie sich die Stellung der Kettenspanner, wenn die Kette exakt eingestellt ist, so daß Sie sie in Zukunft schnell und zuverlässig justieren können. Beachten Sie die Schmiermittel (siehe unten).

## 8. Kühlsystem

Bei flüssigkeitsgekühlten Motoren kann die Größe und die Lage des Kühlers die Leistung beeinflussen (siehe Kapitel 7). Sie trägt auch zum Gewicht bei. Einiges an Gewicht kann eingespart werden, wenn anstelle von separaten Ölkühlern das Kühlmittel dazu benützt wird, das Motoröl zu kühlen. Das kann entweder in Form eines zusätzlichen Kühlers erfolgen, durch den das Öl fließt, oder mithilfe eines Wassermantels um den Ölfilter (einige Motorräder und Pkws verwenden bereits eine dieser Methoden). Entlüften Sie die Leitung zum Ausgleichsbehälter. Überprüfen Sie, daß sich der Wassermantel und die Schläuche nach jedem Zusammenbau mit Kühlmittel füllen, ohne daß Luftblasen entstehen.

Die Kühlflüssigkeit ist in der Regel auf Aethylen-Glycol-Basis mit Gefrierschutz aufgebaut. Sie enthält Anti-Korrosions-Zusätze für Motoren aus Leichtmetalllegierungen mit weichem, destilliertem Wasser oder Wasser, daß abgekocht wurde. Eine 25-prozentige Lösung Gefrierschutz ergibt Sicherheit bis zu minus dreizehn Grad Celsius. Ein maximaler Schutz ist gewährleistet, wenn sechzig Prozent Gefrierschutzmittel verwendet werden.

Überprüfen und reinigen Sie die Kühlrippen und entfernen Sie Verstopfungen. Wenn über zwanzig Prozent Kühlrippen der gesamten Kühlerfläche beschädigt sind, sollte der Kühler erneuert werden.

## 9. Kurbelgehäuseentlüftung

Sie ist ein wichtiges Bauteil für die Leistungsentfaltung des Motors. Da Motorradmotoren sehr kompakt sind, ist das Kurbelgehäusevolumen und die Entlüftungskapazität in der Regel begrenzt. Kurbelgehäusepumpen trägt zu einem beachtlichen Anteil des Leistungsverlusts bei. Bei höheren Drehzahlen schleudern Viertaktmotoren eine Menge Öl ab. Insbesondere Motoren mit Naßsumpschmierung können viel Öl und Ölschaum durch die Entlüftung blasen. Es wird normalerweise in einer Entlüftungskammer aufgefangen und in den Motor zurückgeführt. Alles was hinter dieser Entlüftungskammer anfällt, wird in die Luftfilterbox geleitet und im Motor mit dem Kraftstoff/Luftgemisch verbrannt. Wenn die Luftfilterbox, wie bei Rennmaschinen üblich, entfernt wird, entfällt auch das Entlüftungssystem.

Um die Motorleistung zu verbessern, ist es notwendig, das größtmögliche Entlüftungssystem zu installieren. Dadurch wird der Druck im Kurbelgehäuse abgebaut (der auch im Raum um die Nockenwellen entsteht). Das Entlüftungssystem bildet auch einen Ausgang, der den Ölaustritt aus dem Motor ermöglicht. Ein Auffangbehälter ist bei Rennmaschinen obligatorisch. Eine bessere Lösung ist eine Falle, die das Öl zurückführt, wie die OE-Konstruktion, bei der der Auffangbehälter nur als Zwischenspeicher dient. Auf diese Weise brauchen Sie keine Zeit, um Auffangbehälter zu entleeren, und weniger Geld für Öl.

## 10. Elektrische Ausrüstung

An jeder getunten Maschine ist sie stark modifiziert, entweder um überflüssige Teile abzubauen, oder um eine leistungsfähigere Lichtanlage zu erhalten.

Die einfachste Form ist eine Zündeinheit mit eigener Funkenbildung, die keine Batterie braucht und völlig unabhängig arbeitet. Das kann erreicht werden, wenn ein Beleuchtungssystem mit Lichtmaschine benützt wird. Die einfachste Form ist ein Verlustsystem, das eine Batterie betreibt, die ausgetauscht wird, wenn ihre Leistung nachläßt.

Am zweckmäßigsten ist es, eine Lichtmaschine zu verwenden, die jedoch das Triebwerk belastet. Große Rotoren vertragen sich nicht besonders gut mit hoch drehenden Motoren. Falls eine Lichtmaschine verwendet wird, sollte sie mit einem Konus fest auf der Antriebswelle montiert sein. Kleinere Rotoren für den Wettbewerb sind von Spezialisten wie Mistral Engineering erhältlich. Sie sind die bessere Lösung. Ein Rennkit der Hersteller schließt vielleicht einen gängigen Wechselstromgenerator ein, falls das Motorrad für Langstreckenrennen benützt wird.

Positive elektrische Ladungen verursachen Korosion, speziell dort, wo zwei oder mehr Metalle miteinander verbunden sind. Die Verbindungsschraube wird ebenfalls zu einem elektrischen Leiter.

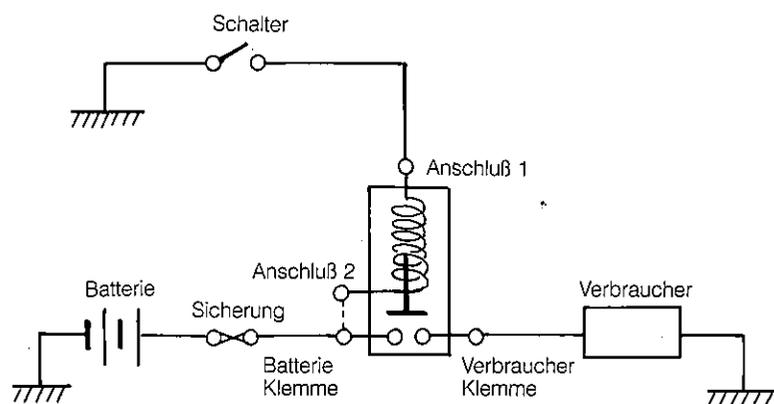


Abbildung 8.6 Schaltplan für ein Relais, das mit hoher elektrischer Last, wie zum Beispiel zwei Hauptscheinwerfern arbeitet.

Die Drahtstärke sollte der elektrischen Last angepaßt werden. Zwei Hauptscheinwerfer erfordern entsprechende Leitungsdurchmesser. Um die Masse der Kabel, die sich mit der Lenkung bewegen, gering zu halten, benützen Sie am besten dünne Kabel zu den Schaltern und anschließend ein Relais, mit dem die Lampen geschaltet werden. Die Verkabelung sollte mit dem Relais mitgeliefert werden. Tabelle 8.2 zeigt typische Verbindungen, Tabelle 8.3 zeigt Drahtstärkeberechnungen.

Tabelle 8.2 Elektrische Relaishersteller

Verbindung	Bosch Cibie Hella DIN 72 552	Lucas	Marelli	Cartier	Mixo	Others
Batterie	30, 30/51	C2	B	5	4	B, BAT, B+
Verbraucher	87	C1	H	3	1	
Klemme 1	85	W1	P	1	2	S
Klemme 2	86	W2	keiner	2	3	

- Batterie = + 12 V Versorgung, voller Strom
- Verbraucher = Verbindung zum Verbraucher (Hauptscheinwerfer usw.), volle Stromstärke
- Klemme 1 = Magnetventil gegen Erde oder Verbindung über den Schalter, geringe Stromstärke
- Klemme 2 = + 12 V Versorgung zum Magnetventil von der Batterie oder vom Schaltkreis, der mit einem geringen Strom geschaltet wird. Er kann mit 30 verbunden sein (C2 oder B), Klemme am Relais, zum Beispiel bei Relais mit drei Klemmen

Tabelle 8.3 Drahtstärken

Elektrische Drahtstärken werden in der Form n/d angegeben, wobei n die Anzahl der Kabel und d der Durchmesser jedes Kabels in Millimetern ist. 14/30 bedeutet zum Beispiel vierzehn Kabel, bei denen jeder 0,3 Millimeter Durchmesser hat. Der effektive Querschnitt (A) ist  $\pi d^2 n / 4$ , der in diesem Fall  $0,989 \text{ mm}^2$  beträgt.

Um die notwendigen Abmessungen zu berechnen, ist die entsprechende Stromstärke erforderlich:

$$I = P / v$$

oder

$$I = v / R,$$

wobei I der Strom in Ampere, P die benötigte Leistung in Watt und R der Widerstand in Ohm ist.

Die benötigte Querschnittsfläche ist:

$$A = I R / x$$

wobei R der spezifische Widerstand des Werkstoffes ( $0,0185 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  für Kupfer), l die gesamte Drahtlänge in Metern, einschließlich einer Erdung oder Rückführung vom Verbraucher und x die Spannungsspitze in der Leitung ist. Bei 12 V-Systemen beträgt x gleich 0,1 Volt in Schaltkreisen, die weniger als 15 Watt aufnehmen. Sie steigt bis 0,3 Volt für Lichtanlagen, die mehr Leistung aufnehmen und 0,5 Volt für Anlasser. Wo ein Relais montiert ist, beträgt die erlaubte Spannungsspitze zwischen dem Schalter und dem Relais 0,5 Volt. Bei 6 V-Anlagen gelten die halben Werte. Runden Sie den Querschnitt auf die nächste erhältliche Drahtstärke (A) auf und überprüfen Sie die Stromdichte die sich aus der Stromstärke dividiert durch die Querschnittsfläche des Drahts ( $I/A_1$ ) ergibt. Für Drähte bis zu  $2,5 \text{ mm}^2$  sollte sie  $10 \text{ A}/\text{mm}^2$  bei ständigem Betrieb nicht übersteigen, obwohl sie für kurze Beanspruchungen, wie zum Beispiel die Hupe oder den Anlasser bis auf  $30 \text{ A}/\text{mm}^2$  anwachsen kann.

Beispiel:

Für einen Meter Drahtlänge zur Versorgung von zwei 12 Volt – 60 Watt-Hauptscheinwerferbirnen.

$$\text{Stromstärke } I = 120/12 = 10 \text{ A}$$

$$\text{Spannungsspitze im Kabel } x = 0,3 \text{ V maximal}$$

$$\text{Kabelquerschnitt } A = 10 \times 0,0185 \times 1/0,3 \text{ A} = 0,617 \text{ mm}^2$$

Ein 14 /30er Kabel wäre also nach dieser Berechnung ausreichend. Die Stromdichte ( $10/0,989$  oder  $10,11 \text{ A}/\text{mm}^2$ ) liegt jedoch geringfügig darüber. Für einen zuverlässigen Betrieb wäre es besser, einen größeren Querschnitt und ein Relais zu verwenden, so daß nur ein leichtes Kabel zum Schalter am Lenker führen müßte. Ein 60 Watt-Hauptscheinwerfer sollte mit acht Ampere abgesichert sein. Zwei Scheinwerfer im gleichen Schaltkreis benötigen eine 16 Ampere-Sicherung.

Hochspannungszündkabel sollten nicht nahe beieinander und parallel zu anderen Leitungen, einschließlich Zündkabeln, geführt werden, da ein Kabel im anderen Induktionsströme erzeugen kann, die Fehlzündungen verursachen oder die Leistung der Zündkerzen verringern können.

Batterien sind schwer und sperrig. Sie können oft durch kleinere ersetzt werden. Umgedreht reicht, wenn die Lichtmaschine entfernt wird, ein Verlustsystem aus. Die Leistung wird normalerweise in Amperestunden (A h) über eine Entladezeit von zehn

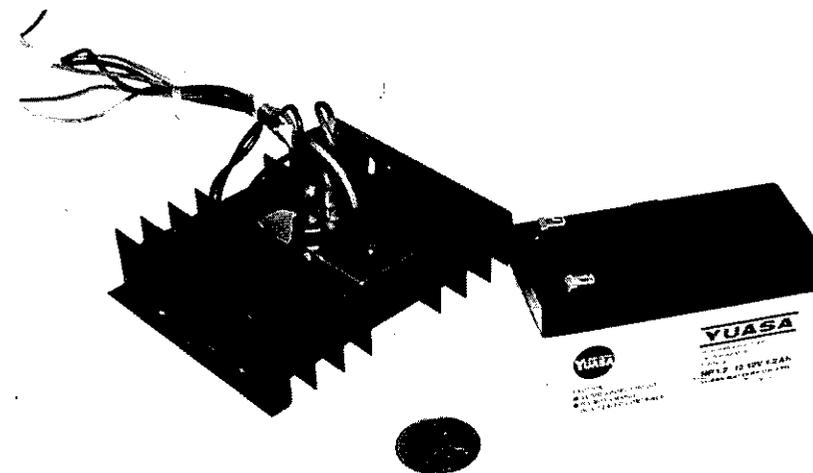


Abbildung 8.7 Eine Regler/Gleichrichtereinheit mit Kühlflächen, von Peter Roberts gebaut, um eine 12 Volt-Moped-Lichtmaschine zu betreiben und eine 1,2 Ah Yuasa-Batterie aufzuladen. Sie ist die kleinste Einheit, die Strom für ein Magnetventil in einem Stickstoffoxid-System liefert.



Abbildung 8.8 Goodridge UK liefert ein breites Angebot von Anbauteilen, wie Kabelklemmen, Kabelbindern, Schrumpfschläuchen, Schutzhüllen für Bremsleitungen, Halter und Muttern, Armaturen für Bremsleitungen, usw.

Stunden angegeben. Um die notwendige Leistung zu berechnen, müssen Sie den momentanen Verbrauch aller ständigen Abnehmer aufaddieren. Vernachlässigen Sie dabei kurzfristige Verbraucher wie zum Beispiel Blinker, Hupe, usw. und ziehen Sie den Strom ab, den der Generator bei einer der Praxis entsprechenden Drehzahl liefern kann. Die Batterie muß die Differenz liefern. Bei zwei Ampere hält eine Batterie mit zehn A h maximal fünf Stunden oder weniger, wenn sie sich nicht in optimalem Zustand befindet. Meist wird die Batterie nur als Puffer benutzt, um kurzfristig Ladung abzugeben. Sie nützt als Stabilisator bei Vorgängen wie dem Einsatz eines Blinkers, um die Leistung aufrecht zu erhalten, wenn der Motor im Leerlauf dreht oder um den Anlassermotor durchzudrehen. Bei einem Rennmotorrad sind die meisten Funktionen überflüssig. Die Batterie kann durch eine kleinere Einheit, speziell durch eine kompakte Trockenbatterie oder einen Akku, ersetzt werden. In diesem Fall ist eventuell ein von einer Zener-Diode geregelter Bypass notwendig, um überschüssige Leistung vom Generator aufzunehmen und ein Überladen der Batterie zu verhindern. Die Diode muß auf einem Kühlblech montiert sein. Die Batterie kann oft durch einen passenden Kondensator wie zum Beispiel Sprague WB 36D 1721, ersetzt werden, der mit 16 Volt 23 Ampere und 68000 F arbeitet. Seine Abmessungen betragen 65 Millimeter im Durchmesser und 115 Millimeter in der Länge.

Falls eine Bleisäurebatterie verwendet wird, sollte deren Lage so niedrig wie möglich gewählt werden. Geben Sie acht, daß die Entlüftung so verlegt ist, daß keine Säure auf das Motorrad laufen kann (speziell bei starkem Bremsen, beim Beschleunigen oder wenn das Motorrad umfällt). Entlüfterausgänge sollten immer an freien Stellen enden. Elektrische Bauteile und Verbindungen sollten mit Silikonspray WD 40, einem Produkt von RTV oder Vaseline geschützt werden.

## 11. Motormontage

Die Motoraufhängungspunkte müssen die Motorleistung und Vibrationen übertragen. Sie unterliegen der Werkstoffermüdung und sollten auf Brüche untersucht werden. Falls elastische Aufhängungen starre Platten ersetzen, werden Vibrationen erwartungsgemäß zu einem Problem. Rahmenrohre, die den Motor halten, sollten beim Anziehen der Befestigungsschrauben nicht nachgeben. Verwenden Sie Beilag- und Distanzscheiben, um eine sichere Verbindung herzustellen. Motorplatten können auch dazu dienen, den Motor vor oder rückwärts zu versetzen. Dadurch ändert sich der Schwerpunkt und die Gewichtsverteilung.

## 12. Befestigungen

Es gibt davon eine Vielzahl, die vom Schnellverschluß über konventionelle Schrauben und Muttern reichen. Eine Übersicht in einem Zubehörkatalog gibt Aufschluß über die gewünschten Verbindungselemente. Einige davon sind mit einem großen Bund verschweißt, der direkt in ein Glasfaserlaminat eingebettet werden kann. Bei normalen

Motorrädern ist es von Vorteil, alle Schrauben, die hoch beansprucht sind, durch solche von besserer Qualität zu ersetzen. Als Ersatz gibt es komplette Kits, bei denen in der Regel Imbusschrauben die üblichen Kreuzschlitzschrauben ersetzen. Imbusschrauben haben zum Teil sehr hohe Festigkeit und sind deswegen schwer zu bohren, wenn ein Sicherungsdraht verwendet werden soll. Wenn sie dort verwendet werden, wo ein hohes Anzugsdrehmoment gefragt ist, beginnt sich die schmale Fläche unter dem Kopf zu verformen und das Bauteil zu beschädigen, so daß eine flache Unterlegscheibe, die mindestens genauso hart wie die Schraube ist, Abhilfe schafft, die Last verteilt und Beschädigungen vermeidet. Lehrbücher sagen, daß Bolzen niemals auf Scherung beansprucht werden sollten. Bei Fahrwerkskomponenten sind sie das immer. Ein Bolzen muß genügend Festigkeit besitzen, um auch im Bereich der Gewindegänge Scherkräfte übertragen zu können. Der glatte Schaft muß einen guten Halt in den zu verbindenden Teilen haben. Schrauben, die nur auf Scherung beansprucht werden (Kettenräder, Bremscheiben, Bremszangen, usw.), sollten fest angezogen werden. Bolzen, die zweifach auf Scherung beansprucht werden, sind nicht mehr als ein Bolzen mit einem Gewinde am Ende, um ein Ausreißen zu verhindern. Sie sollten mit einer Sicherungsmutter versehen oder die Mutter mit Draht gesichert werden.



Abbildung 8.9 Die Unterlegscheibe sollte so gewählt werden, daß der Schlitz der Kronenmutter mit der Bohrung im Gewinde übereinstimmt, wenn die Mutter vollständig angezogen ist.

Schrauben und Bolzen haben eine höhere Festigkeit, wenn das Gewinde gerollt anstatt geschnitten ist. Ihre Dauerfestigkeit ist größer, wenn der Schaft der Schraube auf den Kerndurchmesser des Gewindes verringert wird. Das ist da nicht möglich, wo die Schraube auf Scherung beansprucht wird. Hier kann eine Entspannungskerbe zwischen dem Gewinde und dem Schaft helfen. Stark auf Zug beanpruchte Schrauben sind in EN 19, EN 22 bis EN 24-Stahl erhältlich. Ihre Festigkeitsklasse (höher bedeutet fester) ist in der Regel eingestempelt oder mit einem Code auf dem Sechskantkopf gekennzeichnet.

Am besten geeignet sind Bundmuttern, auch wenn nur spezielle Zulieferer wie Goodridge sie liefern können. Ein Spezialist legt sich eine Vielzahl von Muttern auf Lager. Es gibt verschiedene Anwendungen. Sie reichen von Muttern, die ohne Schraubenschlüssel angezogen werden können über Kontermuttern, die gegenüber der Hauptmutter festgezogen werden, wobei diese von einem Schraubenschlüssel gehalten wird, um das Gewinde zwischen den beiden Muttern örtlich zu verformen. Es

gibt Stopmuttern mit Nyloneinlage oder verformten Gewindegängen. Kronenmuttern und geschlitzte Muttern, um einen Splint oder eine Federsicherung aufzunehmen (siehe Sicherungsmuttern oben). Andere Arten der Befestigung (wie Gabelköpfe, verstellbare Kettenglieder, sphärische Lager, usw.) können notwendig sein. Sie sind jedoch nur in Fachgeschäften erhältlich. Versuchen Sie es bei Lagerherstellern, Händlern von Bootszubehör, Flugzeugzubehör und Rennwagenzubehör, Rahmenbauern und speziellen Zulieferern von Komponenten wie Bremsleitungen, Ölkühlern, usw.

### 13. Fußrastenhalterungen

In erster Linie müssen sie genügend Festigkeit besitzen, um das zweifache des Fahrergewichts zu tragen, ohne sich zu verbiegen. Während der Testfahrten ist es nützlich, wenn sie für unterschiedliche Sitzpositionen verstellt werden können. Wenn diese aber einmal festgelegt ist, reicht die geringste Größe bei ausreichender Festigkeit. Falls die Fußraste eventuell den Boden berührt oder mit irgendetwas kollidiert, sind klappbare Fußrasten notwendig. Wenn Zusammenstöße wahrscheinlich sind, sollten einige Gedanken für die Montage verwendet werden. Es ist besser, wenn die Fußrastenhalterung oder die Fußraste abbricht als wenn der Rahmen bei einem Crash beschädigt wird. Deswegen sollten Ersatzfußrasten oder komplette Halterungen bereit liegen, um die defekten Teile zu ersetzen. In diesem Fall sollten die Montagebolzen das schwächste Glied des Zusammenbaus sein. Dort wo die Fußrasten voraussichtlich in Kontakt mit harten Gegenständen kommen, zum Beispiel bei Moto Cross oder Enduro-Einsätzen, verringern klappbare Rasten den Schaden. Eine kleine Kette oder ein Kabel, das das Pedal mit dem Rahmen unter dem Motor verbindet, hilft zu verhindern, daß die Pedale nach hinten gebogen werden.

Die Fußrastenhalterungen können oft ein Schutzschild bilden, um zu verhindern, daß der hintere Hauptbremszylinder beschädigt wird oder um Hebel oder Züge dahinter zu verlegen.

### 14. Rahmenbrüche

Stahlrahmen, die abnormer Belastung oder Vibrationen unterliegen, sind auf Dauerbrüche gefährdet. Signale für Schäden sind Abblättern der Farbe an der beschädigten Fläche oder rostiges Wasser, das aus den Rahmenrohren herausläuft. Bei Rahmen aus Leichtmetalllegierung, speziell bei leichten Rennrahmen, treten Brüche am wahrscheinlichsten in der Nähe hoch beanspruchter Punkte wie dem Steuerkopf, der Schwingenachse, Motorbefestigungen und überall dort auf, wo große Querschnittsänderungen sind. Schweißnähte selbst haben in der Regel eine sehr hohe Festigkeit. Die schwächste Zone liegt neben der Schweißnaht. Rahmen sollten sorgfältig in regelmäßigen Abständen und nach Zusammenstößen untersucht werden.

### 15. Lenkerhälften und Hebel

Als das am weitesten abstehende Teil des Motorrads ist der Lenker bei einem Zusammenstoß das am meisten gefährdete Teil. Es wird daher bei einer Kollision am ehesten beschädigt. In Wettbewerben, wo die Wahrscheinlichkeit groß ist, sollte man kürzere Lenkerhälften in Betracht ziehen und den Gasdrehgriff und die Hebel so weit nach innen verschieben, daß sie nicht beschädigt werden. In diesem Fall sollten abgerundete Einsätze am Ende der Lenkerhälften montiert werden. Es besteht auch die Möglichkeit, die Hebel so zu montieren, daß sie den Boden nicht berühren, wenn das Motorrad auf die Seite fällt oder die Klemmungen so anzuziehen, daß die Hebel sich verdrehen, bevor sie sich verbiegen. Die Klemmschrauben müssen gesichert werden, um zu verhindern, daß sie sich weiter lockern. Handprotektoren aus Kunststoff sind nützlich.

Es gibt Lenkerhälften aus Leichtmetalllegierung, die das Massenträgheitsmoment um die Lenkachse verringern. Sie haben bei einem Zusammenstoß jedoch keine so hohe Festigkeit.

Handhebel sind in verschiedenen Formen und Längen erhältlich. Es ist wichtig, daß sich der Hebel der Vorderradbremse nicht verbiegen kann.

### 16. Zündkabel

Schützen Sie die Kabel und Kabelverbindungen mit Hilfe eines Silikonsprays. Schalter, usw. sollten mit RTV oder Vaseline gegen Wasser abgedichtet werden. Führen Sie Hochspannungskabel so kurz wie möglich aus und verlegen Sie sie nicht parallel zu anderen Kabeln oder Rahmenrohren. Verlegen Sie den kompletten Kabelbaum, falls möglich, so, daß er schnell ersetzt werden kann. Zündspulen und Verstärkerkreise können überhitzen. Sie müssen in einem kühlen Luftstrom nicht zu nahe an oder in der Abluft eines Kühlers oder Ölkühlers liegen.

### 17. Instrumente

Instrumente sind vor Vibrationen und Wasser zu schützen. Eine flexible Montage auf Schaumstoff ist die beste Lösung. Sie sollten im Blickfeld des Fahrers liegen, wenn er auf der Geraden seine Position einnimmt. Der Drehzahlmesser sollte so gedreht werden, daß der rote Bereich in der 12Uhr-Position liegt. Andere Instrumente sollten so gedreht sein, daß die Nadel unter normalen Betriebsbedingungen vertikal oder horizontal steht oder mit einem markanten Punkt eine Linie bildet, so daß der Fahrer Veränderungen besser wahrnimmt.

## 18. Sicherungsmuttern

Es gibt verschiedene Wege, Muttern zu sichern. In jedem Fall sollte die Mutter mit dem nötigen Drehmoment angezogen und dann mit einem Schraubenschlüssel festgehalten werden, während sie gesichert wird.

1. Kontermutter  
In der Regel eine Mutter, die nur halb so hoch wie eine normale Mutter ist, wobei eine normale Mutter denselben Zweck erfüllt. Die Kontermutter wird gegen die Hauptmutter festgezogen, die während diesem Vorgang festgehalten werden muß.
2. Sicherungslack  
Es gibt verschiedene Ausführungen mit unterschiedlicher Sicherungswirkung. Sie müssen auf saubere, trockene Gewindegänge aufgetragen werden.
3. Stopmuttern mit Nyloneinlage und verformtem Gewinde  
Beide Ausführungen sollten nur einmal verwendet werden, da bereits beim ersten Mal ein Gewinde in das Nylon oder in den verformten Teil der Schraube eingeschnitten wird. Eine ähnliche Wirkung kann durch eine gewöhnliche Mutter erreicht werden (falls das Ende der Schraube eben mit der Mutter abschließt), indem zentral auf die Schraube ein Hammerschlag ausgeübt oder der auslaufende Gewindegang mit dem Hammer verformt wird.
4. Sicherungsbleche  
Ein Blech, das in einer bestimmten Lage mit Splinten oder einer anderen Schraube festgeklemmt oder mit einer Lasche, die gegen die Schlüsselweite des Sechskants hochgebogen wird. Sicherungsbleche sollten nur einmal verwendet werden.
5. Kronenmutter und geschlitzte Muttern  
Sie werden benützt, um einen geteilten Splint oder einen Federsplint durch ein Loch in der Schraube zu schieben. In diesem Fall muß die Mutter so ausdistanziert werden, daß der Schlitz beim vorgeschriebenen Anzugsmoment mit der Bohrung übereinstimmt.
6. Sicherungsdraht  
In der Regel ein rostfreier Stahldraht in verschiedenen Abmessungen, der speziell für diesen Zweck angeboten wird. Er wird durch eine Bohrung im Sechskant der Schraube geführt und dann mit einer Kombizange (oder sogar einer speziellen Sicherungszange) verdrillt und mit einer anderen gebohrten Schraube oder einer entsprechenden Verankerung verbunden. Ein Ende wird durch die Verankerung gesteckt und anschließend beide Enden auf eine kurze Entfernung zusammengedreht. Der Sicherungsdraht sollte tangential zur Mutter verlaufen, und zwar in der Richtung, in der beim Anziehen des Drahts die Mutter festgezogen wird.

## 19. Schmiermittel

1. Züge  
(außer nylonbeschichtete) erfordern eine vollständige Schmierung mit einem dünn-

flüssigen Öl-SAE10W/30 mithilfe eines Seilzugölers. PTFE-Schmiermittel aus der Sprühdose sind geeignet, wenn sie in den Zug eindringen können.

2. Ketten  
O-Ring-Ketten benötigen Schmiermittel, um sie vor Korrosion zu schützen. Überprüfen Sie die Verträglichkeit mit den O-Ringen. Andere Bauarten erfordern regelmäßige Reinigung und Schmierung. Ein EP 90-Getriebeöl reicht aus, einige Kettenfette halten aber länger. Falls die Kette in einem Tiegel mit Kettenfett erwärmt wird, darf es keinesfalls kochen. Kettenfette aus der Sprühdose haben ein Lösungsmittel, das es dem Schmiermittel ermöglicht, in die Rollen zu kriechen. Anschließend verflüchtigt es sich und läßt das dickflüssigere Fett innen zurück. Einige sind empfehlenswert (Motul, Silcolene, Rock Oil, Filtrate), einige nicht. Für Motorräder, die im Gelände bewegt werden, empfiehlt sich ein Kettenfett, das am Äußeren der Kette trocknet, so daß der Schmutz nicht kleben bleibt.
3. Schwingenlagerungen  
Ein gewöhnliches Fett auf Lithiumbasis reicht vollkommen aus. Eine wasserabweisende Variante ist hilfreich und kann dazu verwendet werden, Bohrungen am Rahmen zu verschließen, um Schmutz fernzuhalten. Dadurch ist das Motorrad nach dem Wettbewerb leichter zu reinigen.
4. Radlager  
Verwenden Sie, speziell für Radlager, ein Fett mit einem hohen Schmelzpunkt.
5. Bolzen an Auspuffflanschen und Schwimmsattelbremsen  
Verwenden Sie Copaslip (ein Mittel, das sehr hitzebeständig ist).
6. allgemeine Verschraubungen  
Ein leichtes Motorenöl hilft beim Zusammenbau und schützt vor Korrosion. Überprüfen Sie, wie es sich auf das Anzugsmoment auswirkt.
7. Rahmen  
Ein Einsprühen mit einem WD 40-Öl schützt gegen Korrosion und erleichtert die Reinigung des Fahrzeugs. Säubern Sie anschließend die Bremscheiben.

## 20. Steuerkopflager

Die Lager sollten bei Motorrädern, die auf welligen Pisten verwendet werden, oder die das Vorderrad die meiste Zeit in der Luft haben, regelmäßig überprüft und sorgfältig eingestellt werden, nachdem die Klemmungen der oberen Gabelbrücke gelöst wurden. Bei der Montage neuer Kegelrollenlager sollten die Steuerkopflager angezogen werden, um die Lager auf ihren Sitz zu drücken und anschließend gelöst und eingestellt werden.

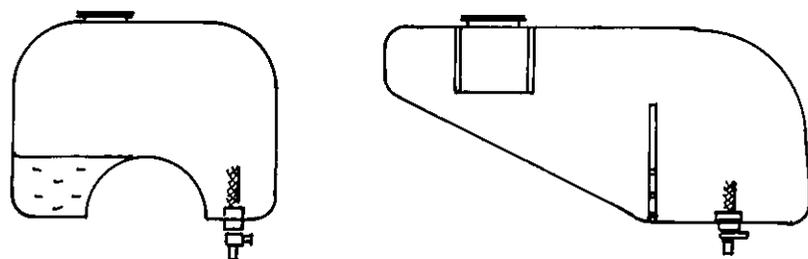
## 21. Tanks

Bei Rennmotorrädern sind die Tanks aus einer Leichtmetalllegierung oder Kunststoff und müssen in Gummi gelagert werden. Entlüftungsleitungen sollten in einer Schleife verlegt werden, so daß Kraftstoff oder Öl auch dann nicht auslaufen kann, wenn das

Motorrad umfällt. Rückschlagventile in den Entlüftungsleitungen müssen regelmäßig auf Funktion überprüft werden. Leitungen sollten Freigang haben. Falls ein Kraftstofffilter verwendet wird, sollte die Durchflußrate bei einem geringen Kraftstoffstand im Tank überprüft werden. Auf Vergaserhöhe muß der Durchfluß 0,35 p Liter pro Stunde für einen Viertakter und 0,6 p Liter pro Stunde für einen Zweitakter betragen, wobei p die Spitzenleistung in PS ist. Das ist die Mindestanforderung, wobei die Leitung einen größeren Durchfluß haben sollte, wenn Sie wünschen, daß immer genügend Kraftstoff zu den Hauptdüsen fließt.

Ein Tunnel im Boden des Tanks sorgt oft dafür, daß sich bei einer leeren Hälfte noch Kraftstoff in der anderen befindet. Das sollte vermieden werden. Falls notwendig, muß ein weiterer Kraftstoffhahn im Tank untergebracht werden.

Falls ein Tank für ein Motorrad neu hergestellt wird, sollten Prallbleche eingebaut werden, um zu verhindern, daß der Kraftstoff beim Bremsen oder Beschleunigen vor und zurück schwappt. Hauptsächlich um zu vermeiden, daß sich die verschiebende Kraftstoffmasse auf das Fahrzeug auswirkt und in die Entlüftung gedrückt wird oder bei sinkendem Kraftstoffstand den Ablauf freilegt. Wenn eine Schnelltankanlage zum Befüllen benutzt werden soll, muß ein separater Entlüfter installiert werden, da der Kraftstoff nur so schnell eingefüllt werden kann wie die Luft einweicht.



**Abbildung 8.10** Kraftstofftanks müssen mit Schwallblechen versehen sein, um zu verhindern, daß der Kraftstoff in die Entlüftung oder in den Einfüllstutzen gedrückt und bei niedrigerem Kraftstoffstand der Ablauf freigelegt wird. Vermeiden Sie Tanks mit Tunneln, bei denen der Kraftstoff in der, dem Benzinhahn gegenüberliegenden Seite zurückbleibt. Verwenden Sie andernfalls zwei Kraftstoffhähne.

Jeder neue Tank muß gründlich ausgewaschen sein. Er braucht einen innenliegenden Kraftstofffilter. Es gibt unter den Rennfahrern eine Praxis, normale Kraftstofftanks aufzupumpen, um ihr Fassungsvermögen zu erhöhen, ohne ihre äußere Form wesentlich zu verändern oder den Boden exakt dem Motorrad anzupassen, um die Mulde als zusätzliches Volumen auszunutzen. Dabei ist zu beachten, daß diese Verfahrensweise vollkommen sicher ist, wenn sie mit einer Hydraulikpumpe erfolgt und der Tank vollständig mit Wasser oder Öl gefüllt ist. Falls es mit komprimierter Luft erfolgt, wird der Tank zu einer riesigen Bombe.

## 22. Anzugsmomente

Schrauben erfüllen vielfältige Aufgaben. Sie dienen zur Verbindung von Teilen oder als Klemmung und werden auf Zug oder Scherung beansprucht. Daher unterscheiden

sich auch die Anzugsmomente voneinander. Schrauben, die auf einfache Abschierung belastet sind, müssen fest angezogen werden. Andere erfordern eine Ausdistanzierung, damit sie kein Spiel haben. Falls sie nicht fest angezogen werden können, müssen sie bis zu einem gewissen Grad gesichert werden.

## 23. Reifenluftdruck

Unterschiedliche Reifendrucke wirken sich stark auf die Haftung und das Fahrverhalten aus. Straßen- und Rennreifen sollten nicht unter 1,8 bar betrieben werden. Enduro- oder Crossreifen, die mit diesem Druck arbeiten, brauchen Klammern, um zu verhindern, daß sie sich auf den Felgen drehen. Der maximale Betriebsdruck liegt bei ungefähr drei bar, während die mögliche Spitzenlast (um den Reifen bei der Montage fest auf die Felge zu drücken) fünfzig Prozent über dem Betriebsdruck, das heißt, bei viereinhalb bar liegt. Reifendrucke werden stets für kalte Reifen angegeben. Beim Testen ist es hilfreich zu wissen, wie hoch die Drücke bei verschiedenen Reifentemperaturen sind. Rennteams benutzen oft eine Druckluftflasche mit Stickstoff zum Reifen füllen, da damit der Druckunterschied zwischen dem kalten und stark erwärmten Reifen sehr gering ist. In der Regel steigt der Druck im Reifen, der kalt auf 2,6 bar aufgepumpt wurde, bei Erwärmung auf zirka 3 bar an. Die Druckmessung ist nicht so einfach, da die meisten Meßgeräte nach einigen Monaten Benutzung in der Genauigkeit nachlassen. Das zeigte die fehlende Übereinstimmung von einem halben Dutzend Meßgeräten (die nicht alle richtig gehen können).

## 24. Schwingungen

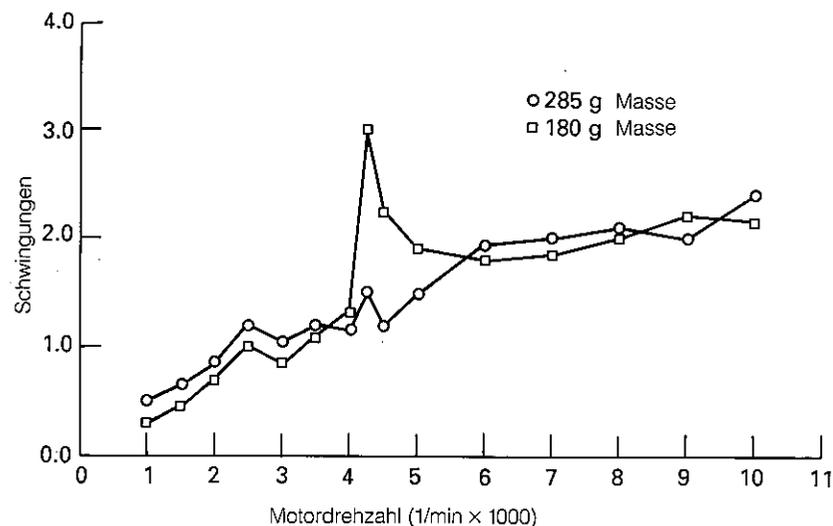
Schwingungen haben zwei Ursachen: den Motor oder ein Rad, das Rundlauffehler oder eine Unwucht hat.

Ein Rad hat eine geringere Frequenz, die proportional zur Fahrgeschwindigkeit ist. In diesem Fall kann die Unwucht leicht korrigiert werden (siehe Kapitel 4).

Motorvibrationen können von einem Fehler wie einer verdrehten Pleuellwelle oder einem gelockerten Lichtmaschinenrotor verursacht werden. Sie können aber auch für diesen ganz bestimmten Motor typisch sein. Wenn Ausgleichswellen entfallen, schwerere Pleuellwellen montiert werden, wenn der Motor höher dreht oder ganz einfach in einem anderen Rahmen montiert ist, können sich die Vibrationen verstärken. Bei Einzylindern, Zweizylindern und allen Motoren, die die Pleuellwelle dazu benutzen, die Pleuellwellenmasse zum Teil auszugleichen, kann es erforderlich sein, den Wuchtfaktor zu ändern. Das verringert zwar nicht die Vibrationen, verschiebt sie aber in eine andere Ebene, in der der Rahmen nicht so empfindlich ist. Wenn man flexible Motoraufhängungen oder elastische Lagerungen verwendet, wird weniger Bewegung auf den Rahmen übertragen. Daraus können aber andere Probleme wie zum Beispiel Auspuffbrüche oder Kraftstoffverschäumen entstehen.

Motoren mit Ausgleichswellen, Reihenvierzylinder und V-Motoren haben einen guten Massenausgleich der ersten Ordnung. Die Massenkräfte zweiter Ordnung, die

höherfrequente Schwingungen erzeugen ( mit doppelter Motordrehzahl!) sind geringer als die Massenkräfte erster Ordnung. Nur Boxer-Motoren, Reihenmotoren mit sechs Zylindern oder Motoren mit Ausgleichswellen, die mit doppelter Motordrehzahl laufen, haben einen perfekten Ausgleich der Massenkräfte erster und zweiter Ordnung. Massenkräfte zweiter Ordnung, die nicht ausgeglichen sind, stellen in der Regel kein Problem dar, außer wenn sie eine bestimmte Frequenz auf Teile wie den Lenker, usw. übertragen.



**Abbildung 8.11** Lenker, die an einer Suzuki GSX 1100 E mit den Motorvibrationen in Resonanz geraten. Das Problem lösten größere Gewichte in den Lenkerenden (Suzuki).

Falls es sich nur auf ein Teil auswirkt, besteht die einfachste Lösung darin, die Eigenfrequenz dieses Teils zu ändern (zum Beispiel durch Längenänderung), die Schwingungen zu verschieben (bei Erhöhen der Masse) oder durch eine flexible Montage zu isolieren. Die meisten Hersteller installieren Gewichte in den Lenkerenden. Die Darstellung zeigt, wie dramatisch Resonanzschwingungen werden und wie wirksam einige Gramm das ändern können.

## 25. Räder

Korrigieren Sie jegliche Unwucht oder Ungleichförmigkeit (siehe Kapitel 4). Radlager sollten so ausdistanziert sein, daß Distanzscheiben zwischen und außerhalb der Radlager montiert werden, die keine Vorspannung auf die Lager oder die Gabelbeine ausüben (die Achse muß vor der Klemmung der Gabelbeine festgezogen werden). Falsche Distanzierung kann zu Bremsenschleifen und Überhitzen, zu schlechtem Ansprechverhalten der Gabel und hohem Verschleiß in den Lagerbuchsen führen.

## Kapitel 9

# Verkleidungen

Die Verkleidung eines Motorrads erfüllt mehrere Zwecke. Sie kann verschiedene Bauteile aufnehmen, dazu dienen, Teile des Motorrads und des Fahrers vor dem Wetter oder einem Zusammenstoß zu schützen, oder sie einfach vor den Vibrationen und der Wärmeentwicklung des Motors zu isolieren. Sie kann aerodynamische und stylistische Vorteile bieten und der Anbringung von Nummerntafeln (oder Werbung) dienen. Wenn das Motorrad mit einer engen Verkleidung versehen wurde, benötigt es weitere Einrichtungen wie Lufterlässe, um die Luftansaugung sicherzustellen.

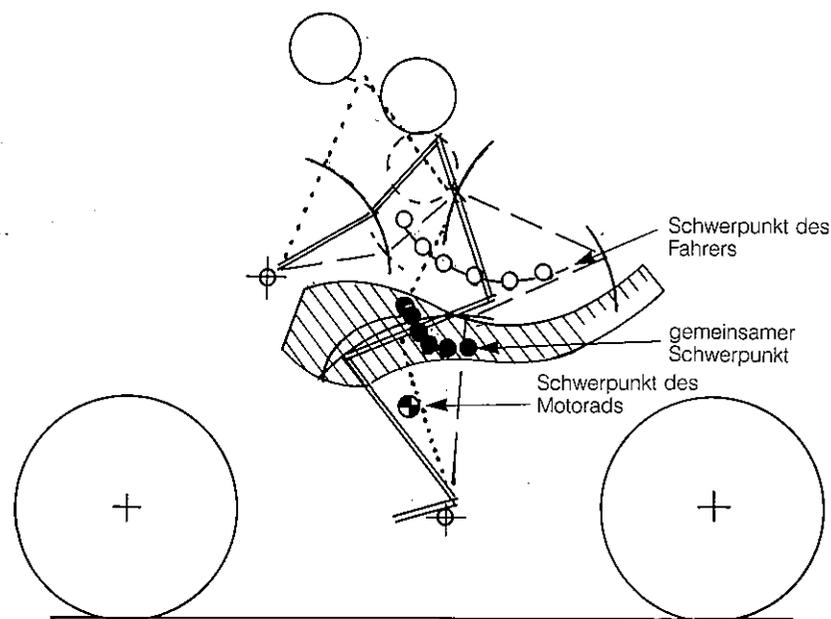
All das kostet zusätzlich Gewicht. Wenn aber die Konstruktion ökonomisch ausgeführt ist, können verschiedene Aufgaben mit der gleichen Verkleidung erfüllt werden. Trotz höherem Gewicht kann ein Vorteil an Leistungsfähigkeit erzielt werden. Gute Aerodynamik verbessert die Geschwindigkeit bei gegebener Leistung. Eine gute Sitzposition und günstige Ergonomie verbessert das Fahrverhalten. Guter Komfort reduziert die Ermüdung des Fahrers und verbessert das Fahrverhalten über einen langen Zeitraum.

Aerodynamik ist in Kapitel 7 beschrieben. Komfort und Fahrverhalten neigen dazu, subjektiv bewertet zu werden, was aber nicht bedeutet, daß es unmöglich ist, die Fahreigenschaften objektiv zu beurteilen. In den meisten Fällen gibt es entweder ein fahrfertiges Chassis, das auf den Sitz und die Armaturen wartet oder eine komplette Maschine, auf der der Sitz und die Armaturen nur in einem geringen Umfang geändert werden können. Das bestimmen die Gesamtmaße wie Länge, Breite und minimale Höhe. Andere wesentliche Dinge müssen in diesem Stadium festgelegt werden. Überprüfen Sie den gesamten Federweg und den Platzbedarf für die Auspuffanlage, Luftfilteranlage, verschiedene Tanks und elektrische Komponenten sowie Bauteile wie Ausgleichbehälter, usw. Ziehen Sie gleichzeitig die vorhersehbaren Auswirkungen eines Zusammenstoßes in Betracht. Falls einige dieser Anbauteile unnötige Gefahr oder Kosten verursachen können, sollten sie, wenn möglich, irgendwo anders untergebracht werden.

In diesem Stadium ergibt sich eine grobe Festlegung durch die Anforderungen von selbst. Eine Maßstabszeichnung hilft. Wenn die Hauptkomponenten festgelegt wurden, ist der nächste Schritt die Sitzposition des Fahrers. Sein Gewicht, das weit oben plziert ist, hat dieselbe Bedeutung wie die des gesamten Rennmotorrads. Sie hebt den Schwerpunkt an und kann ihn beträchtlich nach hinten oder vorn verschieben. Das wirkt sich ernsthaft auf die Fahreigenschaften, das Bremsen und den Kraftschluß aus. Bei normaler Sitzposition des Fahrers liegt sein Schwerpunkt mehrere Zentimeter vor seinem Nabel. Ob er höher oder tiefer liegt, hängt davon ab, wie seine Beine an der Hüfte und den Knien abgewinkelt sind.

Wenn die anzustrebende Lage des Schwerpunkts des Motorrads bekannt ist (siehe Kapitel 2 und Anhang), kann die Sitzposition des Fahrers angepaßt werden. Bei

einigen Motorrädern, zum Beispiel bei Moto Cross und Enduro-Maschinen, ist eine veränderliche Schwerpunktlage wünschenswert. Ein nach hinten verschobener Schwerpunkt ergibt bei rutschigem Untergrund, eine bessere Haftung. Eine Verschiebung des Schwerpunkts nach vorn erlaubt höhere Bremskräfte und verringert die Gefahr von Wheelies bei hoher Zugkraft am Hinterrad. Deshalb sollte der Fahrer die Gelegenheit haben, seine Sitzposition soweit wie möglich verändern zu können. Je höher der Fahrer sitzt, um so größeren Einfluß hat seine Gewichtsverlagerung. Deshalb ist zum Beispiel bei einem Trial-Motorrad die Sitzposition um so besser je höher sie ist.



**Abbildung 9.1** Wenn der Fahrer die Möglichkeit hat, seine Sitzposition stark zu verändern, kann sich auch die Lage des Schwerpunkts um mehrere Zentimetern verschieben. Bei Off-Road-Motorrädern bestimmt das den maximalen Kraftschluß und somit die Form des Sitzes und der Lenker/Fußrasten-Position.

Die Lage des Gesamtschwerpunkts kann vorausgesagt werden, wenn die Lage des Motorradschwerpunkts bekannt ist. Er liegt auf der Verbindungslinie zwischen dem Schwerpunkt des Motorrads und dem des Fahrers. Der Abstand beträgt  $x$  zum Schwerpunkt des Motorrads und  $y$  zum Schwerpunkt des Fahrers, woraus sich ergibt:

$$x/y = R/W$$

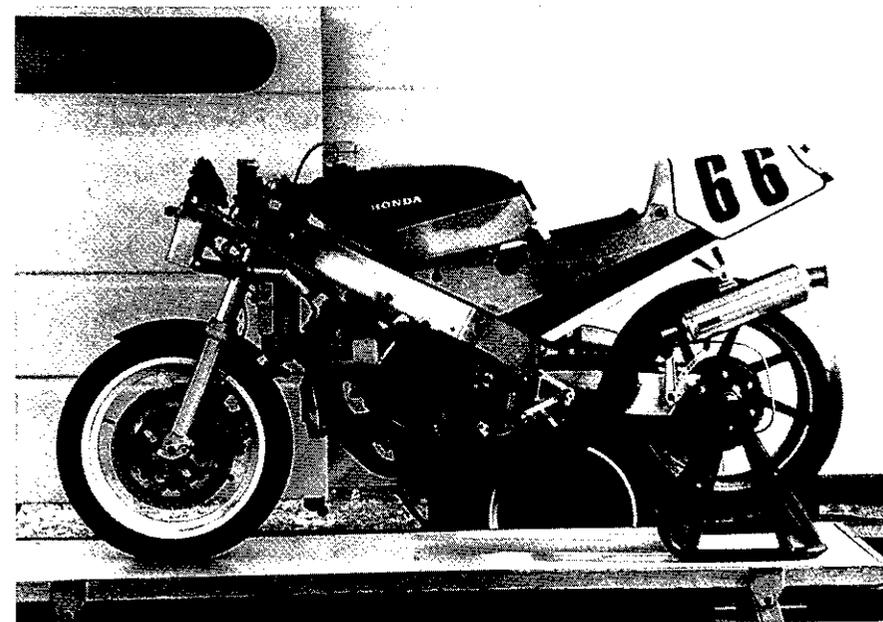
wobei  $R$  das Gewicht des Fahrers und  $W$  das des Motorrads ist. Wenn Sie also die gewünschte Lage des Schwerpunkts für die Gesamtmasse von Fahrer und Motorrad einsetzen, können Sie die Position des Fahrers festlegen.

Neben dem Komfort ist auch die Bewegungsfreiheit des Fahrers in Betracht zu ziehen. Bei einem Off-Road-Motorrad sollte ihm die Lage der Lenker und Fußrasten maximale Bewegungsfreiheit nach vorn und hinten erlauben. Der Tank, der Sitz und

die Form des Kotflügels bilden einen Kreisbogen, den der Fahrer nachvollzieht, wenn er sein Gewicht vollständig nach hinten verlagert bis seine Beine durchgestreckt sind, sich vorwärts in die natürliche Sitzposition bewegt oder nach vorn verschiebt und sich dabei aufrichtet.

Bei einem Straßenmotorrad oder einer Rennmaschine gibt es weniger Möglichkeiten der Bewegungsfreiheit. Eine gewisse Beweglichkeit ist jedoch notwendig, um den Fahrstil des Fahrers zu unterstützen, und ihm die Möglichkeit zu geben, sein Gewicht in Kurven seitlich zu verlagern. In der Regel wird er sich nach vorn und zu beiden Seiten bewegen, so daß die Lage des Tankabschlusses dabei helfen kann. Das Verhältnis zwischen Sitz, Lenker und Fußrasten ist sehr wichtig: Es bildet ein vielfach variables Dreieck mit nur einer idealen Auslegung der Sitzverhältnisse. Der Sitz wird festgelegt durch die benötigte Schwerpunktlage. Je mehr der Lenker nach vorn verlagert ist, um so weiter müssen die Fußrasten nach hinten verschoben sein. Der Bereich der Lenkerposition hängt von der Größe des Fahrers und den Fahrbedingungen ab. Bei einer Rennmaschine muß er sich soweit wie möglich nach unten ducken können, um hohe Geschwindigkeiten zu erzielen und die beste Übersicht und Manövrierfähigkeit zum Kurvenfahren haben. Die Lage des Lenkers bestimmt dann die Fußrastenposition so, daß der Fahrer Gewicht auf die Fußrasten verlagern und schnell bewegen kann und einen natürlichen, komfortablen Winkel an der Hüfte und den Knien hat.

Den richtigen Weg und die richtigen Abmessungen zu finden, besteht darin, auf einer Menge Motorräder zu sitzen und die abzumessen, auf denen man sich wohl fühlt und jene, die nicht in Frage kommen. Beurteilen Sie dann, wo die Unterschiede liegen.



**Abbildung 9.2** Der Kraftstofftank wurde bei dieser RC 30 angehoben, um der Luftfilterbox mehr Platz zu geben.

Nach der ersten Festlegung der Sitzposition ist es notwendig, sämtliche Bewegungen auszuführen, um zum Beispiel die Fußrasten für die Bodenfreiheit höher zu setzen oder andere Merkmale zu erreichen. Wenn das Motorrad an den Fahrer angepaßt wird, sollte er seine normale Fahrkleidung tragen. Was sich nämlich in Jeans und einem Hemd komfortabel anfühlt, kann sich mit Lederkleidung und Protektoren ganz anders anfühlen.

Die Breite und der Winkel des Lenkers ist der letzte beeinflussbare Faktor. Das beste Gesamtgefühl ergibt sich dann, wenn der Fahrer problemlos den Gasgriff voll öffnen, die Bremse schnell erreichen und Gas und Bremse zusammen bedienen kann. Es gibt Schnellgasgriffe, obwohl sie bei vier Vergasern die Betätigung erschweren können. In der Regel bleibt nicht sehr viel Spielraum für Einstellungen, da dreißig Millimeter Freigang und ein Mindesteinschlagwinkel von zwanzig Grad zu jeder Seite gefordert werden (FIM-Mindeforderungen für Straßenrennen, zusammen mit einer Mindestlenkerbreite von 450 Millimetern). Für Wettbewerbsmaschinen sind die vorgeschriebenen Abmessungen im ACU-Handbuch dargestellt, das jeder Bewerber bei Erneuerung seiner Rennlizenz erhält.

Die Form der Verkleidung kann nun nach aerodynamischen Grundsätzen um den Fahrer gestaltet werden, wobei alle Komponenten ihre Aufgabe so gut wie möglich erfüllen müssen. Die vorderen Verkleidungshalter können zum Beispiel auch Lampen und Instrumente aufnehmen, wodurch separate Halter entfallen und die gesamte Masse von der Lenkung ferngehalten wird. Der Sitz und die Seitenverkleidungen können Zusatztanks, elektrische Steckverbindungen, usw. aufnehmen.

Ein Problem besteht darin, Verkleidungen herzustellen. Dem Motorradbauer stehen dafür vier oder fünf Werkstoffe zur Auswahl:

1. Stahlblech
2. Leichtmetallblech
3. Glasfaser (glasfaserverstärkter Kunststoff)
4. Kohlefaser
5. Kunststoffplatten
6. vakuumgeformte Kunststoffteile

Bleche (1 und 2) sind für geringe Anforderung geeignet, aber schwierig, in kleinen Mengen zu erhalten. Es erfordert eine spezielle Ausrüstung und Geschick, sie in eine ordentliche Form zu bringen.

Glasfaserverstärkter Kunststoff kann hohe Festigkeit bei geringem Gewicht haben. Er erfordert ein Minimum an Ausrüstung und mehr Geduld als Geschicklichkeit. Dasselbe gilt für kohlefaserverstärkten Kunststoff, der höhere Festigkeit hat und noch leichter, aber teurer und schwieriger mit Kunstharz zu tränken ist.

Kunststoffplatten haben einen begrenzten Anwendungsbereich. Vakuumgeformte Kunststoffe können jede Form annehmen. Sie haben keine so hohe Festigkeit wie glasfaserverstärkter Kunststoff, sind aber sehr leicht und erreichen eine gute Oberfläche. Ein Überblick in den gelben Seiten weist jeden Spezialisten in der Umgebung aus. Wahrscheinlich sind sie unter Oberbegriffen wie Kunststoffhersteller aufgeführt. Die Formen werden nach denselben Grundsätzen wie die für glasfaserverstärkte Kunststoffe hergestellt, sind aber in der Größe begrenzt.

## Glasfaserverstärkter Kunststoff

Die Herstellung eines Verkleidungsteils ist sehr arbeitsintensiv, da zuerst eine Positivform produziert werden muß. Sie ist eine exakte Wiedergabe des gewünschten Teils aus Holz, Gips usw. Sie wird benötigt, um eine Negativform herzustellen. Von dieser wird das benötigte Glasfaserteil abgenommen. Anschließend ist es relativ einfach, mehrere identische Teile zu formen. Die Herstellung des ersten Teils bereitet aber eine Menge Arbeit. Glasfaserverstärkter Kunststoff kann auch angewendet werden, um ein bestehendes Teil zu modifizieren. Löcher und Beulen können mit einem Reparaturkit für Karosserien aufgefüllt werden. Er hat wahrscheinlich die geeignetsten Werkstoffe, die richtige Zusammensetzung, die entsprechenden Mengen und die spezielle Anleitung für ihre Verwendung.

Bei größeren Mengen können die Werkstoffe einzeln bei speziellen Herstellern wie Bootszulieferern usw. gekauft werden. Der Kunststoff nimmt dabei die Gestalt der Form an und härtet aus. Die richtige Zusammensetzung von Kunststoff und Härter, die gründliche Vermischung und die geeignete Temperatur zum Aushärten sind sehr wichtig. Das Kunstharz wird durch Glasfaser-, Kohlefaserlagen oder jeden anderen geeigneten Werkstoff, entweder in willkürlichen Lagen oder nach einem bestimmten Muster, verstärkt. Es ist wichtig, daß die Matten vollständig in die Konturen der Form gepreßt werden und das Kunstharz die Matten ohne Luftblasen vollständig durchtränkt. Das ist schwieriger als es klingt.

Glasfasern, die in der Regel verwendet werden, bestehen aus E-Glas (Calcium-Aluminium-Silikat), das in Werkzeugen durch Bohrungen gespritzt wird, um Fasern mit 9 bis 15-tausendstel Durchmesser herzustellen. Es hat eine hohe Zugfestigkeit und dringt leicht in die Haut ein. Deshalb sollten bei der Verarbeitung geeignete Handschuhe getragen werden. Die Fasern sind in verschiedener Form erhältlich: in kurzen Strängen geschnitten, in Strängen locker gebunden oder in Matten gewebt.

Andere Werkstoffe wie Kevlar und Kohlefaser sind in Webmatten erhältlich. Sie haben bei gleichem Gewicht eine höhere Zugfestigkeit als Glasfaser, sind aber teurer und schwieriger zu verarbeiten. Wenn die Festigkeit nicht entscheidend und kein extrem dünner Querschnitt notwendig ist, hat Glasfaser Vorteile.

### Positivform

1. Sie ist eine exakte Wiedergabe des gewünschten Gegenstands und kann oft aus einem bestehenden, entsprechend modifizierten Teil hergestellt werden.
2. Sie wird aus Holz, Polyurethanschaum, Blech, Drahtgeflecht, Glasfaser und jedem anderen geeigneten Werkstoff geformt. Beachten Sie, daß Formteile (für flache Teile) aus Polyethylen, Polypropylen und Silikongummis keine Bindemittel entlassen (siehe unten). Es ist oft zweckmäßig, diese Werkstoffe in Formen einzulegen, um spezielle Teile herzustellen.
3. Formen werden ausgeschnitten, gefüllt und am Schluß ihre Oberfläche geglättet. Jede Unregelmäßigkeit wird im nachfolgenden Prozeß exakt wiedergegeben. Beachten Sie, daß Ausbuchtungen sehr schwierig aus den Formen herauszunehmen sind. Scharfe Kanten müssen verstärkt werden. Sie werden gern in sprödem Kunstharz geformt, der leicht beschädigt wird. Verwenden Sie deshalb, so weit wie möglich, sanft verrundete Ecken und Kanten. Falls das Werkstück so

ausgeführt ist, daß es nicht aus der Form herausgenommen werden kann, muß es durch eine trennbare Negativform in zwei Hälften geteilt werden.

4. Auf die fertige Positivform muß als Trennmittel Wachs auf die Oberfläche poliert werden, um ein Verbacken mit den Glasfasern zu verhindern.

#### **Negativform**

1. Sie ist eine glasfaserverstärkte Kunststoffform, die von der Positivform abgenommen wird und daher von innen nach außen gedreht ist.
2. Kunstharz wird auf die Negativform aufgebracht. Es ist nicht verstärkt und bildet eine glatte harte äußere Haut.
3. Glasfasermatten (oder andere) sollten mit der Schere so auf Länge geschnitten sein, daß die Form ausgelegt werden kann. Es ist wichtig, daß die Matten den Konturen folgen können und sich eine gute Überlappung zwischen zwei nebeneinander liegenden Matten ergibt. Das Kunstharz kann ungefähr zwanzig Minuten verarbeitet werden. Das begrenzt die zu verarbeitende Menge.
4. Solange die Kunstharzschicht klebrig ist, beginnen Sie mit dem Verlegen der Glasfasermatten. Mischen Sie Kunstharz und Härter sorgfältig, genau in den vom Hersteller vorgeschriebenen Anteilen. In der Regel sollte die Verarbeitung bei Raumtemperatur (15 -20 Grad Celsius) erfolgen. Je niedriger die Temperatur ist, um so länger dauert die Aushärtung. Überprüfen Sie, ob bei Verarbeitung im Freien bei geringeren Temperaturen der Werkstoff immer noch geeignet ist. Die Werkstoffe sind oft giftig, vermeiden Sie deshalb Augenkontakt, tragen Sie eine Schutzcreme auf oder entsprechende Handschuhe.
5. Um die volle Festigkeit des Bauteils zu erreichen, ist es wesentlich, daß das Kunstharz die Glasfasermatten vollständig durchdringt. Verwenden Sie Roller (in verschiedenen Größen erhältlich), um das sicherzustellen. Quetschen Sie jegliche Luftblasen aus dem Kunststoff heraus. Die Positivform muß sehr steif sein, um zu verhindern, daß das Endprodukt verzogen ist. Sie wird in der Regel eineinhalb mal so dick wie das Endprodukt ausgeführt. Aufwendige Formen können durch Einlegen von Holz oder Metall in die Positivform oder durch Verwendung, zum Beispiel von Plastikflaschen, verstärkt werden, um die benötigte Form zu erhalten.
6. Sie sollte ein oder zwei Wochen liegen bleiben und zwar um so länger, je geringer die Temperatur ist. Die beiden Formen können dann durch Klopfen auf die Außenseite mit einem Gummi- oder Holzhammer getrennt werden. Falls es notwendig ist, die Kanten zu säubern, kann das mit einem Stanley-Messer nach 24 Stunden erfolgen. Die Kanten sollten mit Kunstharz abgedeckt werden.

#### **Abschließende Arbeiten:**

1. Zusammenfassend ist das eine Wiederholung der Schritte, die nötig sind, um eine Negativform herzustellen: – Trennmittel, Kunstharz mit Pigmenten, falls sie sie farbig wünschen.- Kunstharz und Glasfaser, ebenso mit einem Pigment, falls sie eine Durchfärbung des gesamten Verbundes wünschen
2. Gewebte Matten oder Stränge geben höhere Festigkeit und besseren Halt an Kanten, es ist aber schwieriger, sie gründlich zu durchtränken.
3. Luftfeuchtigkeit bewirkt ein Aufgehen der abgeschnittenen Enden von Strängen, speziell bei Kevlar. Deshalb sollten Kanten sofort mit Kunstharz abgedeckt werden.

Der Zuschnitt sollte nach 24 Stunden oder dann, wenn der Verbund stark genug ist, mit einem Stanley-Messer erfolgen.

4. Halten Sie bei Auflegen der Glasmatten gleiche Dicke ein. Verwenden Sie extra Lagen, um Schwachstellen zu verstärken oder laminieren Sie Haken, Halter oder Beilagscheiben ein, um Montagepunkte zu verstärken. Kevlar oder Kohlefaser kann verwendet werden, um den Verbund zu verstärken.
5. Abhängig von der Temperatur kann das Werkstück nach einigen Tagen aus der Form genommen werden. Rennverkleidungen sind in der Regel sehr dünn und neigen zum Brechen oder Einreißen. Falls sie für Langstreckenveranstaltungen oder für den Einsatz auf der Straße modifiziert sind, sollten sie an ihren Montagepunkten und überall, wo sie sich verformen können, durch Einlegen von Glasfasern oder gewebten Matten an der Innenseite verstärkt werden.

# Schweißen

Colin Taylor

Das Thema Schweißen deckt einen großen Erfahrungsbereich ab. Es ist so also ob man über die Zimmermannsarbeit, also den Umgang mit Holz, spricht und dabei alles von der Herstellung von Paletten aus grob gehauenen Balken bis zum Einlegen von Rosenholz bei Schränken einschließt.

Oft gibt es Situationen, in denen gebrochene Teile geschweißt werden müssen. Ebenso gibt es spezielle Teile, die verstärkt werden müssen, um nicht auszufallen. Welches der vielen Schweißverfahren dabei am geeignetsten ist, und warum, ist eine der schwierigsten Entscheidungen.

Eine Übersicht über die verfügbaren Verfahren zeigt:

## Autogenschweißen

Durch den Vorteil der großen Vielseitigkeit, haben fast alle Reparatur- oder Schweißfachbetriebe zumindest eine bewährte Anlage mit Gasflaschen und einem Schweißbrenner.

Zur Herstellung eines Rahmens von Rennmotorrädern aus hochwertigem kaltgezogenem Stahlrohr mit Legierungsbestandteilen wie Chrom und Molybdän zur Erhöhung der Festigkeit, eignet sich die Technik des Hartlötens am besten. Dieser Prozeß hat den Vorteil, daß die Rohre nicht geschmolzen werden und somit keine Probleme durch die Vermischung verschiedener Metalle entsteht. Sie tritt dann auf, wenn zum Beispiel Chrom mit anderen Elementen verschmolzen wird. Außerdem erlaubt diese Technik bei korrekter Anwendung einen Aufbau von Messing in der Verbindung, die der Struktur Festigkeit gibt. Die natürliche konkave Lötstelle einer hartgelöteten Verbindung ergibt einen allmählichen Übergang der Belastung, mit der die Verbindung fertig werden muß. Wenn dieselbe Verbindung, zum Beispiel durch Lichtbogenschweißen (siehe unten) hergestellt würde, ergäbe sich eine plötzliche Querschnittsveränderung und somit eine Belastungsspitze, die unter Last eher ausfällt. Außerdem entstehen dabei unerwünschte Chromkarbide.

Obwohl weiterentwickelte Verfahren das autogene Schweißen in Zukunft zweifellos ablösen, können wirksame Reparaturen und Verstärkungen mit diesem Verfahren durchgeführt werden, solange eine geschickte Hand den Brenner führt. In der Regel wird es aber heute nur noch für Notreparaturen oder dort wo sehr dünne Werkstoffe geschweißt werden, eingesetzt.

## Lichtbogen- oder Elektroschweißen

Wie beim vorhergehenden Verfahren verwenden viele Schweißfachbetriebe heute und auch in Zukunft diese Technik. Als elektrisches oder Lichtbogenschweißen bekannt, verwendet dieses Verfahren elektrische Leistung, um mithilfe eines Lichtbogens zwischen dem Werkstück und der abbrennenden Elektrode Wärme zu erzeugen. Wenn die Elektrode aus einem ähnlichen Werkstoff wie das Werkstück besteht (Elektrode und Werkstück aus Stahl) und vom Lichtbogen geschmolzen wird, bildet es einen Teil der Schmelze. Das Werkstück selbst wird ebenso geschmolzen, woraus eine Verbindung entsteht. Schweißungen, die keine Verbindung eingehen, können damit ebenso durchgeführt werden. Bei den meisten Lichtbogenverfahren tritt aber beim Schweißen eine Verschmelzung ein.

Die örtliche Aufheizung in der Schmelzzone ist durch die große, zugeführte Energie sehr hoch. Deshalb gibt es bei Teilen, die elektrisch geschweißt wurden, eine Neigung zu örtlichen Spannungskonzentrationen. Bei Bauteilen mit groß dimensionierten Querschnitten ist das nicht grundsätzlich ein Problem. Wenn aber dünnwandige Teile verarbeitet werden, können Schwierigkeiten auftreten (siehe metallurgische Erklärung).

## Schutzgasschweißen (MIG, MAG)

Es ist die heute am meisten angewendete Technik. Oft als MIG (Metall Inert Gas)-Schweißen angegeben, benützt dieses Verfahren eine abbrennende Drahtelektrode, die elektrisch geladen ist und durch einen Halter in die Schmelze geführt wird. Ein Schutzschild von Gas umgibt dabei die gesamte Schmelze.

Die Eigenschaft des Schutzgases gibt dem Verfahren seinen korrekten Namen. Wenn ein Inert-Gas verwendet wird (Helium oder Argon zum Beispiel) wird das Verfahren MIG genannt. Wenn das Schutzgas jedoch in chemischer Hinsicht aktiv ist, wird der Prozeß MAG (Metall Aktiv Gas) genannt. Die Auswahl des Schutzgases hängt von den Reaktionseigenschaften des zu schweißenden Werkstoffs ab. Nickel, Chrom und Aluminium erfordern beim Schweißen ein Inert-Gas. Stahl kann jedoch mit einem Verbundgas wie Kohlendioxid oder einem kommerziell hergestellten Gas wie Argon geschweißt werden. Wenn das CO<sub>2</sub>-Schutzgas auf hohe Temperaturen aufgeheizt wird, die an der Schweißoberfläche auftreten, zerfällt es und produziert dabei Kohlenmonoxid und freien aktiven Sauerstoff. Auch wenn das Schutzgas seine Eigenschaften beim Schweißen in der Schmelze ändert, verhindert es eine Verschlechterung der Schweißung durch die Einwirkung von Gasen wie Stickstoff oder Wasserdampf, wie sie in der Regel in der Umgebungsluft auftreten. Der Trick, Probleme mit Verunreinigungen in der Schmelzzone, die von freiem aktivem Sauerstoff herrühren, zu umgehen, ist es, der Schmelzelektrode Elemente hinzuzufügen, die eine natürliche Anziehungskraft auf aktiven Sauerstoff ausüben. Silizium, Aluminium und Mangan sind die meist verwendeten Zusätze. Titan und Zirkonium werden ebenso verwendet.

Die Vorteile des Schutzgasschweißens gegenüber dem Lichtbogenschweißen sind zahlreich. Das notwendige Geschick, um wirkungsvolle Schweißungen herzustellen, ist geringer als beim Lichtbogenschweißen. Die Länge der herzustellenden Schweißnaht ist im Vergleich zum Lichtbogenschweißen, bei dem die Länge der Elektrode die

Länge der Schweißnaht bestimmt und bei der der Schweißvorgang unterbrochen werden muß, wenn eine neue Elektrode fällig ist, nahezu unbegrenzt. Der größte Vorteil resultiert jedoch aus dem großen Bereich der Stromstärke, die bei gleichem Drahtdurchmesser angewendet werden kann.

Beim Lichtbogenschweißen bestimmt der Durchmesser der Elektrode den Schweißstrom. Bei einer Elektrode mit zwei Millimeter Durchmesser liegt der ideale Betriebsstrom bei zirka 75 Ampere. Um bei einem Werkstück mit dickerem Querschnitt eine Durchschmelzung zu erreichen, ist ein höherer Strom erforderlich (es wird eine höhere Energie benötigt). Bei einer Verdoppelung des Stroms ist eine Elektrode mit ungefähr 3,5 Millimeter Durchmesser nötig. Jede kleinere Elektrode wäre nicht in der Lage, den Strom zu führen. Das Schutzgasschweißen erlaubt bei einem vorgegebenen Drahtdurchmesser einen sehr breiten Strombereich. 0,8 Millimeter decken zum Beispiel eine Stromstärke von 60 bis 190 Ampere ab. Das liegt an dem linearen Zusammenhang des Vorschubs, mit dem der Draht der Schmelze zugeführt wird und der Stromstärke, die für das Schmelzen nötig ist, auch als Burn-Off-Rate bekannt. Falls Sie eine größere Stromstärke brauchen (weil Sie Werkstücke mit großer Wandstärke schweißen), müssen Sie nur den Regler für die Stromstärke und den Drahtvorschub hochdrehen bis die Burn-Off-Rate korrekt ist. Das ist auch in jedem Schweißfachbetrieb zu sehen, wo die richtige Einstellung auf einem Abfallstück ausprobiert wird. Der Schweißer sucht dabei die korrekte Burn-Off-Rate für die Stromstärke aus, die er gewählt hat.

Es ist viel einfacher, auf diese Art zu schweißen als zu versuchen, beim Lichtbogenschweißen die idealen Bedingungen aufrecht zu erhalten. Neben dem linearen Zusammenhang zwischen Drahtvorschub und Strom ist die Stromstärke dann korrekt, wenn sie den passenden Drahtvorschub zur gewünschten Burn-Off-Rate gewählt haben.

In Produktionsanlagen von Motorradrahmen werden diese in nahezu allen Fällen schutzgasgeschweißt. Aluminiumrahmen und Stahlrahmen werden normalerweise mit Argon als Schutzgas geschweißt.

Um Stahlrahmen zu modifizieren oder zu reparieren, ist es von Nutzen, Argon oder CO im MAG-Verfahren zu verwenden. Für Aluminiumrahmen ist ein Argonschutzgas im WIG (Wolfram-Inert-Gas) am günstigsten (was eine anschließende Wärmebehandlung erfordert).

WIG-Schweißen, der Prozeß auch als Argon- Lichtbogenschweißen oder WIG bekannt, hat insofern einige Ähnlichkeiten zum Autogenschweißen, als der Lichtbogen nur als Wärmequelle benutzt wird, um die Teile, die geschweißt werden, zu schmelzen. Die Perfektion dieses Verfahrens und vor allem die Temperatur des Lichtbogens erlaubt Schweißnähte von hoher Qualität.

Grundsätzlich wird eine nicht abbrennende Wolfram-Elektrode in einen Halter geklemmt, der ein Schutzgas zuführt, um die Schweißzone abzudecken. Am häufigsten wird Argon benutzt, obwohl in einigen Ländern, speziell in den USA, hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen Helium zur Anwendung kommt, da es in den USA keine großen natürlichen Argon-Quellen gibt.

Durch Verbindung des Werkstücks und der Elektrode, mit jeweils einer Seite des Schweißgenerators mit einer Hochfrequenzeinheit, kann ein Lichtbogen hergestellt werden, der von Inert-Gas geschützt, nahezu alle Metalle schmilzt. Dabei werden Temperaturen von dreitausend Grad Celsius erreicht. Wolfram schmilzt bei 3410 Grad

Celsius, weswegen die Elektrode offensichtlich keinem Abbrand unterliegt. Ein leichtes Anschmelzen der Elektrode kann zwar, speziell wenn die Schweißvorschriften nicht eingehalten werden, vorkommen. Normalerweise ist der Schweißvorgang dem Autogenschweißen ähnlich, bei dem ein Schweißdraht in einer, vom Lichtbogen erzeugten Schmelze geschmolzen wird. Außergewöhnliche Schweißreinheit kann dabei erzielt werden. Reparaturen von Teilen aus Aluminium- und Magnesiumlegierung werden normalerweise in dieser Art ausgeführt.

## Andere Verfahren

Es gibt viele andere Schweißtechniken, die große Vorteile haben, durch ihre hohen Kosten aber kaum im Schweißbetrieb um die Ecke oder bei Reparaturbetrieben zu sehen sind. Als Produktionstechniken werden sie häufig angewendet. Elektronenstrahlschweißen ist eine aufregende Produktionstechnik. Eine erhitzte Wolframkathode wird als hochkonzentrierte thermische Energiequelle benutzt. Ein gebündelter Elektronenstrahl wird von der Kathode in Richtung des Werkstücks beschleunigt. Spannungen bis zu 150 Kilovolt werden verwendet, um den Elektronenstrahl zu beschleunigen. Sehr dünne (0,1 Millimeter) und sehr dicke (200 Millimeter) Werkstücke können in einem einzigen Durchgang mit einer sehr schmalen Schweißzone geschweißt werden. Das Verfahren wird ausschließlich in einer Vakuumkammer durchgeführt. In der Regel werden Teile, die mit Elektronenstrahlen geschweißt werden, wärmebehandelt und vor dem Schweißen fertig bearbeitet. So wird beispielsweise ein Zahnrad oder ein Ritzel auf eine Kurbelwelle geschweißt, wobei die Bauteile einzeln bearbeitet, mit einem Stift oder Splint fixiert, und dann zusammengeschweißt werden. Andere spezielle Verfahren wie Plasma-Schweißen, Explosionschweißen, Reibungsschweißen, Widerstandsschweißen und Rollnaht- oder Punktschweißen haben spezielle Vorteile, sind aber als Verfahren zur Modifizierung oder zur Reparatur nicht praktikabel.

## Werkstoffe

Das Wissen über die Metalle, die benutzt werden, hängt von der Wahl des Schweißverfahrens ab. Es ist wichtig, einen Überblick über das Gefüge eines Werkstücks zu haben, bevor Sie sich entscheiden, ob sie es als Schweißkonstruktion ausführen, und wenn, ob es zuverlässig geschweißt werden kann, welches Verfahren gewählt wird und ob eine zusätzliche Wärmebehandlung erforderlich ist.

In der Regel sind Metalle grundsätzlich aus einem Verbund geringer Korngröße aufgebaut. Abhängig von einer Anzahl von Faktoren, kann sich die Korngröße ändern. Je geringer sie ist, um so höhere Festigkeit hat ein Teil. Offensichtlich ist es wichtig, die Wirkung zu berücksichtigen, die durch die unumgängliche Wärmezufuhr beim Schweißen entsteht.

Einige Werkstoffe können durch die Zufuhr von Legierungsbestandteilen verstärkt werden, die zu zwischenmetallischen Verbindungen innerhalb des Metalls führt und sie durch die Herstellung einer feineren Kornstruktur gegenüber einem gleichen Teil desselben Metalls ohne Legierungsbestandteile verstärkt.

Aus Praxis- oder Kostengründen haben einige Metalle keine Legierungsbestandteile. Komponenten, die aus diesen Metallen hergestellt werden, müssen ihre Festig-

*0 Remb*

keit aus anderen Faktoren ableiten. Bei Stahl ist es zum Beispiel möglich, die Festigkeit durch eine Wärmebehandlung zu verbessern. Um das zu erreichen, muß ein bestimmter Anteil Kohlenstoff im Stahl angelagert sein. Durch Erhitzung auf eine bestimmte Temperatur und anschließende Abkühlung in einem festgelegten Zeitraum ist es möglich, beträchtliche Änderungen der Festigkeit, der Härte und der Korngröße zu erzielen. Jeder Schweißvorgang, der bei einem solchen wärmebehandelten Teil ausgeführt wird, wirkt sich natürlich auf die Festigkeit aus.

Aluminium ist ein weiterer Werkstoff, der auf Wärmebehandlung reagiert. Solange er bestimmte Legierungselemente wie Kupfer, Magnesium und Silizium, die am häufigsten angewendet werden, enthält. Harte hochfeste zwischenmetallische Verbindungen können sich im Aluminium bilden, wenn eine spezielle Aufheizung, Temperierung und Abkühlung eingehalten wird. Auch hier kann die Kornstruktur durch diese Behandlung verfeinert und verstärkt werden. Jede Schweißung muß bei der Wärmebehandlung des Werkstoffs berücksichtigt werden.

Wenn wir bedenken, daß Schweißen grundsätzlich einem örtlichen Gießverfahren nahekommt, erkennt man, wie wichtig es ist, die Struktur des Werkstoffs vor dem Schweißen zu kennen. Wenn Werkstoffe einer Wärmebehandlung nicht unterzogen werden sollen, um ihre Festigkeit zu erhöhen, ist es möglich, dieselbe Wirkung durch mechanische Verformung des Metalls zu erzielen, um geringere Korngrößen und somit eine höhere Festigkeit des Werkstoffs zu erreichen. Ein solches Teil eines nicht wärmebehandelten Stahls kann durch Kaltumformung verstärkt werden. Es gibt Beispiele für solche Teile wie zum Beispiel Kraftstofftanks aus Stahl. Obwohl sie aus sehr dünnem stark verformbaren unlegiertem Stahlblech hergestellt werden, haben sie, nachdem sie über eine Reihe von Formen gezogen wurden, um die Kontur des Kraftstofftanks zu erhalten, eine beachtliche Festigkeit und Steifigkeit, weil ihr Gefüge durch den Umformprozeß immer mehr verfeinert wurde. Aluminiumwerkstücke können in der gleichen Weise verstärkt werden. Wenn aber Werkstücke, die durch mechanische Umformungen wie Schmieden oder Pressen verstärkt wurden, beim Schweißvorgang einer Wärmezufuhr ausgesetzt sind, verringert sich die Festigkeit nahe der Schweißzonen, da die zugeführte Wärme die Korngrößen in ihr natürliches Format überführt. Beim Schweißen neigen Werkstücke dazu, örtlich auszuglühen, was zum Teil unerwünscht sein kann.

## Bauteile

Bevor Sie mit dem Schweißen beginnen, muß eine Reihe von Fragen beantwortet werden. Am wichtigsten ist die Fähigkeit des Teils, nach der Schweißung den Belastungen im Betrieb standzuhalten. Falls ein Teil gebrochen ist, und nun geschweißt werden soll, ist es wichtig, zu ergründen, warum das Teil brach. Ist es auf eine unzulässige Belastung, zum Beispiel bei einem Zusammenstoß, zurückzuführen? Fiel es aus, weil seine Konstruktion schlecht war? Schwächt die Schweißung des Werkstücks andere Teile aufgrund des örtlichen Festigkeitsverlusts? Offensichtlich können nicht alle Faktoren genau ergründet werden. Mit normalen Mitteln ist es möglich, eine ausreichend genaue Voraussage zu treffen. Es ist auch nicht eindeutig möglich vorherzusagen, welche Teile erfolgreich geschweißt werden können und

Abbildung 10.1 Schweißverfahren

Verfahren	Autogen-schweißen	Hart-löten	Licht-bogen-schweißen	Wolfram-inertgas (WIG)	Metall-inert-gas (MIG)	Metall-aktivgas (MAG/CO <sub>2</sub> )	spez. Verfahren
Werkstoff (Beispiel)							
unlegiertes Stahlblech (Schalldämpfer)	gut	gut	möglich	gut	optimal	möglich	
kaltgezogene Stahlrohre (Rahmen, Lenker)	verringert Festigkeit	optimal	nein	verringert Festigkeit	nein	nein	
elektrische Widerstandsschweißung von Stahlrohren (Schalldämpfer)	gut	gut	möglich	gut	optimal	möglich	
warmgeschmiedete Stahlplatten (Auspuffhalterung)	möglich	möglich	gut	möglich	optimal	möglich	
Schmiedeteile (Pleuel, Kurbelwelle)	nein	nein	nein	nein	nein	im Notfall	Elektronenstrahl oder Laser
Grauguß (Zylinderbuchsen, Nockenwelle)	nein	besser als kleben	nicht ideal	nein	nein	nein	Eutektisches Pulververfahren
Stahlguß (Schwingenenden, einige Steuerköpfe)	nein	geringe Festigkeit	nein	nein	nein	mit speziellem Schweißdraht	
tiefgezogene Bleche aus Aluminiumlegierung (Öltank, Kettenschutz)	möglich	nein	nein	optimal	optimal	nein	
Stranggußprofile aus Aluminiumlegierung (Rahmen, Schwinge)	möglich	nein	nein	optimal	optimal	nein	
Schmiedeteile aus Aluminiumlegierung (Hand- und Fußhebel)	nein	nein	nein	gerade noch möglich	nein	nein	
Schmiedeteile aus Aluminiumlegierung (Bremspedal, Lenkerhälften)	nein	nein	nein	verringert Festigkeit	nein	nein	
Sandgußteile aus Aluminiumlegierung (Zylinderkopf)	gerade noch möglich	nein	nein	ideal	nein	nein	
Druckgußteile aus Aluminiumlegierung (Zylinder, Kurbelgehäuse)	nein	nein	nein	optimal	möglich	nein	
Rundmaterial aus legiertem Stahl (Radachsen)	nein	nein	nein	nein	nein	nein	
Gußteile aus Magnesiumlegierung (Rennfelgen, Motorgehäusedeckel)	nein	nein	nein	einzigste Möglichkeit	nein	nein	
maschinengedrehte Stahlteile (Schrauben, Muttern, Bolzen)	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	optimal	
gehärtete Stahlteile (Schaltwalze)	nein	nein	nein	nein	nein	nein	
rostfreier Stahl (Schalldämpfer, Batteriehalter)	nein	nein	möglich	optimal	möglich	nein	
Titan (Bolzen, Auspuffanlagen, spezielle Teile)	nein	nein	nein	optimal	nein	nein	
gehärteter Stahl (Zahnräder)	nein	nein	nein	nein	kein Elektron	nein	Elektronenstrahl
rostfreier Stahl (Schalldämpfer, Batteriehalter)	nein	nein	möglich	optimal	möglich	nein	Elektronenstrahl, Laser, Plasma
Titan (Bolzen, spezielle Teile)	nein	nein	nein	optimal	nein	nein	

welche nicht. In jedem Fall, in dem es irgendeinen Zweifel gibt, sollte das Teil nicht repariert sondern ersetzt werden.

Weiterhin ist es von Vorteil, in der Lage zu sein, vom Begutachten eines Teils auf Herstellungsverfahren und Schweißbarkeit schließen zu können. Ist das Teil geschmiedet, tiefgezogen, im Druck- oder Sandguß hergestellt, aus Stahllegierung, aus rostfreiem Stahl usw.? Erfahrung ist hier das einzige Hilfsmittel. Es ist offensichtlich, daß eine Zylinderlaufbüchse zum Beispiel aus Grauguß besteht. Es ist aber nicht so leicht herauszufinden, ob ein Aluminiumteil aus Druckguß ist oder durch Schmieden hergestellt wurde. Im allgemeinen wird ein Teil, das großer Belastung ausgesetzt ist, eher geschmiedet als gegossen.

Ein Aluminiumrahmen ist ein Beispiel für aufwendige Produktionstechniken bei dem die äußere Form der Rahmenstruktur aufwendige innere Versteifungsrippen verbergen kann. Es ist möglich, die relativ geringe Festigkeit eines Stranggußprofils aus Aluminium durch mechanische Verformung während der Produktion zu verbessern. Eine örtliche Oberflächenverformung, die gepreßt oder gerollt ist, kann eine deutliche Festigkeitsverbesserung an einem hochbelasteten Punkt ergeben.

Wo immer jedoch an einem Bauteil eine Schweißung ausgeführt wird, darf sie die Funktion nicht einschränken. Falls sie eine Halterung dimensionieren wollen, sollten Sie genau überprüfen, daß Sie die Struktur nicht schwächen. Die Verwendung von Halteplatten, die die Last über eine größere Fläche verteilen, ist von Nutzen, die Vorteile müssen jedoch gegen die Wirkung einer Schwächung des Bauteils aufgewogen werden, die Schweißarbeiten irgendwo am Rahmen hervorrufen können.

#### **Zusammenfassung:**

1. Alle Schweißverfahren ändern die Kornstrukturen des geschweißten Teils
2. Die wichtigste Entscheidung ist, inwieweit die schwächende Wirkung eines Schweißprozesses akzeptiert werden kann.
3. Die Fähigkeit zu entscheiden, welcher Herstellungsprozeß bei einem Teil angewendet wurde und die Identifizierung des Werkstoffs sind die wichtigsten Faktoren, um das korrekte Schweißverfahren auszusuchen.

#### **Weitere Literatur**

1. Bainbridge C.G und Clarke F. Oxy-acetylene Welding Repair Manual. BOC Ltd.
2. BOC Ltd. Argon Arc Welding
3. Engineering Industry Training Board. Booklets 3/13,3/14,3/15
4. Handforth J.R. Practical Aspects of the Argon Arc Welding of Aluminium Alloys, Aluminium Development Association
5. Lincoln Electric Co. Metals and How to Weld Them, Machinery Publishing Co.
6. Rossi B.E. Welding Engineering, McGraw-Hill
7. Smith A.A. Carbon Dioxide Shielded Consumable Electrode Arc Welding, Welding Institute
8. Welding Institute, Brazing, Soldering and Braze Welding
9. Wiggin Nickel Alloys Co., Welding, Soldering and Brazing, Publication 3367
10. Woods P.F., Production Welding, McGraw-Hill

## **Testen und Entwickeln**

Testen, egal ob zur Einschätzung einer neuen Konstruktion oder zur Optimierung von Radaufhängungen, ist nicht einfach. Es wird dadurch erschwert, daß sich viele Einflußgrößen überschneiden: Ändern Sie ein Bauteil und drei oder vier weitere Faktoren ändern sich. Es wird auch nicht durch die Tatsache erleichtert, daß die Dinge selten so sind wie sie erscheinen. Ich habe gehört, wie zwei erfahrene Fahrer kurz nacheinander die gleiche Maschine beschrieben. Einer sagte, die Radaufhängung sei zu hart, während der andere dachte, sie sei zu weich.

Es gibt auch psychologische Faktoren. Wir haben alle bestimmte Vorstellungen, rational oder nicht. Manchmal ist es wichtig, daß der Fahrer nicht weiß, was geändert wurde. Er zieht auch aus der Routine, die er im fortlaufenden Testprogramm erzielt Nutzen und unterliegt andererseits der Ermüdung. Es ist notwendig, die Wiederholbarkeit jedes Tests zu überprüfen, indem man auf die ersten Abstimmungen später am Tag zurückgreift. Einige Fahrer sind in der Lage, mit einer Vielzahl von Motorrädern gleich schnell zu fahren. Sie können entweder keine Unterschiede herausarbeiten oder achten nicht darauf. Es spricht viel dafür, einen solchen Fahrer als Rennfahrer anzustellen, aber nicht um das Motorrad zu entwickeln.

Die einzige Schlußfolgerung besteht darin, Einstellungen auf einem gewissen Niveau zu akzeptieren oder Ergebnisse oder Meinungen von mindestens zwei Kriterien zu bestätigen. Im allgemeinen fallen Tests unter drei Kategorien:

1. Leistungstests
2. Vergleichstests
3. Tests zur Optimierung der Abstimmung

Oft ist es notwendig, das Motorrad zu optimieren, bevor man in der Lage ist, aussagekräftige Vergleichstests durchzuführen. Wenn sich zum Beispiel Reifen auf die Radaufhängung auswirken, muß diese mit einer neuen Einstellung versehen werden, wenn ein neuer Reifentyp montiert wird. Das kann den Testablauf mit dem Risiko in die Länge ziehen, daß die Umgebungsbedingungen sich ändern, Testfahrer ermüden oder Motoren verschleifen. Die Betriebsdauer eines Kolbens in einem hoch getunten Motor kann weniger als zehn Stunden betragen.

### **1. Leistungstest**

Das ist die einfachste Art des Testens. Es ist selten notwendig, die absolute Leistung zu kennen. Die Leistungsfähigkeit im Vergleich zu einem vergleichbaren Standard ist

in den meisten Fällen ausreichend. Sie kann mit einer einfachen Ausrüstung gemessen werden.

(a) Geschwindigkeitsmessung

Der Tachometer, der am Motorrad montiert ist, ist ein ausreichend guter Vergleichsmaßstab. Die Abweichung zur tatsächlichen Geschwindigkeit variiert bei unterschiedlichen Instrumenten von einigen wenigen Prozenten darunter (selten) bis zu zehn Prozent darüber (in der Regel). Bei jedem Instrument ist der Fehler in der Mitte des Skalenbereichs wahrscheinlich am geringsten. Er wächst an, wenn sich die Nadel dem Vollausschlag nähert. Deshalb müssen alle Tests mit dem gleichen Instrument im gleichen Geschwindigkeitsbereich durchgeführt werden. Die meisten Instrumente sind stark gedämpft, um ein Zittern des Zeigers zu verhindern. Das bedeutet, daß sie der Geschwindigkeit des Motorrads oder der Motordrehzahl bei starker Beschleunigung nacheilen (dadurch wird wiederum der Instrumentenfehler aufgehoben, so daß die Messung während der Beschleunigung genauer ist). Für wiederholte Ablesungen ist es wichtig, das Instrument für mehrere Sekunden auf einem niedrigeren Niveau einpendeln zu lassen, um eine gleichmäßige Ablesung zu erhalten. Eine Änderung der Reifengrößen ändert die Tachometerabweichung.

Eine Stoppuhr und eine abgemessene Entfernung können benutzt werden, solange der Meßtechniker und der Fahrer mögliche Parallaxenfehler vermeiden können und die Entfernungen für den Beobachter groß genug sind, um passende Werte zu

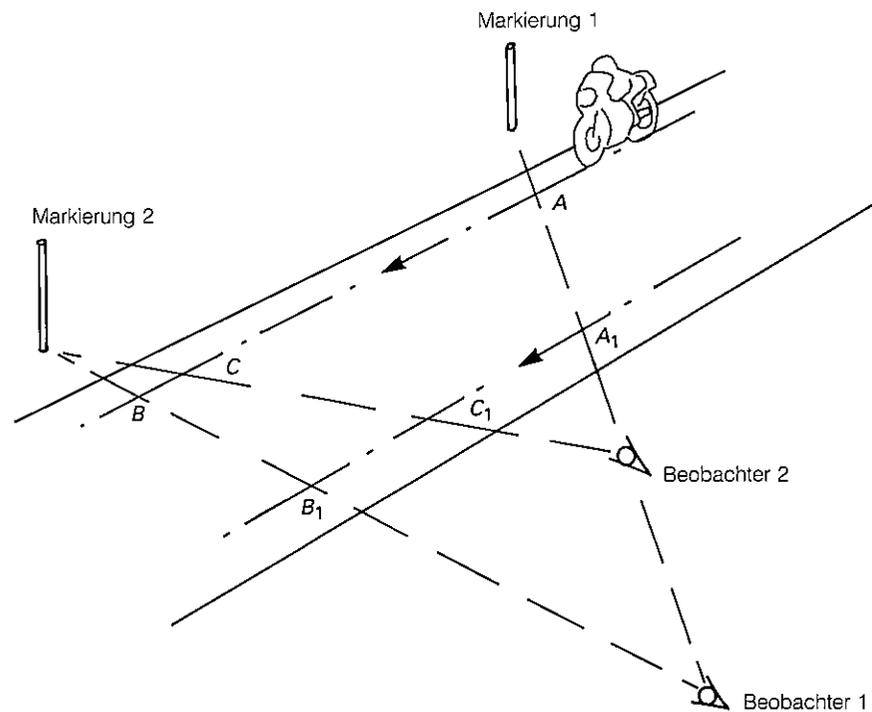


Abbildung 11.1 Zeitnahme eines Motorrads zwischen zwei Markierungen. Die Entfernung (AB) kann voneinander abweichen, wenn der Fahrer eine unterschiedliche Linie ( $A_1B_1$ ) wählt oder sich der Beobachter in eine andere Ausgangsposition (AC) begibt.

erhalten. Eine typische Reaktionszeit für ein vorhersehbares Ereignis, wie beispielsweise einem Fahrer, der eine Marke passiert, liegt zwischen 0 und 0,1 Sekunden. Falls der Beobachter konstant mißt, ist sie an der Start- und Stoppmarke gleich, weswegen kein Einfluß besteht. Einige Leute können das gleiche Resultat aus sechs Messungen nicht mehr als zweimal erzielen und sollten deswegen von jeder Stoppuhr ferngehalten werden. Falls Abweichungen von mehr als fünf Prozent auftreten, können Sie sich noch glücklich schätzen. Deswegen muß das gezeitete Ereignis entsprechend lang sein (fünf Prozent von zwei Sekunden sind nur 0,1 Sekunde, ein Fehler, der in der Größenordnung des Zeitnehmers liegt).

Eine Stoppuhr kann zur Eichung des Tachometers herangezogen werden, falls eine exakt abgemessene Entfernung zur Verfügung steht. Die Polizei benützt abgemessene Entfernungen mit Markierungen auf Brücken und Straßen mit reflektierenden roten und blauen Farbpunkten. Alle gängigen Versicherungspolicen beinhalten eine Klausel, die Rennfahren und Hochgeschwindigkeitstesten ausschließt. Das Eichen eines Tachometers bei 50 Kilometer pro Stunde kann aber keinesfalls als Hochgeschwindigkeitstest bezeichnet werden.

Eine andere gebräuchliche Methode sind zwei Fotozellen, die die Zeitnahme ein- oder ausschalten. Sichtbare oder Infrarotlichtquellen und -Empfänger sind im Handel erhältlich. Elektronische Zeitnahmen sind sowohl gebräuchlich als auch genau. Alles was Sie benötigen ist ein Techniker, der sie miteinander koppelt, ein entsprechend langes Kabel und ein Meßgerät zur Überwachung. Die einzige Schwierigkeit besteht darin, die Lichtquellen parallel aufzustellen und den Abstand exakt zu messen (abgesehen von anderen Lichtsignalen und Einflüssen auf die Elektrik, die sonst sehr zuverlässig arbeitet). Der Zeitintervall sollte im Verhältnis zur Auflösung der Zeitnahme groß sein. Wir verwenden einen Abstand von vierzig Metern, der eine Berechnung von  $90/t$  ergibt, um eine Zeit von  $t$  Sekunden in eine Geschwindigkeit von Kilometer pro Stunde umzurechnen. Eine Geschwindigkeit von 290 km/h ergibt eine Zeit von nur 0,5 Sekunden. Um zwischen 290 und 291 km/h zu unterscheiden, benötigt die Zeitnahme

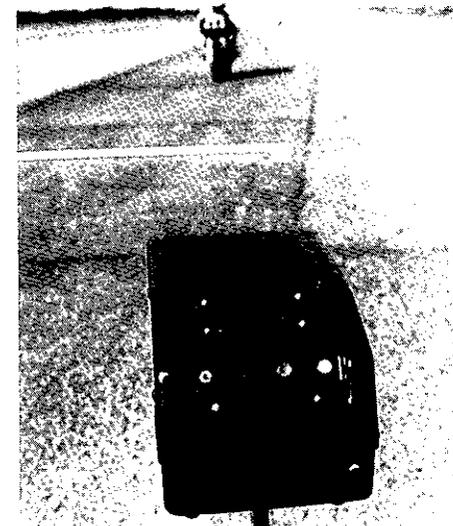


Abbildung 11.2 Brian Reeson von DataScan, Rushden, baute diese Radargeschwindigkeitsmeßeinrichtung.

eine Auflösung von 0,00173 Sekunden. Eine Auflösung von einer hundertstel Sekunde ergäbe einen Sprung von 282 auf 290 km/h. Sie wäre nicht in der Lage, Geschwindigkeiten dazwischen zu unterscheiden. Für die gleiche Zeitnahme kann die Auflösung verbessert werden, indem man den Abstand vergrößert. Es ist dann aber schwieriger, genau zu messen.

Radar ist eine weitere Möglichkeit zur Geschwindigkeitsmessung, entweder in kommerzieller Form oder als Eigenbau. Es ist sowohl sehr teuer als auch begrenzt in der Anwendung, falls man nicht nahe genug an die Straße kommt oder es eine Menge von anderen Fahrzeugen gibt.

Theoretisch war es stets möglich, verschiedene Sensoren an der Maschine anzubringen, und ihre Signale aufzunehmen. Die Schwierigkeit bestand darin, sie und die Aufnahmeeinheit den Bedingungen anzupassen. Nun, wo solide Schaltkreise und Mikroprozessoren zur Verfügung stehen, ist es viel einfacher, Daten in einem ROM oder einem EPROM zu speichern, der später gelesen und von einem Rechner analysiert werden kann. Tatsächlich stellt Stack Ltd. ein Data Logging-System dieser Art her. Cranfield Impact Centres werden schon bei Rennwagen und einigen Rennmotorrädern verwendet. Entsprechende Sensoren zeichnen die Motordrehzahl, den Kraftstoffdurchfluß, die Temperatur, den Druck, den Federweg, die Drosselklappenstellung usw. mit einer Acht- oder Sechzehn-Kanal-Prozessor-Einheit auf. Sie speichert die Daten der Sensoren einige wenige oder viele Male pro Sekunde. Die Daten werden als Binärcode gespeichert oder über Radiotelemetrie auf einen Empfänger übertragen und am Schluß von einem Personal-Computer aufbereitet und analysiert.

Die gemessenen Geschwindigkeiten sind von verschiedenen Variablen wie in erster Linie dem Wind, aber auch leichten Biegungen der Straße und Absätzen auf der Fahrbahn abhängig. Die Windgeschwindigkeit und Richtung sollte bekannt sein. Verschiedene Testläufe sollten durchgeführt, der Betrag der Abweichungen festgehalten, derselbe Streckenabschnitt benützt und eine Reihe von Vergleichsmessungen (siehe unten) durchgeführt werden, um sicherzustellen, daß die Bedingungen zwischen einer und der nächsten Testreihe sich nicht geändert haben.

Die Höchstgeschwindigkeit ist ein grundlegender Standard, obwohl sie verschieden ausgelegt wird. Die Übersetzung muß optimiert werden, während andere Einflußgrößen wie die Fahrerkleidung, die Sitzposition, die Windgeschwindigkeit usw. konstant gehalten werden müssen.

Ein Problem ist es, einen Streckenabschnitt zu finden, der lang genug ist. Keine Rennstrecke in Großbritannien hat eine Gerade, die die wahren Spitzengeschwindigkeiten zuläßt, außer bei Motorrädern, die sehr klein oder sehr langsam sind. Die meisten Motorräder benötigen Entfernungen von 800 Metern bis zu 2,5 Kilometern, einschließlich einer Bremszone. Die Märchen über Geschwindigkeiten, die sich allmählich über mehrere Kilometer aufbauen, sind nicht wahr. Es ist gewöhnlich praxisnah, die Höchstgeschwindigkeit als die Geschwindigkeit zu definieren, die nach der Beschleunigung über eine bekannte Distanz, vorzugsweise im gleichen Gang mit Annäherung an eine bekannte Geschwindigkeit erreicht wird. Das eliminiert jeglichen Fehler, den der Fahrer verursachen kann. Es bedeutet aber auch, daß die Übersetzung ein kritischer Punkt ist und konstant gehalten werden muß oder nur dann geändert werden darf, wenn sie ein Teil des Tests ist (zum Beispiel beim Reifenwechsel).

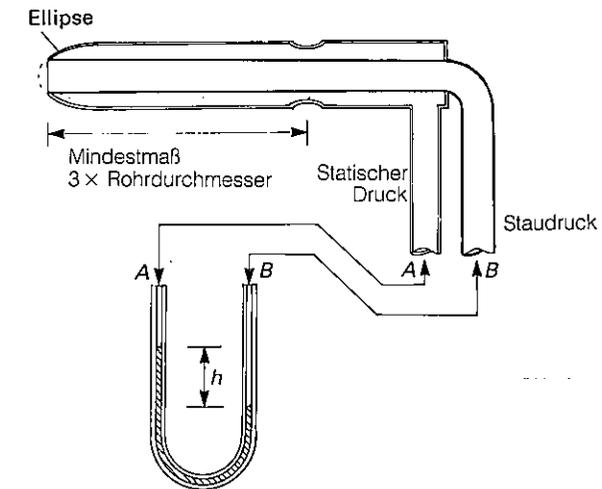


Abbildung 11.3 Wesentliche Abmessungen für ein Stauraohr.

(b) Luftgeschwindigkeit

Luftgeschwindigkeitsmesser, die in der Hand gehalten werden, sind in Bootsläden und Yachtzubehör-Läden erhältlich. Obwohl die Windbedingungen sehr unterschiedlich sind, arbeiten sie genau genug. Messungen am Motorrad können mit einem einfachen statischen Stauraohr durchgeführt werden.

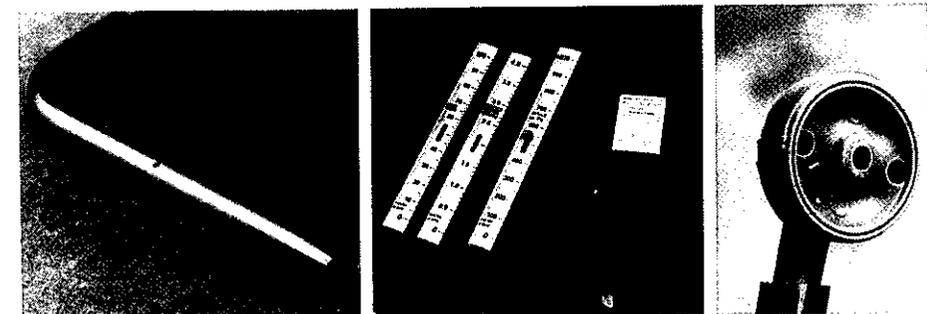


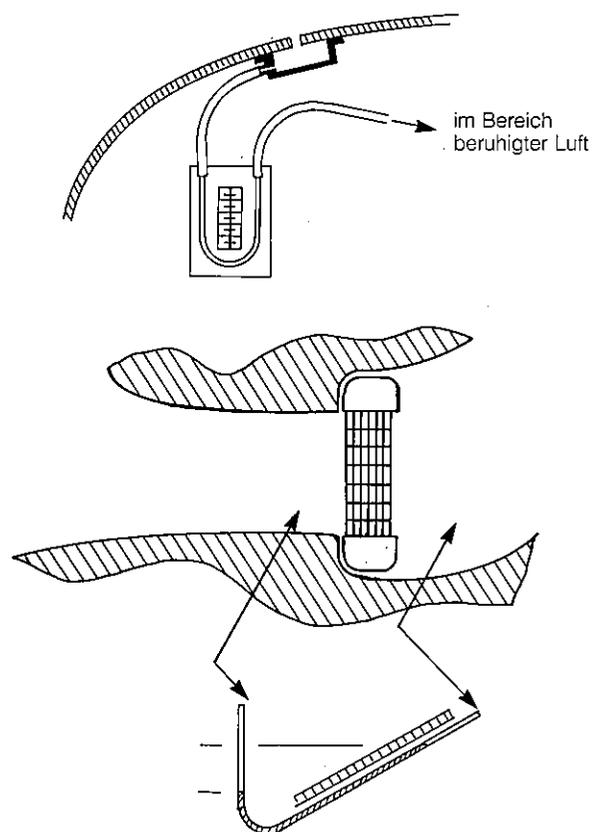
Abbildung 11.4 (a), (b) und (c) Statische Stauraohre, hergestellt von Airflow Developments, High Wycombe, zusammen mit verschiedenen Manometern und Kunststoffteilen.

Die Konstruktionsdetails sind in der Zeichnung gezeigt. Um die Luftgeschwindigkeit, relativ zum Motorrad, zu messen, muß das Stauraohr ein Stück vom Motorrad entfernt in ungestörter Luft und unter einem Gierwinkel von weniger als zehn Grad betrieben werden.

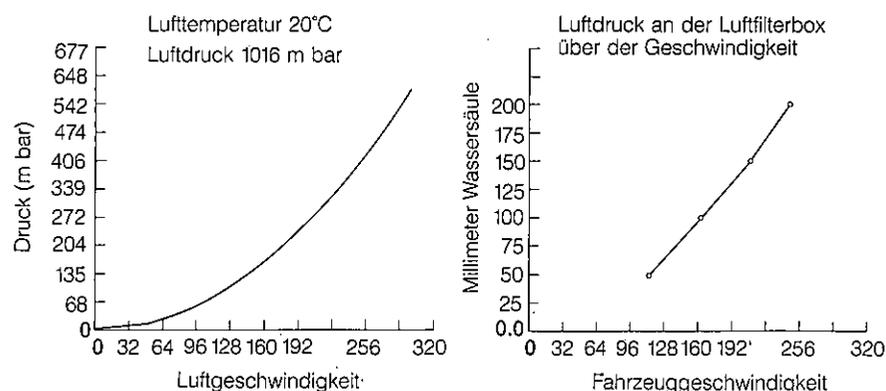
Die Luftgeschwindigkeit errechnet sich aus:

$$v = K \sqrt{2(p_1 - p_2)/d}$$

wobei v die Luftgeschwindigkeit, p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub> der Druck an der Spitze und im rechten Winkel



**Abbildung 11.5** Manometer können rund ums Motorrad verwendet werden, um Bereiche hohen und niederen Drucks zu testen (um den Lufteinlaß für einen Kühler festzulegen, usw.) und Spitzendrücke auf den Kühler zu überprüfen, um die optimale Größe zu erhalten.



**Abbildung 11.6 (a)** Der Zusammenhang zwischen dem Druck und der Geschwindigkeit und **(b)** dem Druck, der unter dem Tank der Yamaha OW 01 gemessen wurde. Er ist nicht groß genug, um sich auf die Leistung auszuwirken, könnte aber eine ernsthafte Auswirkung auf die Vergaser haben und die Lage der Schwimmerkammerentlüftung an den Vergasern beeinflussen.

zur Luftströmung,  $d$  die Luftdichte und  $K$  eine Konstante ist. Falls Wasser benützt wird, beträgt die Druckdifferenz:

$$p_1 - p_2 = h \text{ kg/cm}^2,$$

wobei  $h$  die Höhe in Millimetern ist. Der Ausdruck wird zu:

$$v = \sqrt{(ht/p)}$$

woraus  $v$  die Luftgeschwindigkeit in m/s,  $h$  der Maximaldruck in Millimeter Wassersäule,  $t$  die Temperatur in Grad Celsius und  $p$  der barometrische Druck in Millimeter Quecksilbersäule ist.

Ein einfacher Manometer, der den Spitzendruck  $h$  registriert, kann in Zonen hohen und geringen Drucks rund um das Motorrad, zum Beispiel am Lufteinlaß zu den Vergasern, benützt werden oder um die Kühlergröße zu berechnen. Wo die Richtung der Luftströmung wichtiger als ihr Betrag ist, zeigen aufgeklebte Wollfäden in diesem Bereich, was passiert. Es kann notwendig sein, von einem Ausßenstehenden das Motorrad fotografieren zu lassen.



**Abbildung 11.7** Versuche mit Wollfäden werden in Windkanälen und bei Straßentests benützt, um die Luftströmung in verschiedenen Bereichen festzustellen (BMW).

**(c) Beschleunigung**

Sie ist wegen der Geschwindigkeitsaufzeichnung schwierig zu messen. Sogar wenn dies möglich ist, erfordert eine Beschleunigung mit stehendem Start ein hohes Maß von Geschick vom Fahrer und konstante Haftung zwischen Straße und Reifen, die nicht sichergestellt werden kann. Die beste Art, diese Variablen zu eliminieren, ist es, die Beschleunigung in einem hohen Gang mit voll geöffnetem Gasgriff zu messen, und den Zeitabstand zwischen zwei Motordrehzahlen (wenn man zum Beispiel bei

5000 Umdrehungen pro Minute zu beschleunigen beginnt und die Zeitspanne zwischen 6000 und 8000 Umdrehungen pro Minute mißt) zu nehmen oder die Geschwindigkeit zu messen, die man an einem bestimmten Punkt erreicht (das ist für einen Fahrer auf der Straße oft die einfachste Methode). Beschleunigungstests unterliegen denselben Problemen der Umgebung wie Hochgeschwindigkeitstests.

(d) Auslaufversuche

Das Motorrad wird auf eine hohe Geschwindigkeit gebracht, und anschließend der Antriebsstrang entkuppelt. Die Zeit wird zwischen zwei (oder mehreren) Geschwindigkeiten während dem Ausrollen genommen. Die Ergebnisse dieser Tests können herangezogen werden, um Zusammenhänge über die Widerstandskräfte herzustellen, die auf das Motorrad wirken, und herauszufinden, ob deutliche Veränderungen zwischen Testreihen mit unterschiedlichen Einstellungen auftreten. Falls sich die Zeiten bei Auslaufversuchen ändern, zeigt das, daß sich entweder die Bedingungen des Motorrads oder aber die umgebenden Bedingungen geändert haben und deshalb die Testergebnisse nicht verglichen werden können.

Wenn die Maschine ausrollt, wird sie durch aerodynamische Widerstände, Rollwiderstände, Widerstände im Antrieb, die der Massenträgheit entgegengerichtet sind, und der Massenträgheit der rotierenden Teile (die oft als zusätzliche Masse zum Motorrad zugerechnet werden, um die Rechnung zu vereinfachen) abgebremst. Die Gesamtwiderstandskraft wird in der Regel ausgedrückt durch:

$$\text{Gesamtwiderstand} = A + Bv + Cv^2 + \dots$$

woraus  $v$  die Geschwindigkeit und  $A, B, C$  Konstante sind. Falls die Verzögerung und die Masse des Motorrads bekannt sind, errechnet sich die Gesamtwiderstandskraft aus:

$$\text{Gesamtwiderstandskraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung.}$$

Für die rotierenden Massen können Annahmen in der Form erstellt werden, daß sie einzeln hinzugefügt werden oder die Gesamtmasse des Motorrads erhöht wird. Um dies zu vermeiden kann der Test mit verschiedenen Geschwindigkeiten wiederholt und eine Gleichung in die andere eingesetzt werden. Da die Verzögerung linear sein muß, wird im allgemeinen ein kleiner Geschwindigkeitsbereich überprüft, falls die Geschwindigkeit nicht ständig aufgezeichnet werden kann. Aus rein praktischer Sicht ist es wichtig, andere Fehlerquellen wie zum Beispiel unterschiedliche Reifendrucke zu eliminieren. Das Schleifen von Bremsbelägen ist zu vermeiden, indem die Pads von der Scheibe weggedrückt werden. Weiterhin sollte immer der gleiche Streckenabschnitt benützt und hügelige wellige Abschnitte vermieden werden, der Fahrer sich immer in derselben Haltung und Kleidung befinden und stets die gleiche Kettenspannung und gleiche Masse (Kraftstoffgewicht!) aufrecht erhalten werden.

Falls der Test ausschließlich zu Vergleichszwecken benützt wird (entweder um herauszufinden, ob sich die umgebenden Bedingungen oder der Gesamtwiderstand des Motorrads geändert haben), reichen die Zeiten aus, um herauszufinden, ob sich eine Änderung ergeben hat und wenn ja, in welcher Richtung.

Es ist möglich, den Luftwiderstand zu isolieren und eine charakteristische Widerstandskurve zu erstellen, die zum Beispiel in Programmen wie dem RL (siehe Anhang)

angewendet werden kann. Unter der Annahme, daß die Widerstandsgleichung quadratisch ist, gibt es drei Unbekannte:  $A$ ,  $B$  und  $C$ . Falls der Gesamtwiderstand  $D$  ist, dann beträgt:

$$D = A + Bv + Cv^2$$

und

$$D = m a$$

wobei  $m$  die Masse,  $a$  die Beschleunigung zwischen zwei Geschwindigkeiten und  $v$  die Durchschnittsgeschwindigkeit ist. Falls genügend Tests durchgeführt wurden, um Gleichungen für drei Werte von  $a$  und  $v$  zu erhalten, können sie nach  $A$ ,  $B$  und  $C$  gelöst werden. Das reicht aus, um die Kurve des Gesamtwiderstands zu zeichnen. Sie enthält den Luftwiderstand, Rollwiderstand, Widerstand im Antriebsstrang und das Massenträgheitsmoment der rotierenden Teile. Da all diese Kräfte von der Motorleistung überwunden werden müssen, um das Motorrad zu beschleunigen, ist es in der Regel nicht notwendig, sie für praktische Zwecke zu isolieren.

Für aerodynamische Tests ist es möglich, Ergebnisse aus Auslaufversuchen über zwei Geschwindigkeitsbereiche  $v_a$  bis  $v_b$  und  $v_c$  bis  $v_d$  zu erhalten. Falls der erste die Zeit  $t_1$  und der zweite die Zeit  $t_2$  beansprucht, ergibt sich:

Durchschnittsgeschwindigkeit des ersten Tests

$$v_1 = (v_a + v_b)/2$$

im zweiten Test

$$v_2 = (v_c + v_d)/2$$

Die Durchschnittsbeschleunigung  $a_1$  und  $a_2$  ergibt sich aus:

$$a_1 = (v_a - v_b)/t_1$$

$$a_2 = (v_c - v_d)/t_2$$

Der Widerstandskoeffizient  $C_d$  ergibt sich aus:

$$C_d = \frac{K (a_1 - a_2)}{A (v_1^2 - v_2^2)}$$

wobei  $K$  eine Konstante ist, die proportional zur Masse des Fahrzeugs, dem Massenträgheitsmoment der rotierenden Teile und der Luftdichte ist, und  $A$  die gesamte Frontfläche des Motorrads (einschließlich Fahrer) wiedergibt.

Falls der Test mit der gleichen Geschwindigkeit wiederholt wird (zum Beispiel wenn verschiedene Verkleidungen verwendet werden), ist es wichtig, solange sich die Masse, die Luftdichte, usw. nicht verändert, den Wert von  $K$  zu kennen. Falls sich die Masse ändert, ist es notwendig, Gewichte zum Massenausgleich hinzuzufügen. Es ist auch hilfreich, den Test so zu fahren, daß zwei Vergleiche sehr schnell erfolgen können bevor sich zum Beispiel die Luftdichte usw. ändern. Falls die Frontfläche  $A$  verändert wird, sollte das berücksichtigt werden. Es ist nicht wichtig, den absoluten Wert zu

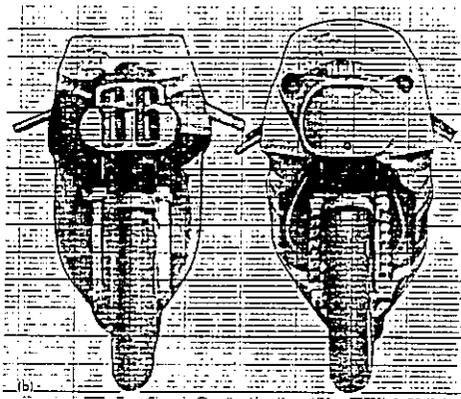
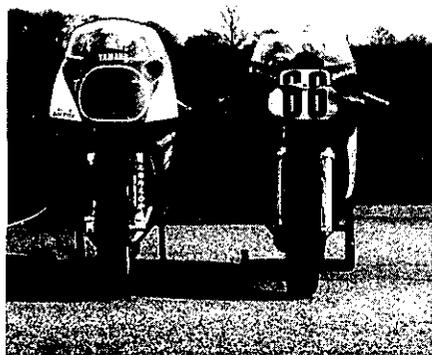


Abbildung 11.8 Ein Weg, um die Frontflächen zu vergleichen, besteht darin, die Maschine (und den Fahrer) unter Verwendung einer Linse mit einer langen Brennweite zu fotografieren und anschließend transparentes Millimeterpapier über die Fotos zu legen. Dabei werden die Quadrate oder ein Referenzmaßstab auf dem Foto als Vergleich herangezogen.

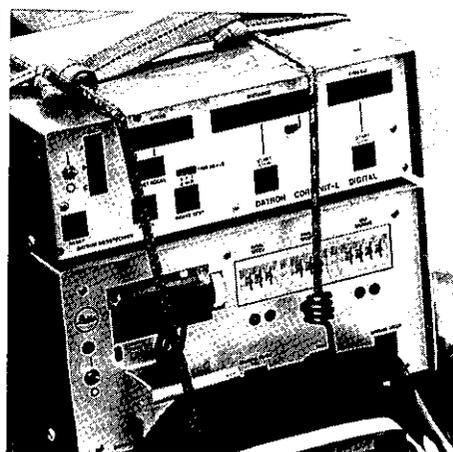


Abbildung 11.9 (a) und (b) Diese Leitz-Ausrüstung mißt die Geschwindigkeit mit einer vertikal angebrachten Lichtquelle, die auf die Straßenoberfläche gerichtet ist. Geschwindigkeit und Zeit (und somit auch Entfernung und Beschleunigung) werden ständig aufgenommen. Sie können am Ende jedes Tests ausgedruckt oder auf einer Diskette gespeichert werden. Diese Ausrüstung ist für Brems- und Beschleunigungstests nützlich, ihre Ausmaße können aber die Fahrleistung und Kurvengeschwindigkeiten beeinflussen.

wissen, sondern nur die Veränderung. Die zuverlässigste Methode ist es, das Motorrad vorzugsweise mit einer langen Brennweite jedes Mal aus der gleichen Entfernung zu fotografieren und Fotos mit exakt der gleichen Vergrößerung zu machen. Legen Sie transparentes Millimeterpapier über die Fotos und zählen Sie die Quadrate aus, die das Motorrad einschließt. Falls auf den Bildern Maßstäbe zu sehen sind (indem man zum Beispiel einen Meterstab neben das Vorderrad stellt), kann die Fläche in Quadratmetern oder Quadratzentimetern erhalten werden.

Falls die Bilder keinen Maßstab haben, die Fläche des ersten aber  $x$  und die zweite  $y$  Quadraten der Skaleneinteilung entspricht, beträgt das Flächenverhältnis  $y/x$ . Daraus kann die Fläche des ersten Tests  $A$  und die Fläche des zweiten  $Ay/x$  bezeichnet werden. Die Tests ergeben dann, in Abhängigkeit von  $K$  und  $A$ , zwei Widerstandskoeffizienten ( $C_{d1}$  und  $C_{d2}$ ). Falls der eine durch den anderen geteilt wird, um  $C_{d2}/C_{d1}$  zu erhalten, heben sich die Größen  $K$  und  $A$  auf. Zurück bleibt ein Wert, zum Beispiel 0,95, der bedeutet, daß der Widerstandskoeffizient des zweiten Tests das 0,95-fache des ersten beträgt, die zweite Konfiguration also fünf Prozent windschnittiger ist.

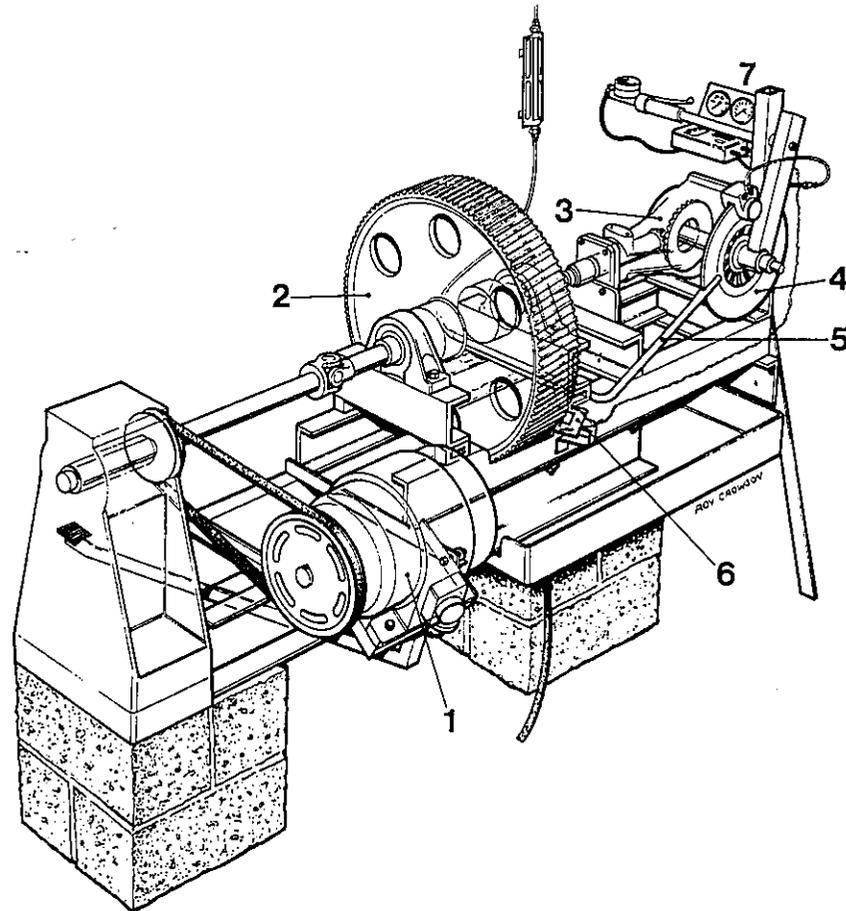
Es besteht wahrscheinlich immer wieder die Notwendigkeit, einen solchen Test durchzuführen. Auslaufversuche werden aber durch die schwierige meßtechnische Erfassung und die ständige Veränderung der umgebenden Rahmenbedingungen eingeschränkt. Sie werden am besten angewendet um zu bestimmen, ob sich die Bedingungen geändert haben. Der einfachste Weg herauszufinden, ob sich in der Aerodynamik etwas geändert hat, ist es, einen Höchstgeschwindigkeitsmessung durchzuführen.

#### (e) Bremsentest

Das größte Problem beim Bremsentest ist, daß er eine Menge Geschick vom Fahrer erfordert, sowohl was die Dosierung der Bremsen als auch die Abschätzung der Geschwindigkeit betrifft. Obwohl die Geschwindigkeit permanent aufgenommen werden kann, ist es schwierig, den Zeitpunkt zu messen, bevor die Bremsen benützt werden. Die kinetische Energie des Motorrads ist proportional zum Quadrat seiner Geschwindigkeit, weswegen bereits geringe Änderungen in der angenäherten Geschwindigkeit sich in großen Differenzen des Bremswegs oder der Zeit niederschlagen. Der Punkt, an dem die Bremse betätigt wurde, ist ebenso schwer zu messen, und zwar um so schwerer, je höher die Geschwindigkeit ist. Die Verwendung des Bremslichtschalters zum Starten der Zeitnahme oder das Abschießen einer Markierung auf die Fahrbahn ist die wahrscheinlich zuverlässigste Methode. Eine Alternative besteht darin, bei höherer Geschwindigkeit mit dem Bremsen anzufangen, und dann den Zeitabstand zwischen zwei Geschwindigkeiten oder über eine bekannte Entfernung zu nehmen. Bremsen bei einer bestimmten Markierung ist bei Geschwindigkeiten über 50 km/h nicht zuverlässig. Wenn große Entfernungen gemessen werden müssen, geht es schneller und genauer, einen festen Punkt in die Nähe der Anhaltezone zu legen und den Abstand von dort zu messen.

Um einen ernsthaften Bremsentest durchzuführen, ist es notwendig, Probleme wie das Geschick des Fahrers, Änderungen der Umgebung und bei der Geschwindigkeitsmessung auszuschließen. In den späten 70ern, als die Naßbremsleistung von Scheibenbremsen schlecht war, bauten wir in Zusammenarbeit mit LEDAR einen Prüfstand, um verschiedene Kombinationen von Scheiben und Belagwerkstoffen abzuschätzen. Er bestand aus zwei Schwungrädern eines Perkin-Diesel-Motors (auf denen ihr

Massenträgheitsmoment eingestempelt war). Bei 1500 Umdrehungen pro Minute entsprach ihr Massenträgheitsmoment ungefähr der Massenträgheitskraft eines 50 km/h schnellen Tourenmotorrads. Über ein Hinterachsgetriebe von Ford trieben sie eine Bremsscheibe an, die auf dem starren Durchtrieb anstatt der gewöhnlichen Halbwelle montiert war. Das Übersetzungsverhältnis war so gewählt, daß die Bremsscheibe mit einer Drehzahl rotierte, die einer Geschwindigkeit des Motorrads von 50 km/h entsprach. Ein hydraulischer Hauptbremszylinder und eine Bremszange einer Kawasaki Z 650 waren auf dem Prüfstand zusammen mit einem Bremsmanometer und dem



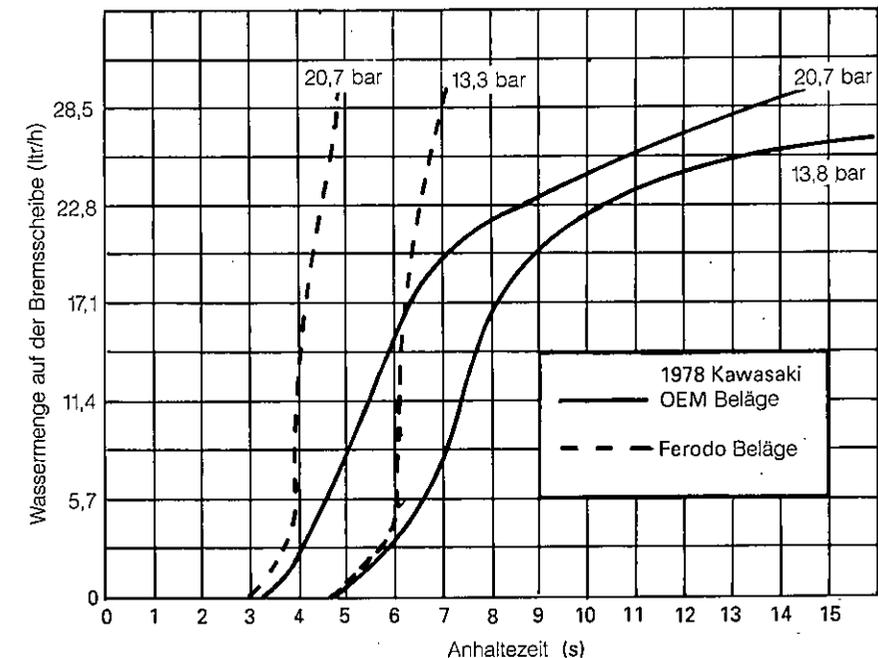
**Abbildung 11.10** Ein Prüfstand, der gebaut wurde, um verschiedene Scheiben/Belagkombinationen bei Bremsungen im Nassen und Trockenen zu untersuchen. (1) Elektromotor, der von einem Schwungrad (2) entkoppelt werden kann, wenn dieses eine gewisse Drehzahl erreicht hat (bei der das Massenträgheitsmoment dem eines großen Tourenmotorrads entspricht, das mit 50 km/h fährt). (3) Ein Getriebe bringt die Scheibe (4) auf eine Geschwindigkeit, die 50 km/h entspricht. (5) Eine Düse versorgt die Oberfläche der Bremsscheiben über ein Durchflußmeßgerät mit Wasser. (6) Eine Infrarotbeleuchtung, die von einem Zahnkranz auf dem Schwungrad unterbrochen wird, hält eine elektronische Zeitnahme an, wenn die Frequenz unter 25 Hertz fällt. (7) Eine Konsole enthält den hydraulischen Bremszylinder, die elektronische Zeitnahme, die durch den Stopplichtscharter in Gang gesetzt wird, einen Tachometer und einen Bremsdruckmanometer.

Bremslichtschalter montiert, der mit der elektronischen Zeitnahme verbunden war. Die Zähne des Schwungrads unterbrachen die Verbindung zwischen einer Lichtquelle und einem Sensor. Ein Schaltkreis ermittelte die Impulse. Wenn die Anzahl der Zähne pro Sekunde unter einen vorgegebenen Wert von 25 Hertz sank, schaltete die Zeitnahme ab.

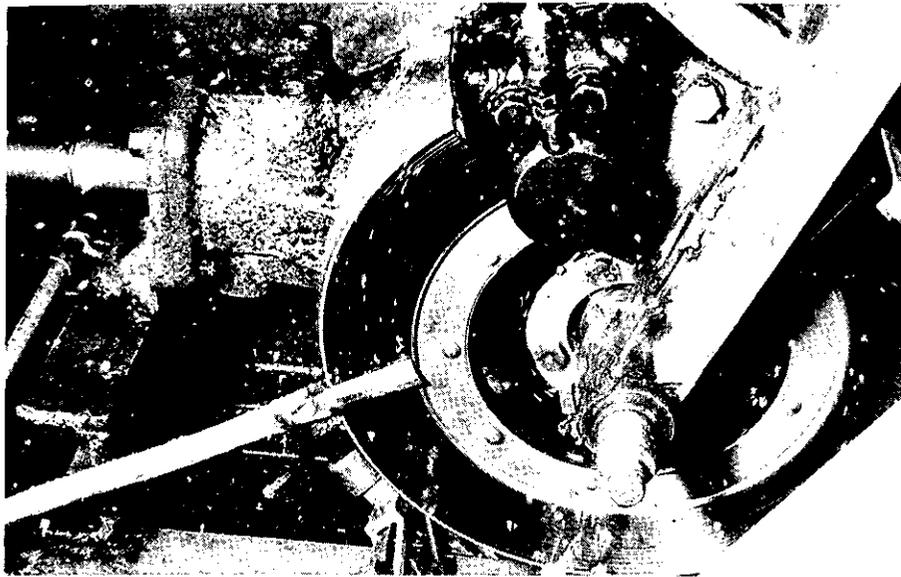
Eine Düse, die nahe an der Scheibe angebracht war, lieferte mithilfe eines Durchflußmengenmessers eine variable Wassermenge. Ein Elektromotor trieb die ganze Anordnung über einen Keilriemen an, der entkoppelt werden konnte. Tests im Trockenen mit verschiedenen Bremsdrücken bewiesen, daß die Anhaltezeiten sich in den gleichen Bereichen bewegten wie die eines Motorrads. Sogar Auslaufversuche (ohne Bremse) zeigten nahezu die gleichen Ergebnisse.

Die Tests besagten, daß in der Regel die Leistungsfähigkeit der Bremse sich in Abhängigkeit der Wassermenge ändert bis in bestimmten Fällen die Wassermenge ein kritisches Maß erreicht, bei dem die Leistungsfähigkeit zusammenbricht. Dieser Punkt ist sehr schwer vorauszusagen. In den Fällen, die hauptsächlich durch den Belagwerkstoff beeinflusst wurden, dauerte es über vierzehn Sekunden um anzuhalten, im Vergleich zu fünf Sekunden bei trockenen Bedingungen (bei demselben Bremsdruck) und zirka sechs Sekunden für einen Belagwerkstoff, der auch im Nassen funktionierte.

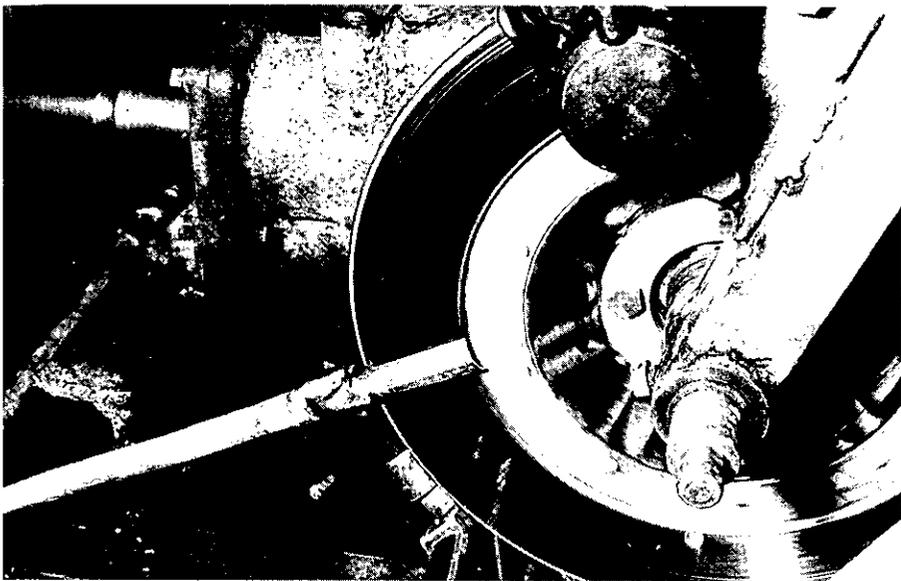
Schließlich sollte während aller Tests die Wassermenge genau festgelegt und der Verbrauch über der Zeit oder der Entfernung genau überprüft werden. Daraus ergibt sich ein grundsätzlicher Vergleich für zukünftige Tests, ebenso wie eine Vorwarnung für einen bevorstehenden Ausfall.



**Abbildung 11.11** Die Ergebnisse des Prüfstands zeigten, daß einige Belagwerkstoffe in der Lage waren, bei Nässe gute Ergebnisse zu liefern, andere dagegen nicht. Zum damaligen Zeitpunkt (1978) war dies ein ernsthaftes Problem bei Straßenmotorrädern.



**Abbildung 11.12** Die Regelung der Durchflußmenge des Wassers erwies sich als kritisch. Wenn sie, wie hier, zu groß war, riß die Strömung ab, das Wasser wurde von der Scheibe umhergespritzt.



**Abbildung 11.13** Die Düse sprüht Wasser mit einer Geschwindigkeit von mehr als 38 Litern pro Stunde auf die Scheibe, das Wasser bleibt aber an der Oberfläche hängen und wird mitgerissen.

## 2. Vergleichende Tests

Der oben erwähnte Bremsenprüfstand zeigte auf, wie schwierig es ist, stichhaltige Vergleiche durchzuführen. Ganz wesentlich ist es, Einflüsse der Fahrbahnoberfläche oder von Fahrfehlern auszuschließen, bevor die Bremsen genau genug analysiert werden können, um zu sehen, was sich auf ihre Leistungsfähigkeit auswirkt. Gängige Vergleiche berücksichtigen dabei den Belagwerkstoff, die Reifen, die Stoßdämpfer, die Verkleidung, usw. . In den meisten Fällen hat die Änderung eines Bauteils Einfluß auf mehrere Teile, so daß das gesamte Motorrad optimiert werden muß, um die beste Leistungsfähigkeit dieser Komponente zu erhalten. Selbst wenn das Bauteil keine großen Änderungen herbeiführt, ist es nicht nur zeitaufwendig, es bedeutet auch, daß der Vergleich nicht absolut gültig ist.

Bei einigen Reifentests in Donington zum Beispiel (wo der Übergang vom Schiebepetrieb zur Vollast und das nachfolgende Rucken größere Bedeutung haben als die Spitzenleistung) ergab ein Satz Reifen eine große Verbesserung in Rundenzeiten. Auch die erreichte Maximaldrehzahl lag unter der Brücke auf der Geraden höher als bei anderen Reifen. Eine Überprüfung der Reifen ergab einen deutlich kleineren Durchmesser, obwohl sie dieselbe Breite wie andere Testkandidaten hatten. War die Verbesserung schuld an der besseren Haftung oder einfach die kürzere Übersetzung?

Eine andere Reifenmarke harmonierte überhaupt nicht mit der Fahrwerksabstimmung. Sie verursachte ein Schlingern des Hecks, so daß mehrere Fahrer dachten, der hintere Stoßdämpfer würde nachlassen. Um also einen vollständig ausgewogenen Vergleich aller Reifen zu erhalten, wäre es notwendig, bei jeder Reifenpaarung die Fahrwerksabstimmung zu optimieren (und wahrscheinlich auch den Reifendruck) und die Übersetzung zu ändern, um den unterschiedlichen Größen Rechnung zu tragen.

Der Test muß auch so aufgebaut sein, daß er speziell die Fragen beantwortet, die Sie wissen wollen. Bei Reifentests gibt es unvermeidlicherweise immer einen subjektiven Einfluß. Deshalb ist es notwendig, vom Fahrer bestimmte Überprüfungen zu verlangen und ihre subjektive Meinung durch objektive Messungen wie Geschwindigkeit, Rundenzeit und durch Wiederholung des gleichen Tests später im Verlauf des Tages zu unterstützen. In diesem Fall hilft es in der Regel, wenn der Fahrer nicht weiß, welche Änderungen durchgeführt wurden, solange er bereit ist, den Kommentaren, die er anfangs gemacht hat, vollständig zu widersprechen.

Zweifelloos fühlt sich bei verschiedenen Reifen und Radaufhängungen das Motorrad auf eine bestimmte Art unterschiedlich an, die sehr schwer zu beschreiben ist, aber festgehalten werden muß. Trotz allem ist das ein wichtiger Punkt in der Beurteilung. Umgekehrt ermöglichen einige Änderungen mit dem Motorrad schneller zu fahren, speziell in schwierigen Passagen des Kurses. Dadurch wird der Fahrer mehr gefordert und er fühlt sich nicht so sicher. Geben Sie ihm einen Reifen mit weniger Haftung oder was auch immer, so daß er bei gleichem Einsatz in schwierigen Passagen langsamer ist, und er fühlt sich unter Umständen sicherer. Eine Messung der Geschwindigkeit oder der Rundenzeiten würde dem widersprechen. Falls es notwendig ist, den Test über mehrere Tage auszudehnen, ist es wichtig zu vorhergehenden Einstellungen zurückzugehen. Falls Ergebnisse von früher nicht wiederholt werden können, sollte irgendein Korrekturfaktor angewendet werden.

Wenn man akzeptiert, daß das Testen zum Teil subjektiv ist, sollte der Fahrer Notizen über spezielle Punkte ausführen: welches Vertrauen hat er in die neue Abstimmung im Vergleich zur letzten- wie einfach ist es, in Kurven einzulenken oder von links nach rechts umzulegen- liegen die Bremspunkte später oder früher- welche Gangwechsel mußten durchgeführt werden

Man sollte dabei berücksichtigen, daß es nicht einfach ist, sich an mehr als drei Dinge gleichzeitig zu erinnern. Falls ein spezieller Punkt festgehalten werden soll, ist es eventuell erforderlich, ein spezielles Testkriterium einzuführen. Die Geschwindigkeit bestimmt die Drehzahl, die zum Beispiel an einem bestimmten Punkt erreicht wird. Selbstverständlich könnte man mit einem Data Logger all diese Kriterien mehrere Male jede Sekunde aufnehmen.

Es ist möglich, andere Tests durchzuführen, um spezielle Aspekte herauszufinden. Als zum Beispiel während einem Stoßdämpfertest der Fahrer bemerkte, daß einige Dämpfer nach wenigen Runden nachließen, arrangierten wir bei einem der Importeure einige Tests auf einem Stoßdämpferprüfstand. Anstatt der gewöhnlichen Straßentests betrieben wir den Dämpfer, von dem wir glaubten, daß er der schlechteste sei, bis ein bedeutender Einbruch in der Dämpferkraft auftrat (was weniger als zwei Minuten dauerte). Daraufhin wurden alle anderen über drei Minuten lang getestet (nach denen die Stoßdämpfer zu heiß zum Anfassen waren) und die Änderung der Dämpferkräfte verglichen, wobei sich herausstellte, daß der Fahrer recht hatte.

Idealerweise sollten Vergleiche schnell und mit einem Minimum von Änderungen durchgeführt werden. Dabei ist es hilfreich, das Motorrad vorzubereiten, indem zum Beispiel die Verkleidung vollständig abgenommen wird, so daß Federbeine schneller getauscht werden können. Es kann auch hilfreich sein, eine kurze Reihe von Straßenvergleichen durchzuführen, ohne sich die Zeit zu nehmen, das Motorrad zu optimieren oder irgendeine Feinabstimmung durchzuführen. Der Fahrer erhält so einen schnellen Vergleich einer Einstellung gegenüber der vorhergehenden. In einer kurzen Ergebnisliste sollten die besten Komponenten beziehungsweise Abstimmungen festgehalten werden, die später genauer getestet werden können.

### 3. Optimierung von Abstimmungen

Die Schwierigkeit dabei ist die irreführende Rückmeldung, die eine Radaufhängung verursachen kann. Zu weiche Federn können extreme Bewegungen verursachen, wobei das Durchschlagen den Fahrer glauben läßt, daß die Federn zu hart sind, speziell dann, wenn die Dämpfung zur Kompensierung angehoben wurde. Der einzige sichere Weg, es herauszufinden, ist Änderungen in beiden Richtungen durchzuführen. Ein absichtlicher Versuch, auftretende Symptome zu verschlechtern, ist oft der schnellste Weg herauszufinden, wo die Ursache liegt. Es ist ebenso wichtig, all diese Abstimmungen festzuhalten. Wenn anschließend jeder verwirrt ist, ist es schließlich möglich, die ursprüngliche Abstimmung wiederherzustellen.

Einige der wesentlichen Arbeiten sind theoretischer Natur und können vorher abgehandelt werden (zum Beispiel durch Anwendung des Rechnerprogramms im Anhang). Als Beispiel für die angewandten Schritte wird die Entwicklung aufgezeich-

net, ein Honda CR 500 R Motocross-Motorrad in ein Motorrad für Bergrennen umzubauen.

Es wurde auf einem Leistungsprüfstand gefahren, um Leistungs- und Drehmomentkurven zu erhalten. Anschließend gewogen (siehe Kapitel zwei) und die Lage seines Schwerpunkts ermittelt. Bergrennen erfordern gute Beschleunigung aus niederen Geschwindigkeiten, gute Verzögerung, gutes Handling und Haftung in langsamen Kurven, in der Regel Haarnadelkurven, so wie Reifen, die ohne Warm-up funktionieren und das gelegentlich auch noch auf schlechten Fahrbahnbelägen. Die Bodenfreiheit der Honda von 330 und der Federweg von 300 Millimetern waren dabei ebensowenig notwendig wie die Motocross-Reifen.

Die Reifen sind der bestimmende Faktor. Die weichste, zur Verfügung stehende Mischung und eine Konstruktion, die auch Kalthaftung aufbaut, war eine Regenrennmischung. Das grobe Profil verursachte mit diesen Reifen Pendeln. Falls sich das als Problem erweisen sollte, war geplant, Intermediates oder handgeschnittene Slicks mit geringerer Profiltiefe zu verwenden. Die Gabel der Honda und die Schwinge wurden vermessen. Es zeigte sich, daß genügend Raum war, um Reifen, wie sie in der Regel bei 250er Grand Prix-Bikes verwendet werden, zu montieren. Das erforderte Radgrößen von  $3.50 \times 17$  vorn und  $4.50 \times 17$  hinten, vorzugsweise als Gußräder aus Magnesiumlegierung, da das Gewicht so gering wie möglich sein sollte, insbesondere um ein exaktes Arbeiten der Radaufhängung zu erreichen und das Massenträgheitsmoment zum Teil zu verringern, um dadurch bessere Beschleunigung und Verzögerung zu erhalten. Die Wahl der 17-Zoll-Räder brachte eine Reihe anderer Vorteil mit sich. Sie verringerte grundsätzlich die Höhe des Motorrads und verbesserte das Bremsmoment am Vorderrad.

Unter Beibehaltung der Standardgeometrie wurden die Zahlen in das Rechenprogramm eingegeben (siehe Anhang). Es zeigte sich, daß die Schwerpunktshöhe während dem Bremsen ein eindeutiges Optimum bei 710 Millimeter erreichte. Bei geringerer Höhe würde das Vorderrad blockieren, bei größerer Höhe das Motorrad auf dem Kopf stehen (siehe Kapitel 6).

Diese Grenzwerte konnten mit moderaten Handkräften am Bremshebel erzielt werden (bei einer Annahme der Reibungskoeffizienten von ungefähr 0,3 für die Beläge und 0,8 für den Reifen), so daß die Standardbremsen ausreichen.

Der nächste Schritt war, die Leistungsdaten in das Basic-Programm RL einzugeben, um einen Anhaltspunkt für die benötigte Übersetzung und die Leistungsdaten zu erhalten, die wir erwarten konnten. Errechnet wurden Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigung. Wenige Jahre zuvor hatte die Zeitschrift »Performance Bike« eine CR 500 auf die maximal erzielbare Höchstgeschwindigkeit übersetzt und der Rechner hatte die Leistung ziemlich genau vorausgesagt. Daher waren verlässliche Daten über den Luftwiderstand des Motorrads erhältlich. Sie sind insgesamt denen einer Suzuki GSX-R 1100 ziemlich ähnlich, woraus sich ergibt, daß die leichtere und schmalere 500er Einzylinder ein wenig windschlüpfriger gestaltet werden könnte). Das Programm errechnete die Lage der Schwerpunktsverlagerung und die Grenzwerte für die Beschleunigung, für ein Durchdrehen des Hinterrads oder einen Wheelie, wie Tabelle 11.1 zeigt.

Die erste Spalte zeigt das Motorrad im Originalzustand, außer dem Rollradius für einen 15/61-17 Hinterreifen und einem angenommenen Kraftschlußbeiwert von 0,8. Mit der Standardübersetzung würde es nur 142 km/h erreichen und unter Vollast bis

**Tabelle 11.1** 1988 Honda CR 500 R, berechnete Leistungsdaten

	1	2	3	4	5	6	7
Rollradius in mm	305						
Schwerpunktshöhe in mm	940		762	711 (1)			
Reifenkraftschlußbeiwert	0,8						1,0
Sekundärtrieb	35/13	35/15			30/15	30/16	
Höchstgeschwindigkeit, km/h	142	165	165	165	192	205	205
Zeit, sek.	6,8	9,0	8,5	8,5	14,1	33,2	33,2
Entfernung, km	0,16	0,24	0,22	0,22	0,48	0,75	0,75
0 – 96 km/h, sek.	4,2	4,2	3,8	3,8	3,8	3,9	3,7
400 m mit stehendem Start, Geschwindigkeit, (°) km/h	141	163	163	163	186	186	186
Wheelie, (°) km/h	115	115	94	85	72–88	80–88	80–88
Durchdrehen des Hinterrades, (°) km/h	–	–	104	104	104	72–104	–

**Bemerkungen**

- 1 Optimale Höhe beim Bremsen für den vorgegebenen Radstand und die Gewichtsverteilung
- 2 stehender Start viertel Meile, benötigte Zeit in Sekunden und Endgeschwindigkeit in Kilometer pro Stunde
- 3 Grenzwerte in diesem Geschwindigkeitsbereich

115 km/h einen Wheelie ausführen. Mit geringerer Leistung könnte es am Boden gehalten werden, wobei die Beschleunigung allerdings eingeschränkt ist.

Spalte zwei zeigt, was passiert, wenn die Übersetzung geändert wird: eine Verbesserung der Höchstgeschwindigkeit und der Beschleunigung, die aber von der Neigung des Motorrads zum Wheelie eingeschränkt wird. Eine Absenkung des Schwerpunkts, wie in Spalte drei, bringt eine leichte Verbesserung. Daraus resultiert allerdings auch die Möglichkeit, daß sowohl das Hinterrad durchdreht als auch das Vorderrad angehoben werden kann. Eine weitere Absenkung des Schwerpunkts auf den optimalen Wert beim Bremsen verringert die Tendenz zum Wheelie allerdings nur leicht. Eine Änderung der Übersetzung, siehe Spalte fünf und sechs hebt die Höchstgeschwindigkeit an und verringert die spitze Leistungscharakteristik ebenso wie die Wahrscheinlichkeit zum Durchdrehen des Hinterrads und Anheben des Vorderrads auf einen akzeptablen schmalen Geschwindigkeitsbereich. Obwohl die Zugkraft am Hinterreifen verringert wurde, haben sich die Beschleunigungszeiten verbessert, zum Teil weil die Beschleunigung bei höheren Geschwindigkeiten fortgesetzt werden kann, zum Teil weil die Leistung nicht zusammenbricht, wenn das Antriebsmoment versucht, das Vorderrad zu heben oder das Hinterrad durchzudrehen.

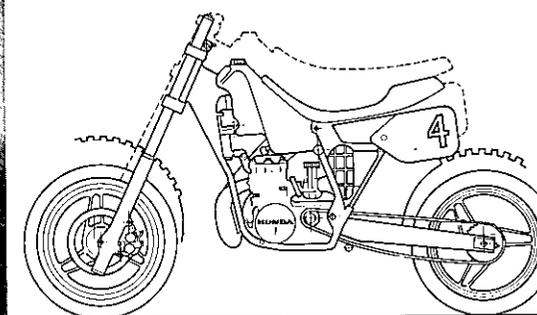
Auf einer guten Straßenoberfläche sollten Regenrennreifen einen höheren Kraftschluß erzeugen. Falls der Kraftschlußbeiwert bei 1,0 liegt (Spalte 7), verbessert sich die Beschleunigung im unteren Geschwindigkeitsbereich.

Die letzten drei Spalten liefern Ergebnisse für eine Änderung des Sekundärtriebs bei unveränderter Geometrie des Motorrads. In diesem Stadium sind Testfahrten notwendig, einmal um zu überprüfen, daß die Annahmen für den Kraftschluß, usw. realistisch sind, und zum Zweiten um herauszufinden, wie stark Tauchen und Nicken beim Bremsen und Beschleunigen auftritt. Wenn man Fett auf die Standrohre schmirt, zeigt sich der eingefederte Weg. Mit der Höhe des Motorrads unter diesen Bedingungen kann die Bewegung des Schwerpunkts ermittelt werden. Sie muß dann soweit variiert werden, bis sich beim Bremsen und Beschleunigen eine optimale Lage ergibt.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das Motorrad abzusenken oder anzuheben: durch Verstellen der Federbasis der Radaufhängungen, durch Verwendung unterschiedlich langer Federelemente oder unterschiedlicher Federraten, durch Verwendung von Anti-Dive-Systemen, usw..

Einige davon können ebenso den Steuerkopfwinkel und Nachlauf ändern. Die nächste Testreihe wird durchgeführt, um zu zeigen, ob die Modifikationen erfolgreich sind oder um herauszufinden, ob die Beschleunigungszeiten wie vorausberechnet sind und keine Probleme mit dem Durchdrehen des Hinterrads, mit Wheelies oder Blockieren des Vorderrads beim Bremsen entstehen.

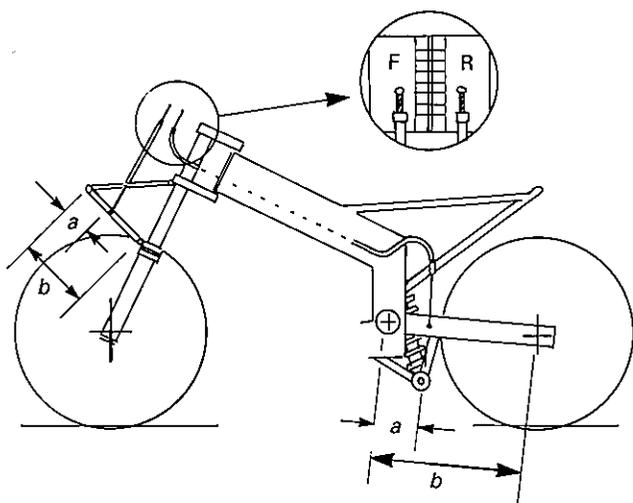
Falls Probleme auftreten, können die Daten dieser Tests benützt werden, um die Vorhersagen des Rechners durch Änderung der Werte, zum Beispiel für  $\mu$  zu revidieren, um zu einer Übereinstimmung mit den gemessenen Ergebnissen zu kommen. Falls alles nach Plan verläuft, konzentrieren sich die Tests darauf, die besten Fahreigenschaften, speziell beim Herunterbremsen bis zu Geschwindigkeiten in den niederen Gängen zu erzielen, eine enge Kurve zu fahren und voll zu beschleunigen. Versuche mit Änderungen von Lenkkopfwinkel und Nachlauf, Gewichtsverteilung, Dämpfung und Federraten sollten eine optimale Abstimmung ergeben. Sie muß nicht mit der besten Abstimmung für den Kraftschluß übereinstimmen. In diesem Fall ist es notwendig, einen anderen Weg zu finden (zum Beispiel die Höhe des Motorrads durch kürzere Federn zu verändern anstatt durch eine Änderung der Federbasis).



**Abbildung 11.14 (a) und (b)** Die modifizierte Honda CR 500 R, ausgerüstet mit 17 Zoll Maxton-Rädern aus Magnesiumlegierung, Dunlop KR 244 Vorderreifen mit weicher Mischung und handgeschnittenen KR 106 Slicks am Hinterrad.

Bis zu dieser Stufe wird die grundsätzliche Fahrwerksauslegung erarbeitet. Weitere Tests sind nötig, um sich auf die Optimierung von Details zu konzentrieren. Die beste Fahrwerksabstimmung herauszufinden, Probleme wie Radstempeln durch Änderung der Dämpfer- und Federrate zu lösen, usw..

Die abschließende Phase wird dazu benützt, die Leistungsfähigkeit zum Beispiel durch Gewichtsverringerung zu verbessern. Auswirkungen auf eine Änderung des Kühlers zu untersuchen, die Sitzposition (vielleicht) für besseres Kurvenverhalten zu ändern oder dem Fahrer zu ermöglichen, den Schwerpunkt für optimale Beschleunigung oder Verzögerung zu verschieben und die Motorcharakteristik zu ändern. Manchmal ist es besser, die Form der Drehmomentkurve auf Kosten eines maximal erzeugten Drehmoments oder der Leistung zu ändern. Das Rechenprogramm RL zeigt, wie sich solche Änderungen auf den Kraftschluß oder die Beschleunigung auswirken.



**Abbildung 11.15** Eine Methode, die Sitzhöhe während der Fahrt zu überprüfen. Die Züge können an Hebeln montiert werden, um ihren Weg zu verringern ( $a/b \times$  Federweg). Das ist eine nützliche Art zu überprüfen, ob die Radaufhängung zusammensinkt und ein Stempeln des Rads bewirkt oder ob es Probleme in der Abstimmung zwischen Vorder- und Hinterradaufhängung gibt, usw..

Während diesem abschließenden Test ist es schwierig, genau herauszuarbeiten, was mit der Radaufhängung passiert oder wie sich verschiedene Modifikationen auf andere Teile ausgewirkt haben. Eine Änderung der Verkleidung kann die Luftströmung zu den Vergasern oder durch den Kühler beeinflussen. Sämtliche On-Board-Messungen können dann sehr nützlich sein.

Die Verwendung von Bowdenzügen (siehe Abbildung 11.15), die auf einem Maßstab angebracht sind, zeigen den Betrag des Federwegs, die Änderung der Sitzhöhe, (Niederpumpen), das Zusammenwirken von Vorder- und Hinterradaufhängung und die Wege beim Stempeln eines Rads. Es zeigt auch die Höhe, die das Motorrad unter verschiedenen Bedingungen einnimmt. Diese Lage kann dann statisch hergestellt werden, um zu sehen, wie sich der Schwerpunkt verlagert hat, um die Bodenfreiheit,

den Kettendurchhang, die Kettenspannung, usw. zu überprüfen. Ein linear arbeitender Potentiometer (der ähnlich wie ein Lenkungsdämpfer aussieht) kann den Federweg aufnehmen, und die Ergebnisse auf einen Data-Logger übertragen, wo sie gespeichert und zu passender Zeit analysiert werden können.

Die Umströmung des Motorrads kann mit Wollfäden oder durch einen kleinen Manometer, der Über- und Unterdruckzonen aufzeigt, überprüft werden.

Falls Temperaturmessungen notwendig sind, können Thermoelemente hergestellt oder gekauft (siehe Anhang) oder Temperaturstifte verwendet werden.

Die Dosierung und der Weg an Bremshebeln sind nur subjektiv erfaßbar. Sie können aber so eingestellt werden, daß sich verschiedene Übersetzungen und Hebelwege ergeben. Außerdem sind Versuche mit verschiedenen Bremsleitungen möglich. Ein, mit einem T-Stück verbundener Druckmanometer in der Bremsleitung zeigt ein Maß für die aufgewendete Kraft und erleichtert die Berechnung der Kräfte, die im Rest des Systems wirken.

Ein Manometer, der mit einem Staurohr verbunden ist, ergibt Aussagen über die Luftgeschwindigkeit. Er kann auch benützt werden, um Über- und Unterdruckzonen um das Motorrad zu ergründen, die hilfreich sind, um wirksame Einlaßöffnungen für den Kühler zu finden, Luft mit hohem Druck dem Motor zuzuführen, usw..

# Anhang

## Zusammenfassung der Grundbegriffe

### Ansteigende Federrate

Eine Federrate (siehe Federrate), die zunimmt, wenn die Radaufhängung einfedert. Luftunterstützte Federn haben von Haus aus diese Charakteristik, Schraubenfedern können progressiv gewickelt sein, so daß bei der Einfederung einige Windungen auf Block gehen, wodurch sich die Feder verkürzt und verhärtet. Systeme mit Hebelumlenkungen verringern die Hebelübersetzung, wenn die Radaufhängung einfedert und erzeugen dadurch auch bei linearer Federrate eine ansteigende Federrate der Radaufhängung.

### Anti-Dive

Radaufhängung, die dem Tauchen (siehe oben) durch Änderung der Druckstufendämpfung oder der Federrate während dem Bremsen oder durch Einleitung des Bremsmoments in die Radaufhängung entgegenwirkt.

### Anti-Squat

Radaufhängung, die beim Beschleunigen einem Eintauchen des Hecks entgegenwirkt (siehe oben), indem der Zug an der Kette zum Ausfedern benützt wird oder lastabhängig arbeitet.

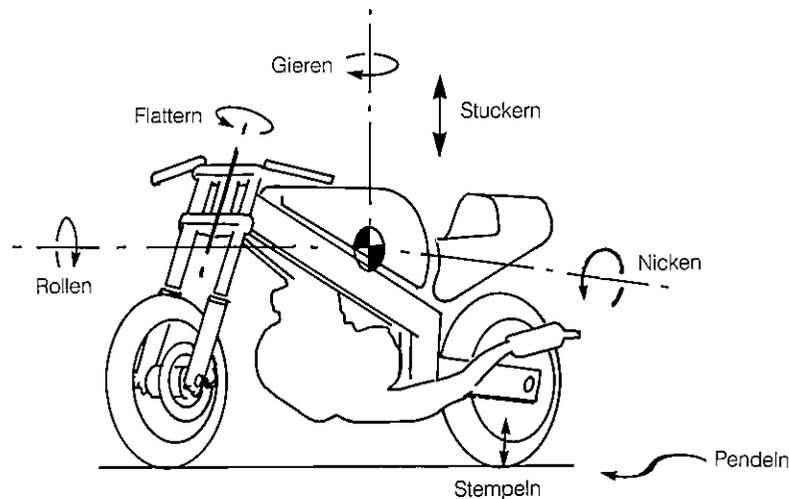


Abbildung A.1 Die Achsen, um die sich ein Motorrad bewegt.

### Ausfedern

Wenn ein Federbein beim Ausfedern die Grenze seines Federwegs erreicht.

### Ausfederung

Der Weg der Radaufhängung ohne Last; Gegenteil von Einfederung.

### Beschleunigung

Betrag der Geschwindigkeitsänderung, entweder in Größe oder Richtung, das bedeutet, daß selbst bei konstanter Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn eine Beschleunigung notwendig ist, da sich die Richtung ständig ändert.

### Dämpfung

Jede Kraft, die der Bewegung entgegenwirkt oder Energie eines bewegten Teils aufnimmt. Speziell wenn die Radaufhängung zusammengedrückt wird, ist die Energie in einer Feder gespeichert, die sie auf den Rest des Fahrzeugs übertragen will. Der Dämpfungsmechanismus nimmt einen Teil dieser Energie auf (gewöhnlich indem Öl durch schmale Bohrungen gedrückt wird), um zu verhindern, daß die Feder mit der gleichen Kraft ausfedert. Eine Zug- oder Druckstufendämpfung wird verwendet, um die Energie aufzunehmen.

### Dive

Die Tendenz der Vorderradaufhängung während dem Bremsen einzufedern (siehe Gewichtsverlagerung). Es gibt zwei Kriterien, den Weg, den die Radaufhängung einfedert und deren Geschwindigkeit. Eine Erhöhung der Druckstufendämpfung verringert die Geschwindigkeit, mit der die Radaufhängung einfedert. Der Weg kann auch durch Anheben der Federbasis und der Federrate oder durch Einleiten des Bremsmoments in die Radaufhängung verringert werden.

### Drehmoment

Es wird durch zwei Kräfte verursacht, die in entgegengesetzten Richtungen, aber nicht auf der gleichen Wirkungslinie, angreifen.

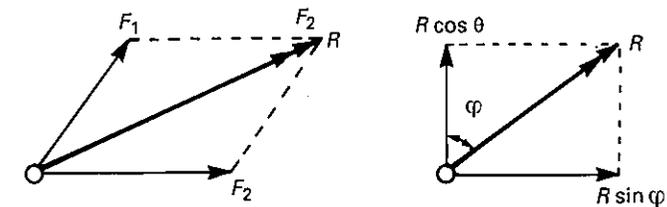


Abbildung A.2 Wenn zwei Kräfte ( $F_1, F_2$ ) in einem gemeinsamen Punkt angreifen, ergibt sich eine Resultierende  $R$ . Wenn die Länge jedes Vektors die Größe ihrer Kraft wiedergibt, und die Richtung mit der Kraft übereinstimmt, kann die Resultierende geometrisch ermittelt werden. Wenn Sie  $F_1$  im Maßstab gezeichnet haben, zeichnen Sie  $F_2$  ebenso, beginnend am Ende von  $F_1$ . Die Resultierende ist dann in Größe und Richtung die Linie, die notwendig ist, um ein Dreieck vom Ursprungspunkt bis zum Ende von  $F_2$  zu vervollständigen. Diese Vektor-Addition kann auf alle Kräfte angewendet werden, solange sie im selben Punkt angreifen. Auf dieselbe Art kann eine einzelne Kraft  $R$  in zwei Komponenten aufgeteilt werden (in der Regel unter 90 Grad zu einer anderen), so daß die eine  $r \cos \varphi$  und die andere  $r \sin \varphi$  beträgt.

### Druckzentrum

Wenn eine Last auf eine Fläche, zum Beispiel die Reifenaufstandsfläche oder die Fläche eines Bremsbelags wirkt oder der Luftwiderstand an der Frontfläche eines Motorrads angreift, kann sie durch eine einzige Kraft in einem Punkt, dem Druckzentrum ersetzt werden.

### Durchschlagen

Wenn eine Radaufhängung beim Einfedern den gesamten Federweg aufbraucht.

### Einfedern (der Radaufhängung)

Die Bewegung der Radaufhängung, bei der das Rad einer Bodenwelle folgt.

### Einfederung

Verkürzung der Radaufhängung, wenn ein Rad von einer Bodenwelle angehoben wird.

### Ersatzfederrate

Die Kraft, die nötig ist, um ein Rad um einen bestimmten Betrag senkrecht zu bewegen. Gemessen in Netwon pro Millimeter. Es ist die Federrate, multipliziert mit der Hebelumlenkung zwischen Rad und Feder.

### Federrate

Die Kraft, die notwendig ist, um die Feder um eine Längeneinheit (ausgedrückt in Kilogramm pro Millimeter oder Newton pro Millimeter) zusammenzudrücken. Für eine vorgegebene Feder kann sie konstant (linear) sein, eine zweifache Rate haben (bei der die Rate zunimmt, wenn die Feder eine bestimmte Einfederung erreicht hat) oder progressiv zunehmen.

### Flattern

Instabilität, bei der die Lenkung von einer Seite zur anderen schwingt.

### Frontfläche

Der von vorn oder in Richtung der Luftströmung projizierte Querschnitt des Motorrads. Die Fläche der Silhouette, auf die der Fahrtwind auftrifft.

### g (Gravitationskonstante)

Die Beschleunigung eines Körpers, der der Schwerkraft unterliegt ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

### Gabelbrückenversatz

Die Gabelbrücken halten die Gabelbeine in einem bestimmten Abstand zur Lenkachse. Während die Gabelbrücken einen Versatz zwischen den Gabelbrücken und der Lenkachse herstellen, könnte man diesen auch dadurch erzeugen, daß die Gabelbeine nicht parallel zur Lenkachse verlaufen. Das ist als Gabelbrückenversatz bekannt. Einige Gabelbrücken sind einstellbar. Die Gabel, die das Vorderrad führt, verläuft in der Regel parallel (oder nahezu) zur Steuerkopfachse, jedoch mit einem kurzem Abstand davor, um den gewünschten Betrag an Nachlauf sicherzustellen. Der Abstand zwischen der Lenkachse und der Achse der Gabel wird als Gabelbrücken-

versatz bezeichnet. Beachten Sie, daß auch die Radachse gegenüber der Gabel versetzt sein kann.

### Gefederte Masse

Der Teil des Fahrzeugs, der von den Radaufhängungen abgedefert wird, das heißt Rahmen, Motor, Verkleidung, Fahrer, usw. (siehe ungefederte Massen).

### Gewichtsverlagerung

Die Maschine beschleunigt und bremst mit Kräften, die zwischen dem Reifen und der Fahrbahn aufgebaut werden und an der Straßenoberfläche angreifen. Die Massenenträgheitskraft der Masse des Motorrads greift im Schwerpunkt an, der sich in einem Abstand über dem Boden befindet. Der Abstand zwischen der beschleunigenden/bremsenden Kraft und dem Schwerpunkt erzeugt ein Drehmoment, das versucht, das Motorrad zu überschlagen (vorwärts im Falle des Bremsens, rückwärts während der Beschleunigung). Daraus ergibt sich, daß beim Bremsen Last vom Hinterrad genommen und auf das Vorderrad verlagert wird, und beim Beschleunigen genau der umgekehrte Vorgang erfolgt. Eine sorgfältige Positionierung der Lage des Schwerpunkts kann den Kraftschluß sowohl beim Beschleunigen als auch Bremsen beträchtlich verbessern.

### Gewichtsverteilung

Das Verhältnis der Gesamtmasse, das von der Vorder- und Hinterradachse getragen wird.

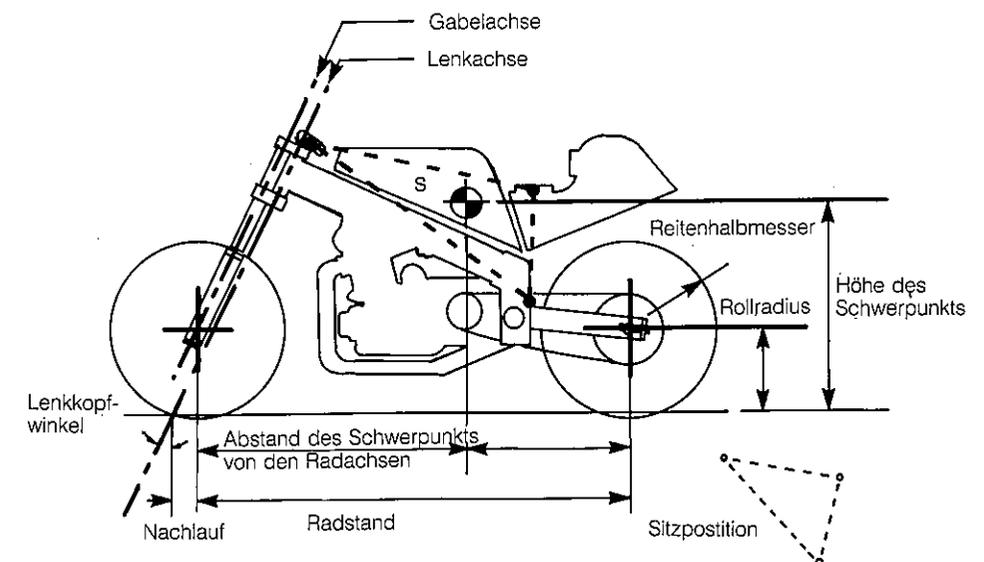


Abbildung A.3 Einige der Abmessungen, die verwendet werden, um das Fahrwerk und die Lenkung zu beschreiben.

### Gieren

Bewegungsart, bei der sich das Motorrad um seine Hochachse dreht, ohne sich zu neigen.

### Konstruktionslage

Die festgelegte Lage der Vorder- und Hinterradaufhängung, bei der sich ein Fahrzeug in Bewegung oder auch im Stand befindet. Die Höhe des gefederten Endes der Radaufhängung, wobei die zuverlässigste Messung aus dem Abstand zwischen dem gefederten und ungefederten Teil eines Motorrads resultiert.

### Lenkwinkel

Der Winkel, unter dem das Rad oder der Lenker relativ zur Mittelebene des Motorrads eingeschlagen wird. Beachten Sie, daß der Einschlagwinkel am Lenker wegen der Neigung der Lenkachse nicht dem am Rad entspricht.

### Luftwiderstandsbeiwert ( $C_w$ )

Eine Zahl für einen vorgegebenen Körper, die einen Zusammenhang zwischen dessen Luftwiderstand und der Fläche, der Geschwindigkeit und der Luftdichte herstellt. Diese Zahl kann benützt werden, um die Windschlüpfrigkeit verschiedener Formen zu vergleichen.

### Masse

Der Betrag der Materie eines Körpers. Obwohl es nicht genau das gleiche wie das Gewicht ist, sind ähnlich klingende Einheiten geeignet, uns alle zu verwirren. Die Gewichtskraft ist die Kraft, die eine gegebene Masse unter dem Einfluß der Schwerkraft ausübt. Kraft ist Masse mal Beschleunigung. Alle Gegenstände beschleunigen mit einem Betrag von  $g$  (siehe oben), der Erdanziehungskraft, so daß die Gewichtskraft = Masse  $\times$   $g$  ist.

Wenn ein Motorrad beschleunigt oder abbremsst oder eine Kurve fährt, ist es seine Masse, die beschleunigt werden muß. Falls ein Motorrad zweihundert Kilogramm wiegt, beträgt seine Kraft  $200 \times g$  oder 2000 Newton.

### Moment

Ein Moment wird erzeugt durch eine Kraft um einem Punkt gleich der Kraft mal dem Abstand von diesem Punkt, also dem Hebelarm (siehe Drehmoment).

### Nachlauf

Der Abstand des Druckzentrums der Reifenaufstandsfläche, von dem Punkt, bei dem die Lenkachse auf den Boden auftrifft. Falls die Aufstandsfläche vor der Lenkachse liegt, ist der Nachlauf negativ.

### Nicken

Eine Bewegungsart, bei der sich die Front des Fahrzeugs relativ zum Heck auf- oder abwärts bewegt.

### Pendeln

Eine Art der Instabilität, bei der das Motorrad einem s-förmigen Kurs folgt.

### Pro Squat

Ein Verhalten, das versucht, die Hinterradaufhängung während dem Bremsen einzufedern, indem das Bremsmoment in die Radaufhängung eingeleitet wird.

### Radstand

Der Abstand zwischen der Vorder- und Hinterradachse.

### Reibungskoeffizient ( $\mu$ )

Statisch: Die Kraft, die benötigt wird, um einen Gegenstand über eine Oberfläche zu bewegen, geteilt durch die Masse des Gegenstands oder die Kraft, die nötig ist, um ihn über die Oberfläche zu schieben.

Dynamisch: Die Kraft, die parallel zur Oberfläche erzeugt wird, wenn sich der Gegenstand bewegt, geteilt durch die Kraft, die nötig ist, um ihn gegenüber der Oberfläche zu verschieben.

### Resultierende

Zwei oder mehrere Kräfte oder Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, usw. können miteinander eine einzige Kraft erzeugen, die in Größe und Richtung eine neue Wirkungslinie bildet (siehe Abbildung A.2).

### Rollachse, Rollzentrum

Die Achse, um die das Fahrzeug rollt (es gibt auch eine Gierachse, Nickachse, usw.). Da aber ein Motorrad durch Rollen lenkt, ist diese Bewegungsart die wichtigste.

### Rollen

Bewegungsart, bei der sich das Fahrzeug zur Seite neigt.

### Schlupf

Wo immer die Kraft über einen flexiblen Antrieb, zum Beispiel über einen Keilriemen oder Reifen, übertragen wird, gibt es eine relative Bewegung zwischen dem treibenden und dem angetriebenen Teil. Der Reifen kann eine Umfangsgeschwindigkeit haben, die nicht mit der Geschwindigkeit des Motorrads übereinstimmt, obwohl er nicht durchdreht. Der Reifen kann dabei eine höhere Zugkraft als bei normaler Rollreibung zwischen Reifen und Straße erzeugen und mehr Kraftschluß aufbauen als beim Durchdrehen oder gleiten.

### Schräglaufwinkel

Der Reifen kann sich in einer Richtung bewegen, die nicht mit der Richtung identisch ist, in die das Rad zeigt (obwohl er nicht gleitet). Der Schräglaufwinkel ist der Winkel zwischen diesen beiden Richtungen.

### Schwerpunkt

Der Punkt, in dem man sich die gesamte Masse des Fahrzeugs konzentriert denken kann, ohne dessen Gleichgewicht zu ändern. Um Berechnungen zu vereinfachen, werden alle Kräfte, wie die Massen, die Massenträgheits- und die Zentrifugalkraft, so angesetzt als wirkten sie in diesem Punkt.

### Steuer- oder Lenkkopfwinkel

Der Winkel der Lenkachse. Bei Motorrädern mit konventioneller Telegabel bewegt sich der Winkel in einem Bereich von 60 – 65 Grad zur Horizontalen oder 25 bis 30 Grad zur Vertikalen gemessen. Beide Arten der Messung sind gebräuchlich.

### Stuckern

Eine Bewegungsart des Fahrzeugs. Beim Stuckern führt das Fahrzeug vertikale Hubbewegungen aus und bleibt dabei mehr oder weniger parallel zur Fahrbahnoberfläche (vergleichen Sie mit Nicken, Gieren, Rollen).

### Squat

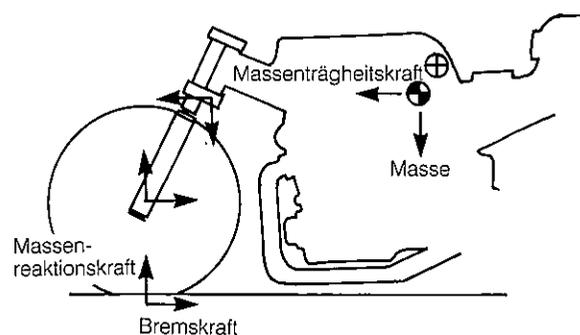
Einfedern der Hinterradaufhängung

### Stabilität

Ein Gegenstand ist stabil, nachdem er, wenn er gestört wurde, in seine Ausgangsposition zurückkehrt. Falls viel Zeit vergeht oder dieser Fall nicht eintritt, ist er instabil. Manche Gegenstände kehren in ihre Ausgangsposition so schnell zurück, daß sie Massenträgheitskräfte aufbauen, die sie über die stabile Lage hinaus verschieben. Falls diese Bewegung undefiniert wie bei einem Pendel ausgeführt wird, ist sie instabil. Falls die Schwingung sich verringert, wird sie abklingend, falls sie sich verstärkt, aufklingend bezeichnet. Für praktische Zwecke kann ein Körper der nicht innerhalb einer bestimmten Anzahl von Schwingungen, zum Beispiel fünf, in seine Ausgangsposition zurückkehrt, als instabil betrachtet werden.

### Stempeln

Phänomen, das zwischen der Radaufhängung und den Reifen verursacht wird, die das Motorrad nahe der Haftgrenze in Schwingungen versetzen.



**Abbildung A.4** Gewichtsverlagerung Während das Gewicht versucht, das Motorrad im Uhrzeigersinn über das Vorderrad zu drehen, versucht seine Massenträgheit es während dem Bremsen entgegen dem Uhrzeigersinn zu drehen. Die Reaktion am Vorderreifen verstärkt sich, die anwachsende Kraft drückt die Vorderradaufhängung zusammen (was die Schwerpunktslage leicht verschiebt und die Lenkgeometrie verändert).

### Sturz

Der Winkel, den ein Rad zur Vertikalen bildet.

### Sturzseitenkraft

Wenn ein Rad in Schräglage fährt, versucht es, einen Bogen in Richtung der Neigung zu beschreiben als wäre es ein Teil eines großen Kegels, der auf der Seite liegt. Es würde auf einer Kreisbahn um einen Mittelpunkt rollen, den die Spitze des Kegels bildet. Falls das Rad dieser Bahn nicht folgen kann, entsteht eine Kraft in der Richtung, der sie folgen will.

### Übersteuern

Eine Kurvenbedingung, bei der (a) der Schräglaufwinkel des Hinterradens größer als der des Vorderradens ist oder (b), die durch einen konstanten oder abnehmenden Lenkwinkel erzeugt wird. Es ist beim Motorrad eine natürliche Tendenz, wenn es durch den Einsatz von Leistung im Drift bewegt wird.

### Ungefederte Massen

Der Teil eines Fahrzeugs, der nicht von der Radaufhängung unterstützt wird, das heißt, die Räder, Bremsen, bewegte Teile der Radaufhängung, Federn und die Kraftübertragung. Damit die Räder in der Lage sind, den Fahrbahnkonturen exakt folgen zu können, und die Radaufhängung sie am Boden hält und dabei so wenige Stöße wie möglich auf die gefederten Teile des Fahrzeugs überträgt, muß das Verhältnis zwischen der gefederten und ungefederten Masse so groß wie möglich sein. Wenn ein Motorrad auf Höchstleistung getunt wird, wird es soweit wie möglich erleichtert. Das führt zu Problemen der Radaufhängung, da es einfacher ist, Gewicht am Rahmen, der Verkleidung, am Motor, usw. als einen proportional gleich großen Anteil an den Rädern und Bremsen abzuspecken. Deswegen wird das Verhältnis von gefederter zu ungefederter Masse geringer.

### Untersteuern

Ein Kurvenverhalten, bei dem (a) der Schräglaufwinkel des Vorderrads größer als der des Hinterrads ist oder (b) ein steigender Lenkwinkel nötig ist, um einer gleichbleibenden Kreisbahn zu folgen.

### Vorspannung

Die Kraft, mit der eine Teil zusammengebaut ist. Bei einem Lager ist es das Gegenteil von Spiel. Sie wird in der Regel als Anzugsmoment der Mutter gemessen, die das Lager hält (zum Beispiel Steuerkopf oder Schwingenachse). Bei Federn ist es die Kraft nach der Montage, das heißt, die Kraft, die überwunden werden muß, bevor die Feder zusammengedrückt wird. Sie kann aus der montierten Länge abgelesen werden.

### Zentrifugal- und Zentripedalkraft

bedeutet eine Kraft, die eine Beschleunigung von oder zum Mittelpunkt eines Kreises ausübt. Wenn zum Beispiel ein Motorrad einem Kreisbogen folgt, wirkt in Richtung des Kreismittelpunkts eine Beschleunigung, die in dieser Richtung eine Kraft zur Folge hat. Die Massenträgheitskraft des Motorrads wirkt in die entgegengesetzte Richtung, also vom Zentrum abgewandt (Zentrifugalkraft). Jede gebogene Kreisbahn

kann als Teil eines Kreises mit einem sich ändernden Kreismittelpunkt gesehen werden. Die Beschleunigung, die nötig ist, um eine Kreisbahn aufrecht zu erhalten, beträgt:  $v^2/r$  oder  $\omega^2 r$ , wobei  $r$  der Radius des Kreises,  $v$  die lineare Geschwindigkeit und  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit ist. Die Kraft resultiert aus der Masse des Motorrads, multipliziert mit der Beschleunigung.

## Symbole und Einheiten

A	Fläche	mm <sup>2</sup>
a	Konstante, Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>
b	Konstante	
c	Konstante	
c <sub>w</sub>	Luftwiderstandsbeiwert	
C <sub>p</sub> , C <sub>v</sub>	spezifisches Wärmeäquivalent von Gas bei konstantem Druck und konstantem Volumen	kJ/kg
d	Durchmesser	mm
d	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
D	Widerstandskraft	N
f	Übersetzung des Sekundärtriebs	
F	Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	9,81 m/s <sup>2</sup>
G	Schubmodul	N/mm <sup>2</sup>
h	Höhe	mm
I	elektrischer Strom	A
K	Konstante	
l	Länge	mm
M	Drehmoment	Nm
m	Masse	kg
n	Anzahl, Motordrehzahl u/min	min <sup>-1</sup>
P	Kraft	N
p	Druck	bar
r	Radius	mm
R	elektrischer Widerstand	Ω
s	Federrate	N/mm
t	Abstand, Dicke,	mm
T	Temperatur	°C
U	elektrische Spannung	V
v	Geschwindigkeit	km/h
V	Volumen	m <sup>3</sup>
w	Abstand, Radstand	mm
x	Abstand, horizontal	mm
X	horizontale Koordinate des Schwerpunkts	mm
y	Abstand, vertikal	mm
Y	vertikale Koordinate des Schwerpunkts	mm
x,y	horizontale, vertikale Koordinaten des Druckzentrums	mm

z	Abstand im rechten Winkel zu x und y	mm
α	Winkel	°
β	Winkel	°
γ	Winkel	°
μ	Reibungskoeffizient	
φ	Winkel	°
ω	Winkelgeschwindigkeit	

## Rechenprogramme

Programm RL:  
Bestimmung von Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit

```

10 REM r1
20 REM 12/12/87: 17/4/89
25 REM Maximum speed 220 mi/h
30 REM BASIC2
40 REM jwr
50 REM
70 REM
80 REM
100 GOSUB show: WINDOW #1 TITLE "RL.BAS"
101 REPEAT: rread=INKEY : UNTIL rread>-1
102 IF rread=114 THEN x=30: y=7: GOTO 140
103 CLS
105 INPUT AT(10;6) "Make/model: ",n$: GOSUB nam
106 PRINT: PRINT: PRINT AT(8) "This will be filed as "n1$". Is this
    OK? y/n";
107 REPEAT: nn=INKEY: UNTIL nn>-1: IF nn=110 THEN CLS: PRINT AT(10;
2) "Full name: "n$: INPUT AT(10;6) "File name (max. 8 characters, no
space): ",n1$: IF n1${-3 TO}<>"RL1" THEN n1$=n1$+".RL1"
110 PRINT: INPUT AT(10) "Number of gears: ",y
115 PRINT: PRINT AT(10) "For optimum speed, acceleration and gearsh
ift"
116 PRINT AT (10) "predictions, give figures for the full engine sp
eed"
117 PRINT AT (10) "range, up to maximum permissible speed.": PRINT
120 PRINT AT(10) "Number of power/speed entries:"
130 INPUT AT(10) "if less than 20, enter 0 ",x: IF x=0 THEN x=20

140 DIM n(x), hp(x), t(x), ld(x), v(y,x), vr(y,x), f(y,x), g(y): aa
=0
145 DIM fav(y+1,220), warn(220), a(220), tim(220), thr(220),shift(y
), vsh(y)
146 IF rread=114 THEN GOSUB rea: aa=1

```

```

148 REPEAT
150 GOSUB menu
160 UNTIL d>=10
200 END

300 LABEL menu
305 WINDOW #1 TITLE "RL.BAS"
310 IF aa=0 THEN GOSUB inpg: GOSUB inpp
315 aa=aa+1
320 CLS
330 PRINT AT(12;4)"Change gearing data.....1"
340 PRINT TAB(12) "Change power data.....2"
350 PRINT TAB(12) "Display power/torque.....3"
360 PRINT TAB(12) "Display thrust/road speed.....4"
365 PRINT TAB(12) "Display acceleration *......5"
368 PRINT TAB(12) "Display gearshift/traction data @...6"
370 PRINT TAB(12) "File data *......7"
380 PRINT TAB(12) "Read data from file.....8"
390 PRINT TAB(12) "Print data *......9"
400 PRINT TAB(12) "STOP.....10"
405 PRINT: PRINT: PRINT TAB(10)"* use item 4 before selecting this"
406 PRINT TAB(10)"@ use items 4 and 5 before selecting this"
407 PRINT: PRINT TAB(10)"Use screen 2 to see current specification.
"
410 INPUT d: ON d GOSUB inpg, inpp, pow, thr, acc,warn, fil, rea, p
ri
430 RETURN

500 LABEL show
505 OPTION DATE 1
510 CLS
520 WINDOW #1 FULL ON

540 WINDOW #1 OPEN
541 ELLIPSE 4150;3000,2500,0.7 WIDTH 5 COLOUR 2
542 PRINT AT(30;6) POINTS(20);"Road Loads"
543 PRINT AT(8;10) ADJUST (16);"Acceleration and terminal speed pre
dictor"

545 PRINT AT(12;18) "Do you want to enter new data"
546 PRINT TAB(12)"or read data from file? n/r "
550 RETURN

600 LABEL inpg
610 CLS: WINDOW #1 TITLE "DRIVELINE SPECIFICATION"

```

```

615 IF aa>0 THEN 720
616 d1$=DATE$
620 INPUT AT (10;2) "Primary reduction: ",p
630 FOR i=1 TO y
640 PRINT AT (10) "Internal gear ratio "i"; INPUT ": ",g(i)
650 NEXT
660 INPUT AT (10) "Number of teeth on gearbox sprocket: ",t1
670 INPUT AT (10) "Number of teeth on wheel sprocket: ",t2
680 PRINT "Do you know the rolling radius of the rear tyre? y/n "
690 REPEAT: e$=INKEY$: UNTIL e$>"":IF e$="n" THEN GOSUB tyre
700 PRINT:INPUT "Rolling radius of tyre (inches): ",r
710 IF aa=0 THEN 860
720 CLS: PRINT AT (10;4) "To change primary reduction press.....1"
730 PRINT AT (21;5) "internal gears.....2"
740 PRINT AT (21;6) "gearbox sprocket.....3"
750 PRINT AT (21;7) "wheel sprocket.....4"
760 PRINT AT (21;8) "tyre radius.....5"
775 PRINT AT (10;10)"No change.....6"
780 INPUT bb: ON bb GOTO 790, 800, 810, 820, 830, 870
790 PRINT AT (10;12) "Current primary reduction is "p"; INPUT "New
ratio: ",p: GOTO 860
800 FOR i=1 TO y: PRINT AT (10) "Current gear "i" is "g(i); INPUT
"New ratio: ",g(i): NEXT: GOTO 860
810 PRINT AT (10) "Current gearbox sprocket is "t1; INPUT "New spr
ocket: ",t1: GOTO 860
820 PRINT AT (10) "Current wheel sprocket is "t2; INPUT "New sproc
ket: ",t2: GOTO 860
830 PRINT AT (10) "Current rolling radius is "r: INPUT AT(10) "New
radius: (enter 0 to see tyre sizes) ",r: IF r=0 THEN GOSUB tyre: IF
r=0 THEN 830 ELSE 860

860 PRINT: PRINT AT (8) "Any other changes? y/n ", :REPEAT: ee$=INK
EY$: UNTIL ee$>"": IF ee$="y" THEN 720
870 GOSUB spec: RETURN

900 LABEL inpp
910 CLS: WINDOW #1 TITLE "ENGINE OUTPUT"
920 PRINT AT (4;2) "Enter speed (rev/min) and engine output (bhp).

980 PRINT "Enter speed; RETURN; output; RETURN. Enter 1 to stop inp
ut."
990 PRINT: PRINT AT (15) "Rev/min" AT (25) "bhp" AT (35) "torque, l
b-ft"
1000 w=0
1010 REPEAT
1020 PRINT TAB(15) ">";INPUT "", n(w); IF n(w)=1 THEN 1030

```

```

1025 PRINT TAB(25)">";:INPUT" ",hp(w);: t(w)=hp(w)*5252/(n(w)): PRIN
T TAB(35) ROUND(t(w),1)
1030 w=w+1
1040 UNTIL n(w-1)=1 OR w=x OR hp(w-1)=1
1042 PRINT: PRINT "Are the figures OK? y/n"
1043 REPEAT: e$=INKEY$: UNTIL e$>"": IF LOWER$(e$)="n" THEN CLS: GO
TO 980
1050 RETURN

1500 LABEL calc
1510 FOR j=1 TO y
1520 q=p*g(j)*t2/t1
1530 FOR i=0 TO w-2
1540 v(j,i)=0.00595*r*n(i)/q: vr(j,i)=ROUND(v(j,i))
1550 f(j,i)=hp(i)*375/v(j,i): REM vr() is rounded to whole mi/
h
1560 NEXT: REM for use in calculating av forc
e
1570 NEXT
1580 RETURN

1600 LABEL thr
1610 GOSUB calc
1620 CLS: WINDOW #1 TITLE "THRUST (lbf) v ROAD SPEED (mi/h)"
1630 PRINT AT(10;4) "Figures or graph? f/g ",: REPEAT: th$=INKEY$:
UNTIL th$>"": IF aa<3 THEN 1640: IF th$="f" THEN 1640
1632 PRINT TAB(10) "Drag factor: option 1,2,3 or 4"
1634 INPUT AT(10) "or select 5 to see drag data: ",ad
1640 IF th$="g" THEN GOSUB gra: GOTO 1740
1650 CLS
1660 PRINT TAB(10) "Road speed" TAB(25)"Thrust"
1665 PRINT TAB(16) "mi/h" TAB(28) "lbf"
1670 PRINT
1680 FOR j=1 TO y
1690 FOR i=0 TO w-2
1700 PRINT USING " ##.##";v(j,i),f(j,i): GOSUB wait
1710 NEXT
1720 PRINT: PRINT TAB(8) USING "##.##&"; v(j,i-1)*1000/n(i-1) " mi/
h per 1000 rev/min": PRINT: PRINT
1730 NEXT
1735 PRINT TAB(20)"Press any key to continue."
1736 IF INKEY$="" THEN 1736
1740 RETURN

1741 LABEL wait
1742 IF ww>0 THEN ww=ww+1: GOTO 1770
1743 yy=YPOS

```

```

1744 IF yy>750 THEN 1780
1745 PRINT AT(10;20) "Press SPACE bar to continue.";
1750 IF INKEY$<>" " THEN 1750
1760 ww=i: PRINT AT (10;20)"
1770 IF ww=13 THEN ww=0: PRINT: GOTO 1745
1780 RETURN
1800 LABEL gra
1810 GOSUB drag
1815 WINDOW #1 TITLE "Thrust (lbf) v. road speed (mi/h)"
1820 sx=7000/v(y,w-2): sx=sx/1.05
1830 i=0
1840 j=-1
1850 j=j+1: IF j=w-2 THEN 1880
1860 IF f(1,i)>=f(1,j) THEN 1850
1870 IF f(1,i)<f(1,j) THEN i=i+1: GOTO 1840
1880 sy=4000/f(1,i): i2=i : sy=sy/1.05
1890 k=20: i=0: kk=ROUND(f(1,i)/50): kk=kk*10
1900 REPEAT: LINE (1000+kk*i*sx);1000,(1000+kk*i*sx);5000: i=i+1
1910 UNTIL kk*(i-1)*sx>=5500
1920 FOR j=0 TO i-1: MOVE (800+kk*j*sx);700: PRINT j*kk: NEXT
1930 i=0
1940 REPEAT: LINE 1000;(1000+kk*i*sy),8000;(1000+kk*i*sy): i=i+1
1950 UNTIL kk*sy*(i)>=4000
1960 FOR j=0 TO i-1: MOVE 400;(875+kk*j*sy): PRINT j*kk: NEXT
1970 FOR i=1 TO y
1980 FOR j=0 TO w-3
1990 LINE 1000+v(i,j)*sx;1000+f(i,j)*sy,1000+v(i,j+1)*sx;1000+f(i,
j+1)*sy
2000 NEXT
2010 NEXT
2020 i=0: REPEAT: dr=a+b*i+c*i^2
2030 PLOT 1000+i*sx;1000+dr*sy MARKER 5 SIZE 1 COLOUR 1
2040 i=i+1: UNTIL dr*sy>3800 OR i>=v(y,w-2)
2045 MOVE 1200;1500: PRINT "Final drive: "t2"/"t1
2046 MOVE 1200;400: PRINT n$: "dl$
2050 MOVE 5500;400: PRINT "Press c to continue."
2060 IF INKEY$<>"c" THEN 2060
2070 RETURN
2100 LABEL drag
2102 IF ad>0 AND ad<4 THEN 2270
2105 WINDOW #1 TITLE "Drag factors."
2110 CLS
2120 PRINT AT(6;2) "Overall drag is assumed to take the form"
2130 PRINT AT(6) " dr = a + bv + cv^2"
2140 PRINT AT(6) " where a,b and c are constants accounting for rol
ling and"

```

```

2150 PRINT AT(6) "driveline drag, aerodynamic drag, inertia of the"
2160 PRINT AT(6) "machine and inertia of the rotating parts.""
2170 PRINT
2180 PRINT AT(6) "For large, unfaired bikes (Z1000J, GSX1100)"
2190 PRINT AT(6) "try values of a=16, b=0 and c=0.0105      = opt
ion 1"
2195 PRINT
2200 PRINT AT(6) "For large, faired bikes (GSX-R1100)"
2210 PRINT AT(6) "try values of a=16, b=0 and c=0.0091      = opt
ion 2"
2215 PRINT
2220 PRINT AT(6) "For small, faired bikes (TZR250)"
2230 PRINT AT(6) "try values of a=16, b=0 and c=0.008      = opt
ion 3"
2235 PRINT
2240 PRINT AT(6) "Or new values can be used.                = opt
ion 4"
2250 PRINT
2260 INPUT AT(10) "Option: ",ad
2270 IF ad=1 THEN a=16 : b=0: c=0.0105
2270 IF ad=2 THEN a=16 : b=0: c=0.0091
2280 IF ad=3 THEN a=16 : b=0: c=0.008
2290 IF ad=4 THEN INPUT AT(10) "Value for a: ",a;: INPUT AT(30) "Valu
e for b: ",b;: INPUT AT(50) "Value for c: ",c
2300 CLS: GOSUB spec
2310 RETURN

2400 LABEL acc
2405 IF f(1,1)=0 THEN GOSUB calc: GOSUB drag
2410 GOSUB inpw
2420 GOSUB avg
2430 CLS: t=0: i=0: WINDOW #1 TITLE "Speed (mi/h) v Time (s)"
2440 REPEAT

2470
2480 a(i)=0.682*thr(i)/m
2490 tim(i)=1/a(i): t=t+tim(i): REM t() in seconds
2495 IF i=60 THEN t60=t
2500 i=i+1: UNTIL i-i=v(y,w-2) OR thr(i)<=0: vmax=i-1: etmax=t: j=i
-i
2510 sx=6800/t: sy=4000/(vmax+10): i=0
2515 IF etmax>38 THEN n=4 ELSE n=2
2516 IF etmax>76 THEN n=8
2520 REPEAT
2530 LINE 1000+2*i*sx;1000,1000+2*i*sx;5000
2540 MOVE 800+n*i*sx;700: PRINT n*i

```

220

```

2550 i=i+1
2560 UNTIL n*i*sx>=7000
2570 i=0
2580 REPEAT
2590 LINE 1000;1000+i*sy,8000;1000+i*sy
2600 MOVE 450;900+i*sy: PRINT i
2610 i=i+20
2620 UNTIL i*sy>=4000
2625 dist=0: et=0: et4=0: d4=0: sp=0
2627 gr=sg
2630 FOR i=0 TO vmax-1

2640 dist=dist+(tim(i)*(2*i+1)/2)/3600: et=et+tim(i)
2650 LINE 1000+et*sx;1000+i*sy,1000+(et+tim(i+1))*sx;1000+(i+1)*sy
2652
2655 IF shift(gr)=i THEN 2656 ELSE 2660
2656 LINE 1000+et*sx;1000+i*sy,1050+et*sx;820+i*sy
2657 gr=gr+1
2660 IF dist>0.23 AND et4=0 THEN GOSUB quart: PRINT d4: PLOT 1000+e
t4*sx;1000+v4*sy MARKER 2
2670 NEXT
2680 dmax=dist: IF dist>0.2494 THEN 2685
2681 REPEAT: dist=dist+(tim(i)*i)/3600: et=et+tim(i): UNTIL dist>0.2
499
2682 et4=et: v4=i-1: REM for bikes which reach max speed inside 1/4
mile

2685 dmax=ROUND(dmax,2):vmax=ROUND(vmax,1):etmax=ROUND(etmax,1):et4
=ROUND(et4,2):v4=ROUND(v4,1):t60=ROUND(t60,2)
2690 MOVE 4500;2000: PRINT "Max speed: "vmax"mi/h in "etmax"s "
2700 MOVE 6500;1750: PRINT "and "dmax" mi"
2710 MOVE 4500;1500: PRINT "SS 1/4 mi: "et4"s/"v4"mi/h"
2720 MOVE 4500;1250: PRINT "0-60mi/h: "t60"s"
2725 MOVE 900;400: PRINT n$: "d1$
2730 MOVE 5800;400: PRINT "Press c to continue."
2740 IF INKEY$<>"c" THEN 2740
2750 RETURN

2900 LABEL inpw
2910 CLS: WINDOW #1 TITLE "DIMENSIONS AND LAUNCH DATA"
2912 IF wt=0 THEN 2920
2914 PRINT AT (10) "Is the data (weight, wheelbase, etc) the same a
s before? y/n: ",
2914 REPEAT: inp$=INKEY$: UNTIL inp$>"": IF inp$="y" THEN 3007
2920 INPUT AT(10) "Weight of bike and rider, lbf: ",wt:m=wt/32.2: P
RINT

```

221

```

2930 PRINT TAB(10) "If the following data is not available,"
2940 PRINT TAB(10) "enter 0; the program will assume a typical valu
e."
2950 PRINT
2960 INPUT AT(10) "Wheelbase, inches: ",wb: IF wb=0 THEN wb=56
2970 PRINT TAB(10) "Centre of gravity co-ordinates"
2980 INPUT AT(10) "Horizontal distance from rear wheel spindle, inc
hes: ",cgx: IF cgx=0 THEN cgx=wb*0.5
2990 INPUT AT(10) "Height above ground, inches: ",cgy: IF cgy=0 THE
N cgy=2*r+3: PRINT
3000 INPUT AT(10) "Coefficient of friction, tyre/road: ",mu: IF mu=
0 THEN mu=1: PRINT
3002 PRINT AT(10)"(Note: to start in a gear other than first, alter
line 3215.): INPUT AT(10) "At what engine speed is the clutch en
gaged? ",cl: IF cl=0 THEN cl=n(0)
3003 IF cl>0 AND cl<n(0) THEN CLS: PRINT AT(10) "This is less than
the first speed value.": PRINT AT(10) "Enter 0 or a value greater t
han "n(0): GOTO 3002
3005 PRINT AT(10) "At what engine speed are gearshifts made? "
3006 INPUT AT(10) "If 0 is entered, the program will calculate opti
mum speeds. ",gs
3007 CLS: GOSUB spec
3010 RETURN

3100 LABEL avg
3105 FOR i=0 TO 220: warn(i)=0: thr(i)=0: FOR ii=1 TO y: fav(ii,i)=
0: NEXT: NEXT

3110 i=1
3120 REPEAT: j=0
3130 REPEAT
3135 FOR v=vr(i,j) TO vr(i,j+1)
3140 fav(i,v)=f(i,j)+(f(i,j+1)-f(i,j))*(v-vr(i,j))/(vr(i,j+1)-vr
(i,j))
3145
3150 NEXT
3160 j=j+1
3170 UNTIL j-1=w-2
3200 i=i+1:IF i-1=y THEN 3210
3205 IF vr(i-1,j-1)<vr(i,0)-1 THEN GOSUB slip
3210 UNTIL i-1=y:
3215 sg=1: REM gear in which start is made
3218 speed=CEILING(cl*0.00595*r/(p*g(sg)*t2/t1))
3220 FOR v=0 TO speed
3225 fav(sg,v)=fav(sg,speed): warn(v)=warn(v)+0.5
3226 IF fav(sg,v)>0.8*f(sg,i2) THEN fav(sg,v)=0.8*f(sg,i2):

```

222

```

3227 NEXT
3228 IF gs<>0 THEN GOSUB shift: GOTO 3340: REM condition for pre-ch
osen gearshift rpm.
3230 i=sg: v=0
3240 REPEAT
3250 REPEAT
3252 thr(v)=fav(i,v)
3255 GOSUB wheel
3260 thr(v)=thr(v)-(a+b*v+c*v^2)
3270 v=v+1
3275 UNTIL fav(i,v-1)<=fav(i+1,v-1) OR v-1=vr(i,w-2)
3280 shift(i)=v-1: vsh(i)=shift(i)*p*g(i)*t2/(t1*0.00595*r)
3290 i=i+1
3295 UNTIL i-1=y OR thr(v-1)<=0
3300
3310
3340 RETURN

3400 LABEL shift
3410 i=sg:v=0
3420 FOR gear=i TO y-1: shift(gear)=ROUND(gs*0.00595*r/(p*g(gear)*t
2/t1)): vsh(gear)=gs: NEXT
3430 REPEAT
3440 REPEAT
3441 IF fav(i,v)=0 THEN fav(i,v)=f(i,0): IF FRAC(warn(v))>0.5 THE
N warn(v)=warn(v)+0.5
3442 thr(v)=fav(i,v)
3445 GOSUB wheel
3450 thr(v)=thr(v)-(a+b*v+c*v^2): v=v+1
3460 UNTIL v-1=shift(i)
3470 i=i+1
3480 UNTIL i-1=y OR thr(v-1)<=0
3490 RETURN

3500 LABEL slip
3510 FOR v=vr(i-1,j-1) TO vr(i,0)-1
3520 fav(i,v)=f(i,0): warn(v)=warn(v)+0.5
3530 NEXT
3540 RETURN

3600 LABEL tyre
3610 WINDOW #2 FULL ON: CLS #2: WINDOW #2 TITLE "Tyre size and roll
ing radius": WINDOW #2 OPEN
3620 SET ZONE 19

```

223

```

3625 PRINT #2 " Rolling radius in inches ±2%, based on ETRTD standa
rd."
3630 PRINT #2: PRINT #2 " 15-inch", "17-inch", "18-inch", "18-inch"
3640 PRINT #2
3650 PRINT #2 "140/90 11.96", "2.50 10.73", "3.60 11.62", "100/
80 11.66"
3660 PRINT #2 "150/90 12.30", "2.75 11.11", "4.10 12.11", "110/
80 11.96"
3670 PRINT #2 " ", "3.00 11.38", "4.25 12.91", "120/80 12.26"
3680 PRINT #2 " 16-inch", "4.50 12.59", "4.25/85 12.46", "130/80 1
2.57"
3690 PRINT #2 " ", " ", " ", " "

3700 PRINT #2 "4.60 11.42", "100/80 11.18", "90/90 11.7", "110/7
0 11.55"
3710 PRINT #2 "100/90 11.07", "120/80 11.79", "100/90 12.04", "140/
70 12.34"
3720 PRINT #2 "110/90 11.42", " ", "110/90 12.38", "150/70 12.61"
3730 PRINT #2 "120/90 11.75", "110/90 11.90", "120/90 12.72", ""
3740 PRINT #2 "130/90 12.09", "120/90 12.24", "130/90 13.06", " "
3750 PRINT #2 "140/90 12.44", "130/90 12.59", "140/90 13.40", "170/
60 12.49"
3760 PRINT #2 "100/80 10.70", " "
3770 PRINT #2 "120/80 11.30", "140/80 12.39"
3780 PRINT #2 "150/80 12.21"
3790 PRINT #2 TAB(40) "Press c to continue."
3800 IF INKEY$ <> "c" THEN 3800
3810 WINDOW #1 OPEN
3820 RETURN

4000 LABEL pri
4050 BDSUB setup
4010 LPRINT n$, d1$: LPRINT
4020 LPRINT "Final drive "t2"/"t1: LPRINT
4030 LPRINT "speed, mi/h", "thrust, lbf": LPRINT
4040 FOR j=1 TO y
4050 FOR i=0 TO w-2
4060 LPRINT ROUND(v(j,i),1), ROUND(f(j,i),1)
4070 NEXT: LPRINT "Gear "j": " ROUND(v(j,i-1)*1000/n(i-1),1) " mi/h
per 1000rev/min": LPRINT
4080 NEXT
4090 LPRINT: LPRINT
4100 RETURN
4850 LABEL pow
4860 pmax=hp(0):tmax=t(0):i=0
4870 REPEAT: i=i+1: pmax=MAX(pmax, hp(i)): UNTIL i=w-1: i=0

```

```

4875 REPEAT: i=i+1: tmax=MAX(tmax, t(i)): UNTIL i=w-1: mmax=MAX(pmax
,tmax)
4880 sx=6500/n(w-2)
4890 sy=3800/mmax
4900 CLS: WINDOW #1 TITLE "Output (bhp and torque, lb ft) v. crank
speed, rev/min x10^3"
4910 k=1000: i=0
4920 REPEAT: LINE 1000+k*i*sx;1000,1000+k*i*sx;5000: MOVE 800+k*i*s
x;600: PRINT i: i=i+1
4930 UNTIL k*(i-1)*sx >=6500
4940 i=0: IF sy<390 THEN k=10 ELSE k=1
4950 REPEAT: LINE 1000;1000+k*i*sy,8000;1000+k*i*sy: MOVE 400;1000+
k*i*sy: PRINT i*k: i=i+1: UNTIL k*i*sy>=3900
4960 FOR i=0 TO w-3: LINE 1000+n(i)*sx;1000+hp(i)*sy,1000+n(i+1)*sx
;1000+hp(i+1)*sy: NEXT
4970 FOR i=0 TO w-3: LINE 1000+n(i)*sx;1000+t(i)*sy,1000+n(i+1)*sx;
1000+t(i+1)*sy: NEXT
4980 MOVE 1000;300: PRINT n$: "d1$
4990 MOVE 5800;300: PRINT "Press c to continue."
5000 IF INKEY$ <> "c" THEN 5000
5010 RETURN

6000 LABEL quart
6010 et4=et: v4=i: d4=dist: counter=0: ii=i
6020 REPEAT
6030 v4=v4 + 0.1: counter=counter + 1
6040 et4=et4 + 0.1/a(ii)
6050 d4=d4+ v4/(a(ii)*36000)
6060 IF counter=9 THEN counter=-1 AND ii=ii+1
6070 UNTIL d4>0.2498
6080 RETURN

6100 LABEL nam
6110 n1$="": n2$=".RL1"
6120 le=LEN(n$)
6130 FOR i=1 TO le
6140 t$=n$(i)
6150 IF ASC(t$)=32 THEN t$=""
6160 n1$=n1$+t$
6170 NEXT
6180 le=LEN(n1$)
6190 IF le>8 THEN n1$=n1$(TO 3)+n1$(-5 TO)
6195 n1$=n1$+n2$
6200 RETURN

6300 LABEL fil
6310 CLS: WINDOW #1 TITLE "Saving data on disc file"

```

```

6320 PRINT AT(10;3)"Put a formatted disc in drive B:"
6330 PRINT: PRINT AT(10)"The data will be stored in \RL\"n1$
6340 PRINT: PRINT AT(10)"To alter the filename, press A or press"
6342 PRINT AT(10) "any other key to continue."
6350 REPEAT:f1$=INKEY$: UNTIL f1$>"": IF LOWER$(f1$)="a" THEN GOSUB
  ns
6360 DRIVE "B"
6370 ON ERROR GOTO 6550
6380 CD \RL\
6390
6400 ON ERROR GOTO 0
6410
6420 IF n1$="" THEN n1$=n3$
6430 IF FIND$(n1$)>" THEN REPEAT: GOSUB rname: UNTIL FIND$(n1$)=" "
  OR r$="y"
6450 OPEN #3 OUTPUT n1$
6460 PRINT #3,n$
6462 PRINT #3,d1$
6470 PRINT #3,w,y,p,t1,t2,r,wt,wb,cgx,cgy,mu,cl,gs
6480 FOR i=1 TO y
6490 PRINT #3,g(i)
6500 NEXT
6510 FOR i=0 TO w-2
6520 PRINT #3,n(i),hp(i),t(i)
6530 NEXT
6540 CLOSE #3: GOTO 6570
6550 IF ERR=133 THEN GOSUB drctry
6560 RESUME NEXT
6570 RETURN

6600 LABEL rname
6610 PRINT
6620 PRINT AT(10)"A file "n1$" already exists."
6630 INPUT AT(10)"Do you want this file to replace it? y/n ",r$
6640 IF r$="y" THEN 6670
6650 mm=ASC(n1${-1})+1
6660 n1${-1}=CHR$(mm)
6670 RETURN

6700 LABEL drctry
6710 MD \r1\
6720 CD \r1\
6730 RETURN

6800 LABEL rea
6810 CLS: WINDOW #1 TITLE "READ DATA FROM FILE"

```

```

6820 DRIVE "B"
6830 PRINT AT(10;6)"Put the file disc into drive B:"
6840 PRINT AT(10)"Press a key when ready."
6850 IF INKEY$="" THEN 6850
6855 ON ERROR GOTO 6990
6860 CD \r1\
6870 ON ERROR GOTO 0
6880 PRINT: PRINT AT(10)"Note that file names are compressed into a
  maximum": PRINT AT(10)"of eight characters, with no spaces, and ha
  ve ": PRINT AT(10)"an extension .RLx":GOSUB look
6890 PRINT: REPEAT: INPUT "Filename for machine, or Q to quit: ",n3
  $
6895 IF n3$="q" THEN 6905
6900 IF FIND$(n3$)="" THEN PRINT "No file for "n3$
6905 UNTIL FIND$(n3$)>" OR n3$="q": IF n3$="q" THEN 7000
6910 PRINT: PRINT "Reading "n3$
6920 OPEN #3 INPUT n3$
6930 INPUT #3,n$
6932 INPUT #3,d1$
6940 INPUT #3,w,y,p,t1,t2,r,wt,wb,cgx,cgy,mu,cl,gs
6950 FOR i=1 TO y
6960 INPUT #3,g(i)
6965 NEXT
6970 FOR i=0 TO w-2
6975 INPUT #3,n(i),hp(i),t(i)
6980 NEXT
6985 CLOSE #3
6986 m=wt/32.2
6987 CLS:PRINT: PRINT AT(10)n$
6988 tim=TIME:REPEAT:UNTIL TIME>tim+500:GOTO 7020

6990 IF ERR=133 THEN PRINT AT(10)"There is no \RL\ directory on thi
  s disc."
7000 PRINT TAB(10)"Try another disc or quit? a/q ";: INPUT re$
7010 IF re$="a" THEN 6810
7020 RETURN

7100 LABEL ns
7110 PRINT "Existing filename: "n1$
7120 INPUT "New filename, including extension: ",n1$
7130 PRINT "Existing full name: "n$
7140 INPUT "New name: ",n$
7150 RETURN

7200 LABEL wheel
7210 IF thr(v)*cgy>wt*cgx THEN warn(v)= warn(v)+1: thr(v)=wt*cgx/cg

```

```

Y
7220 IF thr(v)>wt*mu THEN warn(v)=warn(v)+2: thr(v)=wt*mu
7230 RETURN

7400 LABEL warn
7405 WINDOW #1 TITLE "Gearshift and traction data"
7410 CLS
7415 sxx=6300/vmax
7420 FOR i=0 TO vmax
7430 IF INT(warn(i))=1 OR INT(warn(i))=3 THEN LINE(1500+i*sxx);1000
,(1500+(i+1)*sxx);1000 WIDTH 5 COLOUR 1
7440 IF INT(warn(i))=2 OR INT(warn(i))=3 THEN LINE(1500+i*sxx);1500
,(1500+(i+1)*sxx);1500 WIDTH 5 COLOUR 2
7450 IF FRAC(warn(i))=0.5 THEN LINE(1500+i*sxx);2000,(1500+(i+1)*sxx);2000 WIDTH 5 COLOUR 11
7460 NEXT
7470 LOCATE 1;17: PRINT "Wheelie"
7480 LOCATE 1;15: PRINT "Wheelspin"
7490 LOCATE 1;13: PRINT "Clutch slip"
7500 FOR i=0 TO vmax STEP 10
7510 LINE(1500+i*sxx);1000,(1500+i*sxx);2100
7520 MOVE (1300+i*sxx);700: IF i<vmax-15 THEN PRINT i
7530 NEXT
7540 LOCATE 10;1: PRINT "Gearshift  ", "rev/min", "mi/h"
7545 IF gs=0 THEN PRINT AT(10) "(calculated)"
7550 PRINT
7560 FOR i=i TO y-1
7570 PRINT AT(10) i" to "i+1,ROUND(vsh(i)),shift(i)
7580 NEXT
7580 PRINT AT(12;19)"Road speed, mi/h" AT(50;19) "Press any key to
continue"
7590 IF INKEY#="" THEN 7590
7600 RETURN

8000 LABEL look
8010 PRINT "Here are the files on this disc:"
8020 FILES
8030 RETURN

8100 LABEL setup
8110 LPRINT CHR$(15)
8120 LPRINT CHR$(27)+"1"+CHR$(15)
8130 LPRINT CHR$(27)+"N"+CHR$(5)
8140 RETURN
8200 LABEL spec
8202 WINDOW #2 SIZE 27,30: WINDOW #2 PLACE 400,0
8203 WINDOW #2 TITLE "CURRENT SPECIFICATION"
8210 CLS #2: PRINT #2

```

```

8220 PRINT #2 " Final drive      "t2"/"t1
8230 PRINT #2 " Primary          "ROUND(p,3)
8240 PRINT #2 " Roll radius      "r
8250 PRINT #2
8260 PRINT #2 " Wheelbase       "wb
8270 PRINT #2 " cgx - r wheel  "cgx
8280 PRINT #2 " cgy            "cgy
8290 PRINT #2 " Total weight    "wt
8300 PRINT #2 " μ              "mu
8310 PRINT #2
8320 PRINT #2 " Start gear      "sg
8330 PRINT #2 "Clutch dump rpm "cl
8340 PRINT #2
8350 PRINT #2 " Total drag"
8360 PRINT #2 " =a + bv + cv²"
8370 PRINT #2 "      a="a
8380 PRINT #2 "      b="b
8390 PRINT #2 "      c="c
8400 RETURN

```

Dieses, in BASIC 2 geschriebene Programm ist äußerst umfangreich, weil es als Hilfsmittel dazu dienen sollte, aus der Leistungskurve des Motors die entsprechende Zugkraft am Hinterrad in den verschiedenen Gängen abzuleiten. Anschließend wurden nach und nach weitere sinnvolle Berechnungen aufgenommen. Nun können Voraussagen über die Höchstgeschwindigkeit gemacht, aerodynamische Merkmale verglichen, Daten über Gewicht und Haftung der Reifen zur Berechnung der Beschleunigung herangezogen und ein Optimum bei der Wahl der Übersetzungen gefunden werden. Das Programm zeigt auch, ob ein Durchdrehen des Hinterrads oder ein Wheelie wahrscheinlich ist. Alle diese Daten können gespeichert und wieder neu eingelesen werden. Dazu sind Leistungsdaten und Motordrehzahlen sowie Einzelheiten der Übersetzung und der Reifengrößen notwendig. Aus diesen Daten berechnet das Programm ein Zugkraftdiagramm, aus dem in jedem Gang die Zugkraft bei jeder Geschwindigkeit hervorgeht. Es erstellt auch eine Grafik des gesamten Widerstands (Luftwiderstand, Rollwiderstand, Antriebswiderstand und Massenträgheitskraft). Solange das Motorrad einen Zugkraftüberschuß besitzt, hat es Leistung, um auf höhere Geschwindigkeit zu beschleunigen. Wo sich die beiden Linien schneiden, erreicht das Motorrad seine Höchstgeschwindigkeit. Falls es zu kurz übersetzt ist, erreicht es die Maximaldrehzahl im höchsten Gang, bevor es auf die Kurve des Widerstands trifft.

Daher sind aus der ersten Funktion die Auswirkungen verschiedener Übersetzungen (und Reifengrößen) ersichtlich. Die Zahlen für den Gesamtwiderstand sind empirisch ermittelt (siehe Programm Aero) und angenommen, um sie auf die gemessene Höchstleistung einer großen Anzahl von Motorrädern zu übertragen. Der Gesamtwiderstand wird in der Form angenommen:

$$\text{Gesamtwiderstand} = a + bv + cv^2 + \dots$$

wobei a, b und c Konstante (für das Motorrad) sind und v die Geschwindigkeit ist. Jegliche Werte für a, b und c können in das Programm eingegeben werden. Werte, die mit der Leistung eines ähnlichen Motorrads übereinstimmen, können verwendet werden. Falls das entsprechende Motorrad diese Leistung übersteigt, hat es offensichtlich weniger Widerstand und umgekehrt. Falls nun die Widerstandskraft von der, zur Verfügung stehenden Zugkraft abgezogen wird, bleibt die Kraft zum Beschleunigen des Motorrads übrig. Wenn das Gewicht in den Rechner eingegeben wird, kann er die Beschleunigung berechnen. Wenn außerdem die Gewichtsverteilung und der Kraftschlußbeiwert zwischen Straße und Reifen bekannt ist, kann er ermitteln, ob genügend Leistung vorhanden ist, um das Vorderrad zu heben oder das Hinterrad durchzudrehen.

Der Rechner beginnt bei null und errechnet in Kilometerschritten die zur Verfügung stehende Zugkraft und Beschleunigung in jeder Geschwindigkeit. Weiterhin berechnet er daraus die Zeit, die notwendig ist, um diese Geschwindigkeit zu erreichen und die zurückgelegte Entfernung. Würde man zum Beispiel Schritte von 500 Umdrehungen pro Minute nehmen, erschienen sie nur als ungefähre Intervalle in der Grafik. Im höchsten Gang lägen zum Beispiel Abstände von zehn Kilometern dazwischen. Der Rechner erarbeitet einen geradlinig verlaufenden Durchschnittswert von einem Punkt zum nächsten, um Zugkraftwerte in Schritten von einem Kilometer pro Stunde zu bestimmen.

Natürlich liegen dazwischen noch Abstände. Der erste Wert für die Zugkraft erscheint erst ab ungefähr fünfzig Kilometer pro Stunde, da der Rechner annimmt, daß die Kupplung schleift bis dieser Wert erreicht ist. Er nimmt einen Prozentsatz des ersten Zugkraftwerts (oder die Motordrehzahl, bei der Sie ihm Einkuppeln angeben und berechnet diesen Wert. Falls die Gewichtsverlagerung auf das Hinterrad multipliziert mit dem Kraftschlußbeiwert des Reifens die Haftung übersteigt, behandelt er diesen als Grenzwert und gibt die Warnung »Durchdrehen des Hinterrads« an. Der Kraftschlußbeiwert wird, wie der Luftwiderstand, empirisch ermittelt. 0,8 ist ein guter Wert für Straßenreifen, 1,0 oder mehr für Rennreifen bei trockener Fahrbahn.

Falls die Gewichtsverlagerung ausreicht, um das Motorrad nach hinten zu überschlagen, hält das Rechenprogramm das als Grenzwert fest und signalisiert eine Wheelie-Warnung. Im Gegensatz zu den meisten Fahrern, kann der Rechner den Motor an dem Betriebspunkt halten, an dem das Hinterrad durchzudrehen beginnt, wobei das Vorderrad ständig zwanzig Millimeter über dem Boden schwebt. Er kann dabei, falls erforderlich, sogar einen Gang wechseln. Er schaltet dann in den nächsten Gang, wenn Sie es ihm sagen oder er erarbeitet die dafür optimale Geschwindigkeit selbst. Falls er den letzten Wert im ersten Gang erreicht, oder die Zugkraft im zweiten Gang höher ist als im ersten, wechselt er den Gang. Falls zwischen den Gängen Abstände bestehen, erreicht er eine Geschwindigkeit, für die es keinen Zugkraftwert gibt (das heißt, das Leistungsband ist zu schmal oder die Gangstufen zu weit). Wenn er also zum Beispiel im ersten Gang die Maximaldrehzahl erreicht, schaltet er hoch und läßt die Kupplung schleifen, hält den Motor dabei auf konstanter Drehzahl und nimmt einen Prozentsatz des ersten Zugkraftwerts im nächsten Gang (um näherungsweise den Leistungsverlust bei schleifender Kupplung zu ermitteln). Aus den Zahlen der Beschleunigung zeichnet er eine Kurve der Geschwindigkeit über der Zeit und errechnet daraus Werte von 0 bis 100 km/h und 0 bis 400 Meter. Er erstellt die

optimalen Schaltpunkte und zeigt an, bei welcher Geschwindigkeit genügend Leistung zur Verfügung steht, um das Hinterrad durchzudrehen oder das Vorderrad anzuheben. Schließlich zeigt er an, bei welchen Geschwindigkeitsbereichen es notwendig ist, die Kupplung schleifen zu lassen.

Die Auswirkung auf Höchstgeschwindigkeit und Beschleunigung kann bei Änderung der Übersetzung, der Reifengröße, dem Kraftschlußbeiwert, dem Gewicht, der Schwerpunktlage und der Aerodynamik schnell ersehen werden. Wenn Sie mit diesen Variablen spielen, können Sie herausarbeiten, was zu tun ist, um die Leistung zu verbessern und was Zeitverschwendung ist. Wenn das Motorrad getestet wird und mehrere Daten gesammelt werden, sind die Vorhersagen genauer.

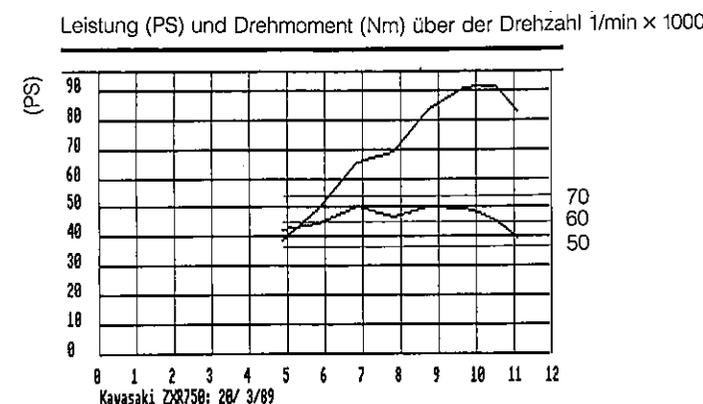


Abbildung A.5 Das Programm RL BAS erstellt aus den Leistungsangaben Leistungs- und Drehmomentkurven.

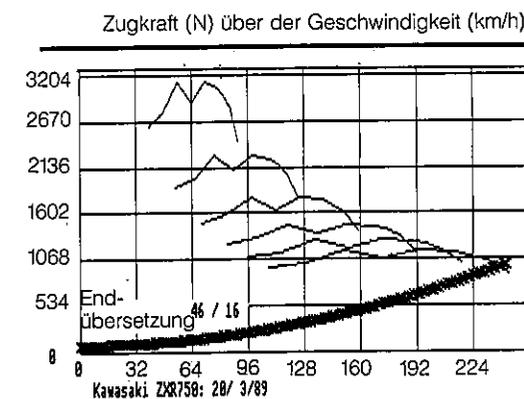


Abbildung A.6 Es erstellt Kurven, die die Zugkraft am Hinterrad wiedergeben. Die breite Linie gibt den Gesamtwiderstand an, der auf das Motorrad wirkt.

Bei einer vorher nicht getesteten 250er lag das Programm innerhalb von zwei Kilometern pro Stunde (1,2 Prozent) der Höchstgeschwindigkeit, jedoch ein ganzes Stück neben der Zeit für eine Viertelmeile, bei der der Fehler 7,4 Prozent betrug, und

zwar zum Teil weil der Fahrer den Zweitakter mit der spitzen Leistungsentfaltung schwerer im Bereich maximaler Leistung halten konnte als der Computer. Bei der Suzuki GSX-R 1100 und ihren, für Rennen modifizierten Varianten, ergaben sich eine Menge von Testdaten. Die Berechnungen lagen sehr dicht bei den Meßwerten: eine Zehnte! Sekunde auf die Viertelmeile (ein Prozent Fehler) und drei Kilometer in der Höchstgeschwindigkeit von 294 km/h (1,1 Prozent Fehler).

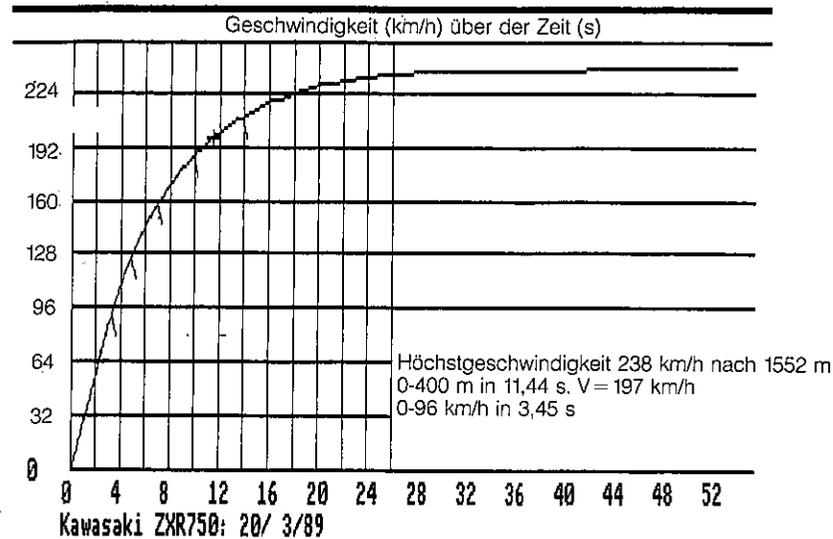


Abbildung A.7 Der Unterschied zwischen der Zugkraft und dem Widerstand (in Abbildung A.6) ist die Kraft, die zur Beschleunigung des Motorrads zur Verfügung steht. Das Rechenprogramm erstellt diese Beschleunigungskurve. Die gemessenen Fahrleistungen der ZXR 750 betragen 244 km/h Höchstgeschwindigkeit und 11,4 Sekunden/193 km/h für die Viertelmeile mit stehendem Start (Performance Bikes, Juni/1989).

Es kann im Programm eine geringe Abweichung geben, wenn die Maßstäbe für die x- und y-Achsen vor der Kurve gezeichnet werden. Die Maximalwerte der Daten werden ausgesucht und anschließend das Netz für die Skalierung erstellt, um die gesamten Abmessungen des Bildschirms auszunützen. Manchmal versucht der Rechner außerhalb des Bildschirms zu drucken, worauf er eine Fehlermeldung wie »Koordinaten außerhalb des sichtbaren Bildschirms« erstellt. Er kehrt dann zum Edit-Modus an der Stelle zurück, wo dies erfolgte. Schauen Sie auf das Fenster eins. Falls vertikale und horizontale Linien gezogen wurden, liegt der Fehler beim Maßstab der x-Achse. Gehen Sie zurück zum Ausgabemodus. Einige Linien vor der Fehler auftritt, gibt es eine Linie , die sx und sy, die Maßstabsfaktoren von x und y definiert. Falls bei der x-Achse ein Fehler auftritt, ändern Sie die Linie von sx = 7000 auf sx = 6000. Um die Maßstabswerte für die y-Achse zu ändern, müssen Sie den Wert für sy korrigieren. Um das Programm neu zu starten, ohne Daten zu verlieren, müssen Sie zu dem Befehl »Modus/Dialog-Box« und »GO TO 148 (enter)« zurückkehren. Das führt das Programm zum Hauptmenue zurück. Sie müssen das Fenster eins sichtbar machen, um das Menu zu sehen.

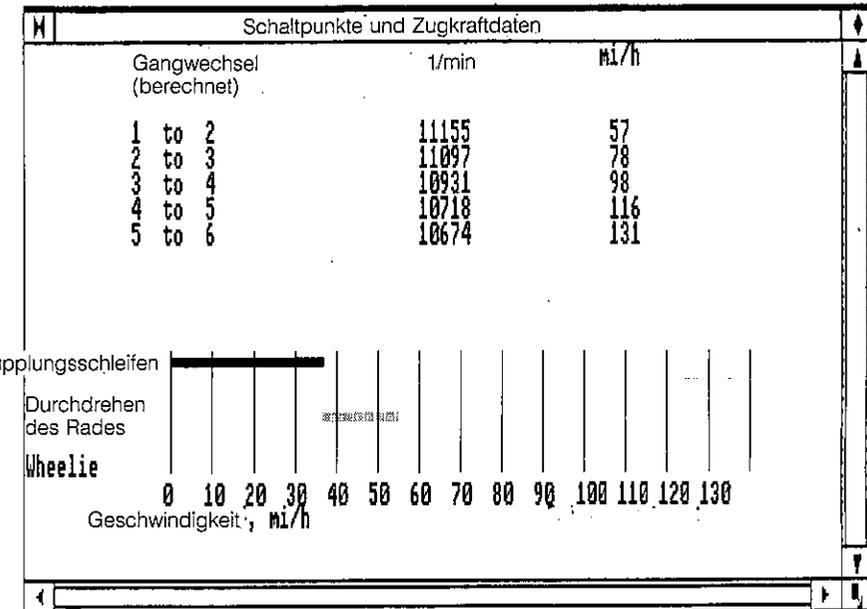


Abbildung A.8 Das Programm errechnet auch die optimalen Gangwechsel, die Geschwindigkeiten, bei denen es notwendig ist, die Kupplung schleifen zu lassen und die Grenzwerte, bei denen das Motorrad genügend Leistung hat, um das Hinterrad (61 bis 88 km/h in diesem Fall) durchzudrehen oder das Vorderrad anzuheben.

## Programm AERO

Analyse der Endgeschwindigkeit über der aufzuwendenden Leistung

```

10 REM aero
20 REM terminal speed v power required
30 REM 3/6/BB: 7/7/89
40 REM jwr
50 REM

100 x=1000: y=3: item =0: ma=1: maa=2: si=1: co=1
105 nam$="AERO.DAT"
110 OPTION DATE 1: OPTION DEGREES
120 DIM n$(x), d(x)
130 DIM v(x),p(x),w(x),wng(x), peak(x),f(x)

200 GOSUB show
202 GOSUB head
205 GOSUB inp
210 REPEAT
220 GOSUB menu
  
```

```

230 UNTIL aa>=9
235 USER ORIGIN 0;0
240 END

300 LABEL show
310 WINDOW #1 FULL
320 WINDOW #2 SIZE 25,15
330 WINDOW #2 PLACE 400,0
340 RETURN

400 LABEL menu
402 WINDOW #1 OPEN
405 CLS #2: WINDOW #2 OPEN: WINDOW #2 TITLE "Menu"
406 PRINT #2
410 PRINT #2 " Enter new data....1"
420 PRINT #2 " Display data/bhp..2"
425 PRINT #2 " /lb thrust..3"
430 PRINT #2 " Draw graphs.....4"
431 PRINT #2 " File data.....5"
433 PRINT #2 " Review data.....6"
434 PRINT #2 " Alter graph line..7"
435 PRINT #2 " Select by year....8"
436 PRINT #2 " STOP.....9"
440 PRINT #2
450 REPEAT: aa=INKEY$: UNTIL aa>-1: aa=aa-48
455 IF aa>9 OR aa<1 THEN 450
460 ON aa GOSUB inp,disp,dispf,grap,fil,rev,lin,sel
470 RETURN

500 LABEL fil
510 CLS: WINDOW #1 OPEN: WINDOW #1 TITLE "Power v. speed"
515 GOSUB dis
600 IF v(1)=0 THEN GOSUB inp
610 OPEN #y OUTPUT nam$
620 FOR i=1 TO item
630 PRINT #y,d(i),v(i),p(i),w(i),wang(i),n$(i)
660 NEXT
670 CLOSE #y

770 IF ERR=133 THEN GOSUB drctry: RESUME NEXT
780 RETURN
781 LABEL dis
782 PRINT AT(10) "Put the file disc, or a formatted disc, into
drive B:"
783 PRINT AT(10) "Press any key when ready."
784 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>"

```

```

785 PRINT
786 DRIVE "B"
787 er=0
788 ON ERROR GOTO 770
789 CD \AERO
790 ON ERROR GOTO 0
791 RETURN

800 LABEL drctry
810 MD \AERO
820 CD \AERO
830 RETURN

900 LABEL inp
910 CLS: WINDOW #1 OPEN: WINDOW #1 TITLE "Speed/power input."
920 PRINT TAB(10)"Use mi/h and bhp."
930 PRINT TAB(10)"Wind angle: headwind = 0 deg, tailwind = 180
deg"
940 PRINT: PRINT
942 PRINT TAB(10) "Do you want to create a new file"
944 PRINT TAB(10) "or read an existing file? n/e "
946 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>"": IF a$="n" THEN GOSUB cre E
LSE GOSUB rea
960 i=0
950 REPEAT: i=i+1: UNTIL v(i)=0
955 PRINT TAB(10)i-1" entries read from disc file. "
956 PRINT TAB(10)"Do you want to add any more? y/n"
957 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>"": IF a$="n" THEN CLS: PRINT
AT(10) "Now use MENU >>>>": GOTO 959
958 GOSUB wri
959 RETURN

960 LABEL wri
962 CLS
965 REPEAT
970 INPUT "Model: ",n$(i)
980 INPUT "Model year (last two digits only): ",d(i): IF d(i)>
1000 THEN d(i)=d(i)-1900
990 INPUT "Maximum speed: ",v(i)
1000 INPUT "Power: ",p(i)
1010 INPUT "Wind speed: ",w(i)
1020 INPUT "Wind direction: ",wang(i): PRINT
1030 i=i+1
1040 PRINT "Another entry? y/n "
1050 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>"
1060 UNTIL a$="n"

```

```

1065 item=i-1
1066 PRINT TAB(10) "To file the new data, use menu option 5"
1067 PRINT: PRINT TAB(10) "Press any key to continue."
1068 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>" "
1070 RETURN

1100 LABEL rea
REM drive b:/ insert disc/ cd \aero\ /read file into array
1110 CLS #2: WINDOW #2 OPEN: WINDOW #2 TITLE "Read disc file"
1120 PRINT #2
1130 PRINT #2 " Put the file disc "
1140 PRINT #2 " into drive B:": PRINT
1150 PRINT #2 " Press any key when ready"
1160 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>" "
1170 DRIVE "B"
1175 ON ERROR GOTO 1300
1180 CD \AERO
1190 ON ERROR GOTO 0
1192 PRINT #2 "File name?"
1193 PRINT #2 "...defaults to AERO.DAT"
1194 PRINT #2 "if you press ENTER": INPUT #2 nam$: IF nam$=""
THEN nam$="AERO.DAT"
1200 PRINT #2 " Reading "nam$
1210 OPEN #y INPUT nam$
1220 i=item
1230 WHILE NOT(EOF(#y))
1240 i=i+1
1250 INPUT #y,d(i),v(i),p(i),w(i),wang(i),n$(i)
1260 WEND
1270 CLOSE #y
1275 item=i
1280 GOTO 1330

1300 IF ERR=133 THEN PRINT #2 "No AERO directory": PRINT #2 "o
n this disc.": PRINT #2 "Try another disc ": PRINT #2 "or quit
? a/q"
1310 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>" ": IF a$="a" THEN CLS #2: GO
TO 1120
1320 CLOSE
1330 RETURN

1400 LABEL disp
1410 CLS #1: WINDOW #1 OPEN
1420 WINDOW #1 TITLE "AERO.BAS"
1425 unit$="p"
1430 IF v(1)=0 THEN GOSUB rea

```

```

1435 IF aa=2 THEN GOSUB clean
1440 i=0:vmax=0: pmax=0: REPEAT: i=i+1
1450 IF v(i)>vmax THEN vmax=v(i)
1460 IF p(i)>pmax THEN pmax=p(i)
1470 UNTIL v(i)=0
1480 sx=7000/(1.1#pmax)
1490 sy=4000/(1.1#vmax)
1500 USER ORIGIN 1000;1000
1505 IF vmax<120 THEN k=10 ELSE k=20
1510 FOR j=0 TO vmax STEP k
1520 LINE 0;j#sy,7000;j#sy
1530 MOVE -500;j#sy-70: PRINT j
1540 NEXT
1545 IF pmax<100 THEN k=10 ELSE k=20
1550 FOR j=0 TO pmax STEP k
1560 LINE j#sx;0,j#sx;4000
1570 MOVE j#sx-250;-400: PRINT j
1580 NEXT
1590 MOVE -1000;3500: PRINT "mi/h": IF aa>3 THEN 1600
1595 FOR j=1 TO 4: PLOT 50;4000-j#300 MARKER j+1:MOVE 150;4000
-j#300: PRINT 75+j#300-"77+j#300 model": NEXT
1600 MOVE 0;-700: PRINT "bhp"
1610 IF aa>3 THEN GOSUB yr
1620 FOR j=1 TO i-1
1625 IF aa>3 THEN m=maa: GOTO 1665
1630 IF d(j)<=80 THEN m=2
1640 IF d(j)>80 AND d(j)<84 THEN m=3
1650 IF d(j)>83 AND d(j)<87 THEN m=4
1660 IF d(j)>86 THEN m=5
1665 IF peak(j)=1 THEN 1680
1670 PLOT p(j)#sx;v(j)#sy MARKER m
1680 NEXT
1685
1690
1695 RETURN

1700 LABEL grap
1701 CLS #2: WINDOW #2 OPEN
1703 WINDOW #2 TITLE "Drag factors"
1705 PRINT #2 "Do you want to use"
1706 PRINT #2 "bhp or lbf thrust? b/t"
1710 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>" ": IF a$="b" THEN GOSUB grap
a: GOTO 1900
1715 GOSUB dispf: WINDOW #2 OPEN: CLS #2
1720 PRINT #2
1730 PRINT #2 " Overall drag is ": REM this is calculated in
1740 PRINT #2 " assumed to take": REM lbf thrust, not bhp

```

```

1750 PRINT #2 " the form:"
1760 PRINT #2 " drag = a + bv + cv2"
1770 PRINT #2
1780 PRINT #2 "Options used in RL:"
1790 PRINT #2 "1. a=16, b=0, c=0.0105"
1800 PRINT #2 "2. a=16, b=0, c=0.0091"
1810 PRINT #2 "3. a=16, b=0, c=0.0080"
1820 PRINT #2 "4. new values"
1830 PRINT #2 " Option? ..."
1840 REPEAT: z=INKEY: UNTIL z>-1: z=z-48
1850 IF z=1 THEN a=16 : b=0 : c=0.0105
1860 IF z=2 THEN a=16 : b=0 : c=0.0091
1870 IF z=3 THEN a=16 : b=0 : c=0.0080
1880 IF z=4 THEN INPUT #2 "a = ",a: INPUT #2 "b = ",b: INPUT #
2 "c = ",c
1890 GOSUB draw
1895 PRINT #2 "Another line? y/n"
1896 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>" "
1897 IF a$="y" THEN PRINT #2 " Option? ...": GOTO 1840
1900 RETURN

2000 LABEL dispf
2050 CLS #1: WINDOW #1 OPEN: WINDOW #1 TITLE "AERO.BAS"
2010 IF v(1)=0 THEN GOSUB rea
2015 IF aa=3 THEN GOSUB clean
2020 fmax=0: unit$="f"
2030 FOR i=1 TO item
2040 f(i)=p(i)*375/v(i)
2050 IF f(i)>fmax THEN fmax=f(i): IF v(i)>vmax THEN vmax=v(i)
2060 NEXT
2070 sfx=7000/(fmax)
2080 sy=4000/(1.1*vmax)
2090 USER ORIGIN 1000;1000
3000 IF vmax<120 THEN k=10 ELSE k=20
3010 FOR j=0 TO vmax STEP k
3020 LINE 0;j*sy,6700;j*sy
3030 MOVE -400;j*sy-70: PRINT POINTS(8) j
3040 NEXT
3045 IF fmax<100 THEN k=10 ELSE k=20
3050 FOR j=0 TO fmax STEP k
3060 LINE j*sfx;0,j*sfx;3700
3070 MOVE j*sfx-200;-350: PRINT POINTS(8) j
3080 NEXT
3090 MOVE -1000;3500: PRINT "mi/h": IF aa>3 THEN 3100
3095 FOR j=1 TO 4: PLOT 50;4000-j*300 MARKER j+1:MOVE 150;4000
-j*300: PRINT 75+j*3"-77+j*3" model": NEXT
3100 MOVE 0;-700: PRINT "ibf"

```

```

3110 IF aa>3 THEN GOSUB yr
3120 FOR j=1 TO item
3125 IF aa>3 THEN m=maa: GOTO 3165
3130 IF d(j)<=80 THEN m=2
3140 IF d(j)>80 AND d(j)<84 THEN m=3
3150 IF d(j)>83 AND d(j)<87 THEN m=4
3160 IF d(j)>86 THEN m=5
3165 IF peak(j)=1 THEN 3180
3170 PLOT f(j)*sfx;v(j)*sy MARKER m
3180 NEXT
3185
3190
3200 RETURN

3300 LABEL grapa
3320 PRINT #2: GOSUB disp: WINDOW #2 OPEN: unit$="p": CLS #2
3330 PRINT #2 " Overall drag hp is "
3340 PRINT #2 " assumed to take"
3350 PRINT #2 " the form:"
3360 PRINT #2 " drag = av + bv2 + cvv2"
3370 PRINT #2
3380 PRINT #2 "Options used in RL:"
3390 PRINT #2 "a = 0.0427, b=0 and"
3300 PRINT #2 "opt 1: c = 279 x 10-7"
3310 PRINT #2 "opt 2: c = 242 x 10-7"
3315 PRINT #2 "opt 3: c = 213 x 10-7"
3320 PRINT #2 "opt 4: new values"
3330 REPEAT: PRINT #2 " Option? ..."
3340 REPEAT: z=INKEY: UNTIL z>-1: z=z-48
3350 IF z=1 THEN a=0.0427 : b=0 : c=0.0000279
3360 IF z=2 THEN a=0.0427: b=0 : c=0.0000242
3370 IF z=3 THEN a=0.0427 : b=0 : c=0.0000213
3380 IF z=4 THEN INPUT #2 "a = ",a: INPUT #2 "b = ",b: INPUT #
2 "c = ",c
3385 GOSUB draw
3386 PRINT #2 "Another line? y/n":REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>
""
3387 UNTIL a$="n"
3390 RETURN

3400 LABEL draw
3410 IF unit$="f" THEN xmax=fmax ELSE xmax=pmax
3420 IF unit$="f" THEN sxx=sfx ELSE sxx=sx
3430 i=0: REPEAT
3440 IF unit$="f" THEN p=a+b*i+c*i2 ELSE p=a*i+b*i2+c*i3
3450 PLOT p*sxx;i*sy MARKER ma SIZE si COLOUR co
3460 i=i+1

```

```

3470 UNTIL p>vmax OR i>vmax
3475 MOVE 4000;1200: IF unit$="f" THEN PRINT"drag = a + bv + c
v^2" ELSE PRINT "drag hp = av + bv^2 + cv^3"
3476 MOVE 4000;900: PRINT "where: a = "a
3477 MOVE 4000;600: PRINT "      b = "b
3478 MOVE 4000;300: PRINT "      c = "c
3480 RETURN

```

```

3500 LABEL rev
3510 CLS #1: WINDOW #1 OPEN: WINDOW #1 TITLE "AERO.BAS"
3520 IF v(1)=0 THEN GOSUB rea
3522 SET ZONE 9
3525 PRINT " ", "model", "year", "max mi/h", "max bhp", "wind v/θ

```

```

3530 FOR i=0 TO item
3540 PRINT i,n$(i),d(i),v(i),p(i),w(i)"/"wang(i)
3550 GOSUB wait
3560 NEXT
3570 PRINT: PRINT "Do you wish to alter any of these? y/n"
3580 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>" "
3590 IF a$="y" THEN GOSUB alt
3600 RETURN

```

```

3700 LABEL alt
3705 REPEAT
3710 PRINT : INPUT "Enter the item number: ",q
3720 PRINT "Current model is "n$(q),: INPUT "New model: ",n$(q)
)
3730 PRINT "Current year is ",d(q),: INPUT "New year: ",d(q)
3740 PRINT "Current speed is ",v(q),: INPUT "New speed: ",v(q)
3750 PRINT "Current power is ",p(q),: INPUT "New power: ",p(q)
3760 PRINT "Current wind speed is ",w(q),: INPUT "New wind spe
ed: ",w(q)
3770 PRINT "Current wind direction is ",wang(q),: INPUT "New d
irection (0=head): ",wang(q)
3780 PRINT: PRINT TAB(10)"Another? y/n"
3790 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>" "

```

```

3800 UNTIL a$="n"
3810 RETURN

```

```

3900 LABEL wait
3910 IF ww>0 THEN ww=ww+1: GOTO 3970
3920 yy=VPOS
3930 IF yy>750 THEN 3980
3940 PRINT AT(10;20) "Press SPACE bar to continue.;"
3950 IF INKEY$<>" " THEN 3950

```

240

```

3960 ww=1: PRINT AT(10;20)"
3970 IF ww=13 THEN ww=0: PRINT: GOTO 3940
3980 RETURN

```

```

4000 LABEL lin
4010 CLS #1: WINDOW #1 OPEN
4020 PRINT AT(10;4)"To alter the thickness and colour "
4030 PRINT AT(10)"of the drag line on the graph:"
4040 PRINT
4050 INPUT AT(10)"Default size is 1. New size: ",si
4060 INPUT AT(10)"Default colour is 1. New colour: ",co
4070 INPUT AT(10)"Default marker is 1. New marker: ",ma
4075 PRINT: PRINT AT(10)"Markers for individual models:"
4076 INPUT AT(10)"Default marker is 2. New marker: ",maa
4080 RETURN

```

```

4100 LABEL head
4110 CLS
4120 WINDOW #1 OPEN
4130 PRINT AT(30;5) COLOUR(10) POINTS(20) MODE(4) " aero
"
4140 PRINT AT(30) COLOUR(10) POINTS(16) ADJUST(16) MODE(1) " p
ower v. drag "
4150 PRINT AT(30) COLOUR(10) POINTS(10) MODE(4) "
"

```

```

4160 PRINT AT(30) COLOUR(10) POINTS(8) MODE(4) " J 1988 J
ohn Robinson "
4170 PRINT AT(35;16) COLOUR(10) POINTS(10) MODE(3) "Press a ke
y."
4180 i=-1 : j=1
4190 REPEAT: j=j+1
4200 ELLIPSE 4340;2500,2000,1.2 WIDTH 5 COLOUR 1+j
4210 UNTIL INKEY$>-1
4220 RETURN

```

```

4300 LABEL sel
4310 CLS
4320 IF v(1)=0 THEN GOSUB rea
4330 GOSUB clean
4340 INPUT "Time period: from model year (last two digits only
): ",yr1
4350 INPUT "... to model year: ",yr2
4360 FOR j=0 TO item
4370 IF d(j)<yr1 THEN peak(j)=1
4375 IF d(j)>yr2 THEN peak(j)=1
4380 NEXT

```

241

```

4390 PRINT: PRINT "Do you want to use power (bhp) or thrust (l
b4) ? p/t"
4400 REPEAT: a$=INKEY$: UNTIL a$>" "
4410 CLS
4420 IF a$="p" THEN GOSUB disp ELSE GOSUB dispf
4430
4440 RETURN

```

```

4500 LABEL clean
4510 FOR j=0 TO item: peak(j)=0: NEXT
4520 RETURN

```

```

4600 LABEL yr
4610 MOVE 150;3700
4620 IF yr1<yr2 THEN PRINT "Model year "yr1" to "yr2
4630 IF yr1=yr2 THEN PRINT "Model year "yr1" "
4640 RETURN

```

```

4700 LABEL cre
4710 GOSUB dis
4720 INPUT "What is the file name? ", nam$
4730 i=0
4740 GOSUB wri
4750 RETURN

```

Dieses BASIC 2-Programm speichert die Daten in einer Datei. Es nimmt die Höchstgeschwindigkeit und die Leistung, die der Motor bei der entsprechenden Geschwindigkeit hat, auf. Es können auch Zahlen für Windgeschwindigkeit und Richtung verarbeitet werden. Die Information ist mit dem Modell-Namen des Motorrads und dem Modelljahr gespeichert. Es druckt dann alle Punkte in einer Grafik aus, und zwar entweder als Leistung in PS oder als Zugkraft am Hinterrad (in Newton) über der Geschwindigkeit (km/h).

Es kann Motorräder verschiedener Jahre auswählen oder Punkte verschiedener Messungen aus verschiedenen Jahren zusammenstellen.

Da BASIC 2 mit MS-DOS kompatibel ist, können die Dateien angegeben, sortiert und unter Verwendung von MS-DOS-Befehlen wiederbearbeitet werden. Alle GSX, GSX-R 750 und 1100 Modelle können zum Beispiel aus der Hauptdatei herausgezogen und in einer Datei mit dem Namen GSX-Dat, unter Verwendung des Befehls, kopiert werden:

```
FIND "gsxx" aero.dat > gsx.dat
```

Daraus kann eine Grafik erstellt werden, die die Entwicklung der ganzen Suzuki-Vierzylinder-Sportmotorräder zeigt. Es gibt ein kleines Problem, weil das FIND-Programm eine freie Linie zieht, der sich die Titel-Linie anschließt, die Sie ihr geben, während das Basic-Programm versucht, diese beiden überflüssigen Linien als Daten zu lesen. Daher müssen die beiden ersten Linien herausgenommen werden. Einige

Textverarbeiter verwenden Programme wie zum Beispiel EDLIN, andere wie RPED setzen einen End-of-File-Marker, worauf das Basic-Programm eine Fehlermeldung wie EDF MET angibt und den Rest der Datei nicht lesen kann.

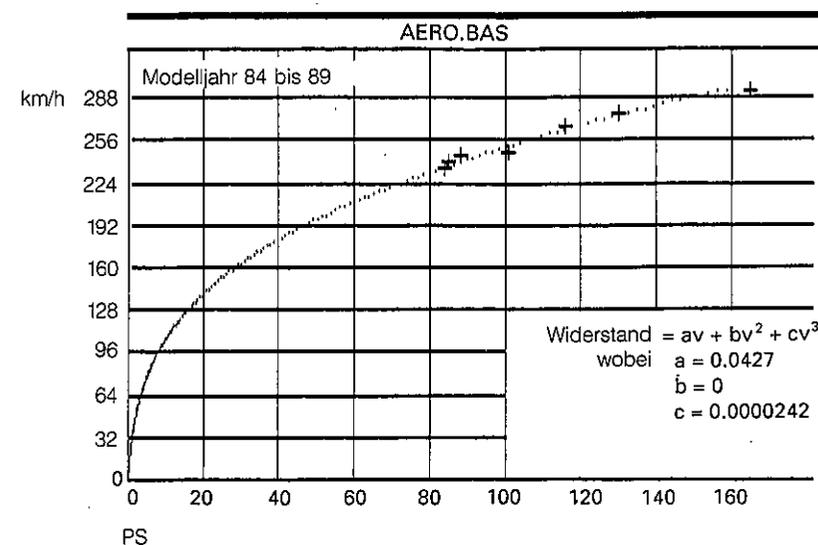


Abbildung A.9 (a)

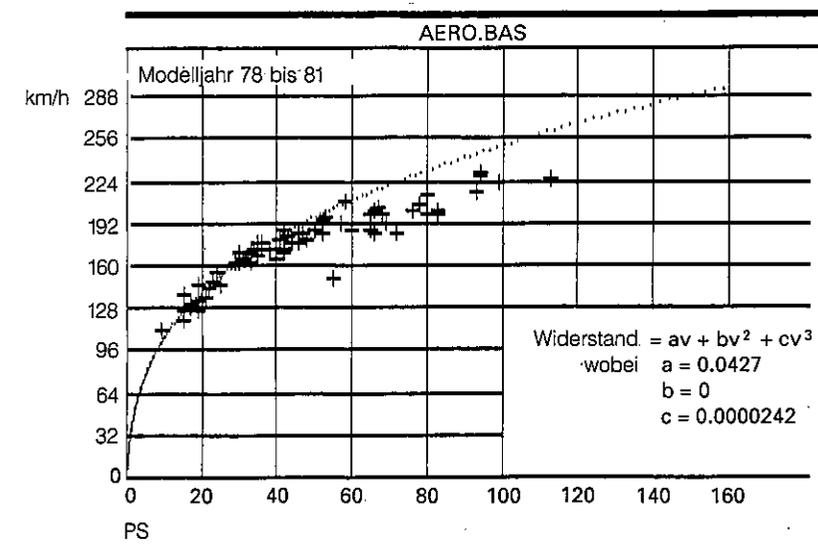


Abbildung A.9 (b)



Figure A.9 (c)

**Abbildung A.9 (a)** Bei Anwendung des Programms AERO.BAS kann für unterschiedliche Motorräder die Höchstgeschwindigkeit über der Motorleistung ausgedruckt werden. Es gibt sieben Varianten der Suzuki GSX-R-Modelle wieder. Das Zeichenprogramm ermöglicht es, Kurven mit der gemessenen Leistung in Übereinklang zu bringen. Diese hier stimmen sehr gut mit den Suzuki-Kurven überein.

**(b)** Die Kurve, die von einer Suzuki GSX-R stammt, kann auf eine Auswahl anderer Modelle übertragen werden, um die aerodynamischen oder Gesamtwiderstandsmerkmale zu vergleichen. Sie zeigt eine Auswahl von Motorrädern von 1978 bis 1981 und demonstriert eindeutig die Verbesserungen, die zwischen der damaligen Zeit und der Entwicklung der GSX-R gemacht wurden.

**(c)** Suzuki's GSX R-Modelle mit Standard- und getunten Motoren liefern eine Anzahl von Leistungskurven bei einem nahezu konstanten Betrag des Gesamtwiderstands.

Je mehr Punkte es gibt, um so klarer zeigt sich ein Trend. Um so einfacher ist es auch, moderne Maschinen mit ihren Vorgängern oder mit Maschinen aus anderen Jahren zu vergleichen. Das Programm bietet auch ein Zeichenprogramm an, das die Kurven auf Grafiken überträgt, die bereits ausgedruckt wurden.

Diese Kurven geben den Gesamtwiderstand (Luftwiderstand, Rollwiderstand, Triebwerkswiderstand und das Massenträgheitsmoment der rotierenden Teile) in der Form wieder:

$$\text{Gesamtwiderstand} = a + bv + cv^2$$

$$\text{oder Widerstand hp} = av + bv^2 + cv^3$$

wobei beliebige Werte für a, b und c eingesetzt werden können. Auf diese Weise ist es möglich, eine Kurve zu finden, die sehr eng mit der gemessenen Leistung übereinstimmt. Diese Kurve kann dann für Vergleichszwecke herangezogen oder in einem anderen Programm wie dem RL oben verwendet werden.

## Programm: Bremskraft

Dieses Programm basiert auf einem AS-EASY-AS genannten Programm, das für IBM-PCs entwickelt wurde und mit MS-DOS betriebenen Computern kompatibel ist. Es wurde von Trius Inc. erarbeitet und in England über Shareware Marketing vertrieben.

Das Programm basiert auf einem Netz mit vertikalen Spalten, die alphabetisch (a,b,c) und horizontalen Reihen, die numerisch (1,2,3,..) von der oberen linken Ecke aus aufgebaut sind, so daß das Feld, das in der vierten Spalte und der dritten Reihe steht, d3 ist.

Jedes Feld kann enthalten:

1. einen von Ihnen festgelegten Eingabewert
2. eine Bezeichnung (ein Wort, das auf dem Bildschirm erscheint), das am Anfang durch ein Ausrufungszeichen identifiziert wird.
3. einen Wert, der zum Beispiel eine Zahl ist, oder mit plus oder minus beginnt, oder eine Formel, die mit A beginnt.

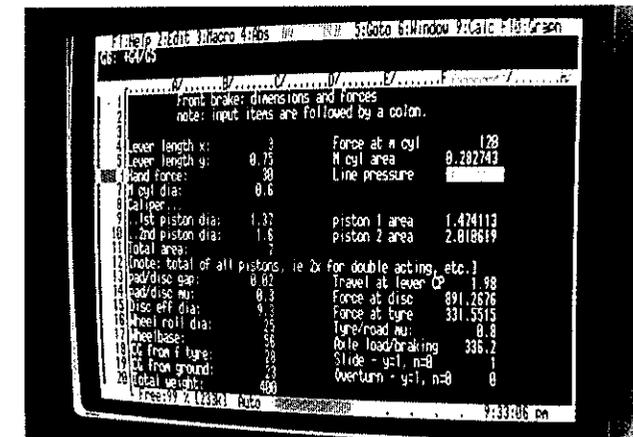


Abbildung A.10 Das Programm, das Bremskräfte berechnet.

Falls das Feld g6 den Ausdruck g4/g5 enthält, dann steht in diesem Feld das Ergebnis aus der Division der beiden Inhalte von Feld g4 durch Feld g5.

Das Programm enthält das Netz, das die Tabelle A.2 zeigt.

Das Programm zeigt sofort die gesamten Auswirkungen jeder Änderung, von der Erhöhung der Handkraft bis zur Änderung der Größe der Hydraulikzylinder oder der Radgröße selbst. Es zeigt nicht die Auswirkungen der Gewichtsverlagerung oder den Betrag der Einfederung der Radaufhängung auf, die dadurch verursacht wird. Das kann aber von Hand durch die Änderung der Höhe der Schwerpunktslage eingege-

ben werden. Tatsächlich wird dieses Programm am häufigsten angewendet, um die optimale Höhe des Schwerpunkts zu berechnen, so daß die Vorderradaufhängung und ein Anti-Dive-System entsprechend ausgelegt werden können.

**Tabelle A.2** Programm zur Berechnung von Bremskräften.

	Spalte	a	c	e	g
1					
2		"TITLE SPACE			
3					
4	'Lever length x	INPUT VALUE	'Force at m cyl	c6*c4/c5	
5	'Lever length y	INPUT VALUE	'M cyl area	@PI*c7^2/4 <sup>1</sup>	
6	'Hand force	INPUT VALUE	'Line pressure	g4/g5	
7	'M cyl dia	INPUT VALUE			
8	'Caliper ...				
9	'...1st piston dia	INPUT VALUE	'Piston 1 area	@PI*c9^2/4	
10	'...2nd piston dia	INPUT VALUE	'Piston 2 area	@PI*c10^2/4	
11	'Total area	INPUT VALUE <sup>2</sup>			
12					
13	'Pad/disc gap	INPUT VALUE	'Travel at lever <sup>3</sup>	@ROUND (c13*c11*c4/c5/g5,2)	
14	'Pad/disc μ	INPUT VALUE	'Force at disc	g4*c11*c14/g5	
15	'Disc eff dia	INPUT VALUE	'Force at tyre	g14*c15/c16	
16	'Wheel roll dia	INPUT VALUE	'Tyre μ	INPUT VALUE	
17	'Wheelbase	INPUT VALUE	'Axle load	@ROUND ((c20 * (c17 -c18) + G15*c19)/c17, 1)	
18	'CG from f spindle	INPUT VALUE	'Slide y = 1 n = 0	@IF(g15 >g16*g17, 1, 0) <sup>4</sup>	
19	'CG from ground	INPUT VALUE	'Overturn y = 1 n = 0	@IF(g17*g16 *c19>c20*c18, 1, 0)	
20	'Total weight	INPUT VALUE			

Bemerkungen:

1. PI ist π oder 3,14159
2. Die gesamte Kolbenfläche hängt vom Typ der Bremszange ab. Sie beträgt in der Regel (erste Kolbenfläche × 2) + (zweite Kolbenfläche × 2)
3. ROUND (x,n) bedeutet – drucken Sie den Wert für x bis n in Dezimalstellen
4. IF (test, a, b) bedeutet, falls der Test richtig ist, wiederholen Sie die Werte für a, im anderen Fall für b.

## Luftdurchsatz des Motors

Ein 750er-Viertakter, der mit 10 000 Umdrehungen pro Minute läuft, saugt nominal jede Minute 3750 Liter Luft (oder 62,5 Liter pro Sekunde) an. Die Verhältnisse in der Luftbox oder in der Umgebung der Vergasereinlässe müssen darauf ausgelegt sein. Wenn die Luftfilterbox oder die Verkleidung des Motorrads Einschränkungen bewirken, fällt der Luftdruck am Einlaß, was sich auf die Gemischzusammensetzung auswirkt (und dazu neigt, das Gemisch anzureichern). Der Luftdurchsatz des Motors sinkt, die Leistung nimmt ab. Es ist möglich, die Gemischzusammensetzung zu korrigieren, indem die Schwimmerkammern aus demselben Raum belüftet werden, aus dem der Motor seine Luft bezieht. Es ist aber anzustreben, daß in erster Linie der benötigte Gasdurchsatz nicht eingeschränkt wird.

Wenn sich Gas mit hoher Geschwindigkeit fortbewegt, verliert es an Druckenergie, um den Anstieg an kinetischer Energie auszugleichen (Bernoulli'sche Gleichung). Die Luft, die an den Seiten des Motorrads vorbeiströmt, erscheint daher so, als ob sie einen geringeren Druck hat als die statische Luft. Daher strömt sie im Bereich unter dem Tank nach außen, was dem Motor nicht zugute kommt.

Luftleinlässe an der Front des Motorrads in einer Hochdruckzone können die Luft direkt der Luftfilterbox zuführen oder in die Nähe der Luftfilterbox leiten (das erste würde eine Veränderung der Gemischzusammensetzung bewirken, da die Geschwindigkeit zunimmt). Dadurch kann der Luftdurchsatz, den der Motor braucht, gewährleistet und der Luftdruck bei hohen Geschwindigkeiten sogar angehoben werden. Der beste Beweis dafür ist die Ducati 851 mit Kit, die im Serienzustand 86 PS leistet, bei Entfernung der Luftfilterbox 97 PS. Daraus ergibt sich, daß die Luftfilterbox oder die kleinen, nach vorn gerichteten Lufteinlässe stark begrenzend wirken (bei einer Ducati ist ein Umbau in diesem Bereich wegen der Weber-Einspritz-Düsen leicht auszuführen, weil die Einspritzung die Änderung automatisch kompensiert). Mit der ordnungsgemäß angebrachten Luftfilterbox würde das Motorrad 256 Kilometer pro Stunde erreichen, was bei der Größe und Form der Ducati normalerweise mehr als 100 PS erfordert.

Die benötigte Luftmenge kann mithilfe der Kraftstoffmenge bei verschiedenen Motordrehzahlen erarbeitet werden. Falls der Motor ein Masseverhältnis des Luft/Kraftstoffgemischs von zwölf oder dreizehn zu eins benötigt, beträgt die Masse der Luft das Dreizehnfache des Kraftstoffs.

Die Menge der angesaugten Luft hängt von der Geschwindigkeit und der effektiven Fläche der Lufteinlässe ab, die etwas kleiner als die geometrische Fläche ist, falls die Zuleitung nicht geradlinig verläuft und glatte Übergänge hat (siehe Kapitel 7).

Falls die effektive Fläche A (m<sup>2</sup>) die Geschwindigkeit v (m/s) und die Luftdichte d (kg/m<sup>3</sup>) ist, beträgt der Massenstrom der angesaugten Luft m (kg/s):

$$m = Avd$$

Nimmt man eine Luftdichte von 1,29 kg/m<sup>3</sup>, und eine bestimmte Luftmenge pro Leistungseinheit für verschiedene Geschwindigkeiten an, dann ist die benötigte Fläche der Lufteinlässe, wie in Tabelle A.1 gezeigt. Eine Spalte gibt die vom Motor bei Höchstgeschwindigkeit, die andere bei einer Geschwindigkeit von 30,5 Meter pro

Sekunde benötigte Luftmenge an. Falls der Luftereinlaß größer als benötigt ist, addiert er sich zum Luftwiderstand des Motorrads. Falls im Luftereinlaß bei hohen Geschwindigkeiten Überdruck in der Luftfilterbox entsteht, sollten die Schwimmmerkammern der Vergaser gemeinsam mit der Luftfilterbox belüftet sein und die Gemischzusammensetzung bei verschiedenen Geschwindigkeiten überprüft werden.

**Tabelle A.1** Luftmenge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

maximale Geschwindigkeit	Luftdurchsatz	Querschnitt für eine Luftversorgung bei maximaler Geschwindigkeit	Querschnitt für benötigte Luftmenge bei einer Geschwindigkeit von 30,5 m/s
m/s	kg/h	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>
53,6	191	7,61	13,55
60,4	272	9,68	19,35
67,1	381	12,26	27,09
73,8	463	13,48	32,90
78,3	545	14,96	38,70

## Thermoelemente

In einem geschlossenen Kreislauf, der von zwei unterschiedlichen Metallen gebildet wird, fließt ein geringer Strom, wenn die Verbindung verschiedenen Temperaturen unterliegt. Dieser Strom (und die Spannung, die notwendig ist) hängt von dem Temperaturunterschied zwischen den Verbindungen und den beiden Metallen ab. Ein Millivoltmeter, das mit einem der Werkstoffe verbunden ist, kann so geeicht werden,



**Abbildung A.11** Thermoelemente. Das Analogmeßgerät wird von VDO hergestellt. Es hat eine Silberverbindung, die mit einer Beilagscheibe verlötet ist und unter der Zündkerze montiert wird. Das digitale Instrument, von Digitron hergestellt, hat Thermoelemente, von denen eines in einen Entlüftungsnippel eingeschraubt ist, so daß die Temperatur der Bremsflüssigkeit in der Bremszange registriert werden kann.

daß die Temperatur in Grad abzulesen ist (in der Regel dadurch, daß man die Verbindung in einen Behälter mit Eiswasser und anschließend in kochendes Wasser hält), indem man ein Thermometer oder den Siedepunkt des Wasser von hundert Grad Celsius benützt.

Fertige Thermoelemente können für verschiedene Anwendungen und mit einer Vielfalt von Temperaturfühlern gekauft werden. Kupfer-Konstantan-Thermoelemente werden für Temperaturen bis 600, Eisen-Konstantan für Temperaturen bis 900 Grad Celsius verwendet. Tabelle A.3 zeigt das thermo-elektrische Potential verschiedener Werkstoffe, die Platin als Basis benützen (die exakten Werte hängen von den Legierungsbestandteilen des Werkstoffs ab).

**Tabelle A.3** Thermoelemente

Die Spannung, die in einer Verbindung von Metallen bei jedem Grad Celsius Unterschied zwischen den beiden erzeugt wird.

Werkstoff	Potential (mV/°C) (Durchschnittswerte)
Nickel-Chrom	+ 0,022
Eisen	+ 0,0188
Stahl	+ 0,0077
Kupfer	+ 0,0075
Zinn	+ 0,0044
Blei	+ 0,0042
Aluminium	+ 0,0039
Platin	0
Nickel	-0,016
Konstantan	-0,033

Je tiefer die Werkstoffe in dieser Skala angeordnet sind, um so größer ist die Auswirkung, was die häufige Verwendung von Konstantan erklärt.

## Stichwortverzeichnis

- A**  
ABS 122  
Aerodynamik 125  
aerodynamische Optimierung 125  
aktive Radaufhängung 70  
Ansaugluft 130  
Anti-Blockier-Bremsen 122  
Anti-Dive 83, 113  
Anti-Squat 84, 206  
Argon-Schweißen 180  
Auffangbehälter 158  
auflaufender Backen 123  
Auftrieb 146  
Ausfedern 207  
Ausgleichsgewichte 54  
Auslauftests 136  
Auspuffhalterung 169  
Autogenschweißen 178
- B**  
Batterie 160  
Befestigung 166  
Bernoulli 70  
Beschleunigung 24, 84, 136, 191, 207  
Biegemoment 75  
Bimota 151  
– Tesi 79  
Bleche 174  
Block 67  
Bodenwellen 57  
Boge 73  
Brems-  
– belag 107  
– flüssigkeit 98  
– hebel 92  
– kraft 92  
– leitung 100, 156  
– moment 112, 116  
– trommel 122, 156  
– zange 99, 102  
Bremsen 89  
– auflaufende 123  
– DOT-Bremsflüssigkeit 98  
– Hauptbremszylinder 95  
– Keramikrückplatten 108
- Lüftspiel 97  
– Naßbremsverhalten 108  
– SAE-Bremsflüssigkeit 98  
– Schwimmsattel 99  
– Sintermetallbremsbeläge 108  
– Vierkolben-Festsattel 102  
– Wärmeübergang 102  
Bremsen 89  
– Antiblockier- 122  
– entlüften 99  
– fading 108  
– faktor 124  
– prüfstand 109, 196  
– reibung 103  
– rückhofedern 102  
– schleifen 102  
– selbstverstärkende 124  
– tauchen 83, 113  
– test 108, 195  
– verglasen 109  
– werkstoff 108  
Bremsscheiben 110  
– gebohrte 111  
– geschlitzte 114  
– Kohlefaser- 115  
– radius 112  
– schwimmend gelagerte 110  
– Seitenschlag 102  
– temperatur 110  
– werkstoff 113  
Brückenrahmen 152
- D**  
Data-Logging 188  
De Carbon 61  
Delphinverkleidung 128  
Detailoptimierung 141  
Diagonalgürtel 42  
Diagonallagen 42  
Dichtungen 73  
Distanzscheiben 170  
Drahtstärke 159  
Dreiecksverbund 148  
Driften 14  
Druckstufendämpfung 60, 70, 207  
Druckzentrum 147, 208  
Ducati-851 Kit 247
- Durchdrehen 24, 84  
Durchschlagen 208
- E**  
Einfederkraft 67  
Einfederung 208  
Einlaß 131  
– kanal 131, 145  
Elastizitätsmodul 150  
elektrische Ausrüstung 158  
Elf 79  
Entwicklungsprogramm 215  
Ergonomie 171
- F**  
Fahrwerksdetails 154  
Fahrwerksoptimierung 200  
Feder 66  
– progressive 67  
– Schrauben- 66  
– verformung 67  
– vorspannung 64  
– weg 67  
Federrate 67, 208  
– progressive 67  
– zweifache 67  
Felgenbreite 36  
Flattern 16, 208  
Fournales 72  
Frontfläche 138, 208  
Fußraste 164
- G**  
Gabelbrücken 21  
– einstellbare 21  
– versatz 208  
Gasfedern 67  
Geometrie 24  
Geschwindigkeit 186  
Geschwindigkeitsgradient 126  
Geschwindigkeitsmessungen 186  
Gewicht 22  
Gewichtsverlagerung 209  
Gewichtsverteilung 22  
Gieren 139, 210  
Giermoment 139  
Gitterrohrrahmen 148
- Glasfaser 175  
Godier-Genoud 151  
Grenzschicht 126  
Gummifedern 69
- H**  
Haftung 25  
Hartlöten 178  
Hebelumlenkung 74  
Höchstgeschwindigkeit 134  
Honda-Pro Link 80  
hydraulisches System 96
- I**  
Instabilität 15  
Instrumente 165
- K**  
Kabelbaum 160  
Karkasslagen 37  
Kawasaki  
– Uni-Trak 82  
– ZXR 750 231  
Kayaba 72  
Ketten 49  
– abmessungen 50  
– antrieb 49  
– flucht 48, 157  
– kraft 51  
– linie 48  
– radabmessungen 50  
– schmiermittel 50  
– spannung 49  
Kevlar 175  
kinetische Energie 89  
Kohlefaser 175  
Kondensator 162  
Koni 72  
Korrosion 158  
Kraftstoffdurchfluß 168  
Kraftstofftank 167  
Kreiselkräfte 54  
Kühl-  
– luft 131, 145  
– lufteinlaß 131  
– system 157  
– Wirkungsgrad 145

Kunststoffe 174  
Kurbelgehäuseentlüftung 157  
Kurvenfahrt 9, 14

## L

Lagen 37  
Lager 28, 167  
lastabhängige Radaufhängung 65  
Lastspitzen 149, 178  
Leitz 194  
Leistungsmessungen 185  
Leistungstest 185  
Lenk-  
– kraft 44  
– moment 33  
– winkel 33, 210  
Lenker 165  
– anschlag 16  
– schwingungen 16  
Lenkkopfwinkel 32, 212  
Lenkungs-  
– dämpfer 29  
– Massenträgheitsmoment 16, 30  
– Reaktion 11, 33  
– Stabilität 16  
Lichtbogenschweißen 179  
Lichtmaschine 158  
Löten 178  
Luft-  
– dichte 125, 247  
– druck 190  
– durchsatz 247  
– einlaß 130, 145  
– filterbox 145  
– geschwindigkeit 126, 189  
– menge 130  
– unterstützte Federn 68  
– verluste 130  
– widerstand 125  
– widerstandsbeiwert  $c_w$  125, 210

## M

MAG-Schweißen 179  
Manometer 190  
Masse 210  
– gefederte 59  
– ungefederte 58

Massenträgheitskraft 25, 59  
Massenträgheitsmoment 48, 52  
MIG-Schweißen 179  
Monocoque 150  
Motormontage 162  
Muttern 162

## N

Nachlauf 31, 210  
Nehmerzylinder 96  
Nicken 210  
Niederpumpen 73  
Nivomat 73  
Norton 151

## O

Öhlins 72  
Öl 73  
Ölstand 20  
Offenstadt 78

## P

Pendeln 16, 210  
Profil 150  
Pro-Flex 72  
Pro-Squat 121, 211

## R

Rad-  
– flucht 27  
– lager 27, 53  
– stand 211  
– wuchtung 54  
Radar 187  
Radaufhängung 56  
Radiallagen 42  
Räder 52, 170  
– Ersatzfederrate 208  
– Massenträgheitsmoment 48, 52  
– Umfangsgeschwindigkeit 129  
– Werkstoffe 52  
Rahmen 148  
Rechenprogramm 215  
Reibungskoeffizient 211  
Reibwert 211  
Reifen 35  
– aufstandsfläche 41

– druck 36, 169  
– gürtel 37  
– gröÙe 37  
– mischungen 38, 45  
– profil 45  
– querschnitt 37  
– rollwiderstand 134  
– rutschen 8  
– schlupf 13, 44  
– schräglaufwinkel 13, 44  
– seitenwand 35  
– seitenwandsteifigkeit 35  
– verformung 43  
– verschleiß 45  
– weiche Mischungen 46  
Relais 159  
Rollen 211  
Rollradius 22  
Rollwiderstand 134  
Ruckdämpfer 53  
Rückmeldung 15  
Rückstellmoment 41

## S

SAE-Einteilung 71  
Schmiermittel 166  
– Kette 167  
– Radlager 167  
Schnellverschlüsse 162  
Schräglage 12, 36  
Schrauben 162  
Schweißen 178  
– Elektrode 179  
– Schutzgas 179  
Schwerpunkt 24, 211  
Schwinge 75  
Schwingenlänge 32  
Schwingungen 169  
Seitenschlag 155  
Seitenwind 139, 147  
Showa 63  
Sicherungsdraht 166  
Sicherungsmuttern 166  
Sitz-  
– höhe 31, 204  
– position 33, 172  
Speichenräder 52

Spondon 152  
Squat 212  
Stabilität 212  
Stauraohr 189  
Steifigkeit 149  
Steuerkopfwinkel 212  
Stoßdämpfer-  
– fading 200  
– geschwindigkeit 70  
– geschwindigkeitsabhängiger 70  
– mechanismus 60  
– nachlassen 200  
– öl 71  
– verstellung 73  
– weg 70  
Strömungsverluste in Leitungen 130  
Stromlinie 139  
Stuckern 212  
Sturz 213  
Sturzseitenkraft 213  
Suzuki  
– Full Floater 85  
– GSX-R 244

## T

Tank 167  
Teleskopgabel 75  
Testen 185  
Thermoelement 248  
Torsionsstab 67  
Turbulenzen 127

## U

Übersetzung 51  
Übersteuern 14, 213  
Untersteuern 213  
Upside-Down-Gabel 87

## V

Verkabelung 158  
Verkleidung 171  
Verschlüsse 162  
Vierkantprofile 150  
Viskosität 73  
Vorspannung 213  
– Feder 64  
– Lager 170

## W

Wärmebehandlung 152  
 Wärmeschild 155  
 Werkstoffe 181  
 Wheelie 84  
 White Power 72  
 Widerstand 125  
 – beiwerte 125, 135, 193  
 – kraft 125, 192  
 – Luft- 125  
 WIG-Schweißen 180  
 Windkanal 134  
 Winkelhebel 74, 80  
 Wolfädentest 191  
 Wuchten 55

– dynamisch 55

## Y

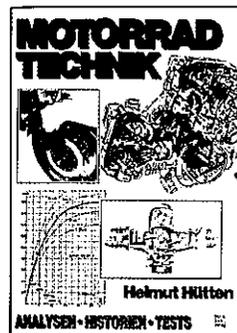
Yamaha  
 – FZR 151  
 – Monocross 81  
 – RD 153  
 – TZ 153

## Z

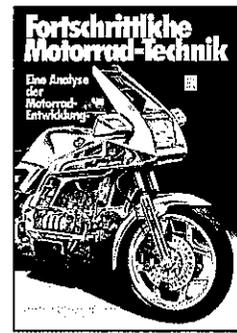
Zenerdiode 162  
 Zentrifugalkraft 12, 213  
 Zentripedalkraft 12, 213  
 Zündung 160, 165  
 Zugstufendämpfung 70

# RAD und TAT

## Motorradtechnik in Theorie und Praxis



Helmut Hütten  
**Motorrad-Technik –  
 Analysen und Tests**  
 Dieses Standardwerk  
 beschreibt die neuesten  
 Entwicklungen im Motor-  
 radbau, mit Fahrberichten  
 und Vergleichstests.  
 430 Seiten, 476 Abb., geb.  
 56,- Bestell-Nr. 01175



Helmut Werner Bönsch  
**Fortschrittliche  
 Motorradtechnik**  
 Der aktuelle Trend im  
 Motorradbau: Fahrwerk,  
 Vergaser, Zündung, Kupp-  
 lung, Getriebe usw.  
 286 Seiten, 402 Abb., geb.,  
 48,- Bestell-Nr. 01054



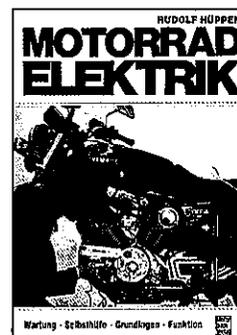
Paul Klaver  
**Das Motorrad  
 und seine Technik**  
 Alles über Mehrventilmoto-  
 ren, Verbrennung, Schmie-  
 rung, Bremsen, Wartung.  
 Das aktuelle Wissen.  
 160 Seiten, 120 Abb., geb.  
 32,- Bestell-Nr. 01320



John Thorpe  
**Motorrad-  
 Reparatur-Handbuch**  
 Professionelle Anleitungen  
 zur Selbsthilfe.  
 228 Seiten, 197 Farb-Abb.  
 36,- Bestell-Nr. 10916



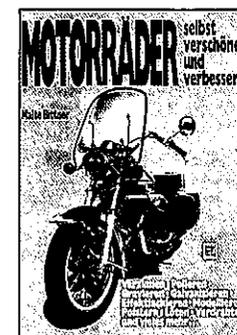
Foale / Willoughby  
**Motorrad-Fahrwerk heute**  
 Grundlagen der modernen  
 Fahrwerkskonstruktionen:  
 Detailliert und umfassend  
 wird hier vermittelt, wie  
 man Fahrwerke entwirft,  
 baut, abstimmt und testet.  
 Mit einer Fülle von an-  
 schaulichen Fotos und  
 Zeichnungen.  
 184 Seiten, 203 Abb., geb.  
 36,- Bestell-Nr. 01226



Rudolf Hüppen  
**Motorrad-Elektrik**  
 Das praktische Handbuch  
 für alle Motorradfahrer,  
 die bislang von der Elek-  
 trik wenig Ahnung hatten:  
 was sie auf alle Fälle wissen  
 sollten wird hier genau  
 beschrieben.  
 228 Seiten, 162 Abb., geb.,  
 33,- Bestell-Nr. 10169



Malte Bittner  
**Ich baue  
 mein Motorrad um**  
 34 Könnner haben den  
 Traum von ihrem Wunsch-  
 Motorrad verwirklicht,  
 erzählen von ihren Erfahrun-  
 gen und geben Anregun-  
 gen für perfekte Umbau-  
 ten von der Enduro bis  
 zum Superbike.  
 120 Seiten, 109 Abb., geb.  
 34,- Bestell-Nr. 01098



Malte Bittner  
**Motorräder  
 selbst verschönern  
 und verbessern**  
 Das Custom-Bike im Eigen-  
 bau? Hier bietet ein Profi  
 die Ideen ebenso wie deren  
 praktische Ausführung.  
 258 Seiten, 257 Abb., davon  
 15 farbig, gebunden  
 44,- Bestell-Nr. 01115

**RUND UM'S  
MOTORRAD SIND WIR  
DIE GRÖSSTEN!**

**MOTORRAD**

Europas größte Motorrad-Zeitschrift

**14 TÄGLICH SAMSTAGS  
IM ZEITSCHRIFTENHANDEL.**