

Umfangskraftverhalten von Pkw-Reifen bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen

Von Rolf Gnadler, Hans-Joachim Unrau, Hartmut Fischlein und Michael Frey

Die Realisierung und Weiterentwicklung geeigneter Regelstrategien für elektronische Systeme (wie zum Beispiel Antriebs-, Brems- oder Fahrdynamikregelsysteme) setzt die genaue Kenntnis des Umfangskraftübertragungsverhaltens zwischen Reifen und Fahrbahn voraus, das durch μ -Schlupf-Kurven beschrieben werden kann. Da es bisher aussagefähige Meßergebnisse von relevanten Reifen-Fahrbahn-Kombinationen nicht in ausreichendem Umfang gab, wurde das Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (TH) von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) beauftragt, das Kraftschlußverhalten in Umfangsrichtung für eine repräsentative Auswahl verschiedener Reifentypen bei den unterschiedlichsten Fahrbahnzuständen zu untersuchen.

1 Einleitung

Durch die Fortschritte in der Elektronik ist es möglich geworden, die Autofahrer beim Führen eines Fahrzeugs durch Regelsysteme zu unterstützen und damit die aktive Sicherheit der Automobile und letztlich des Straßenverkehrs zu verbessern.

Hinweise zur Verbesserung der Systemfunktionen und des Komforts moderner Regelsysteme lassen sich aber nur ableiten, wenn das Reifenverhalten bei verschiedenen Reifen-Fahrbahnkombinationen genau bekannt ist. Zwar gab es bisher schon Veröffentlichungen, in denen das Verhalten von Reifen auf speziellen Fahrbahnoberflächen untersucht wurde, aber noch nie wurden die gleichen Reifentypen systematisch auf den unterschiedlichsten Fahrbahnzuständen (trocken, feucht, naß, vereist) im Hinblick auf ihr Umfangskraftverhalten untersucht, vor allem nicht im Bereich niedriger Fahrgeschwindigkeiten.

Die Durchführung eines derartigen Forschungsvorhabens, dessen Bearbeitung

aufgrund der großen Zahl von Parametervarianten mehrere Monate in Anspruch nimmt, ist nur möglich, wenn eine Prüfeinrichtung eingesetzt wird, die eine hohe Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit gewährleistet. Der Reifen-Innentrommel-Prüfstand der Universität Karlsruhe (TH) erfüllt diese Voraussetzungen und garantiert auch realistische Randbedingungen, da als Fahrbahnoberfläche Asphaltbeläge eingesetzt werden, die in ihrer Beschaffenheit üblichen Straßenoberflächen entsprechen. Aus diesem Grund wurde der Prüfstand von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. für die erforderlichen Untersuchungen ausgewählt, die durch den FAT-Arbeitskreis 20 „Fahrdynamik“ begleitet und betreut wurden.

2 Der Reifen-Innentrommel-Prüfstand der Universität Karlsruhe (TH)

Wie aus Bild 1 ersichtlich ist, läuft der Reifen bei diesem Prüfstand, durch eine entsprechende Radaufhängung geführt, auf der Innenseite einer zylindrischen

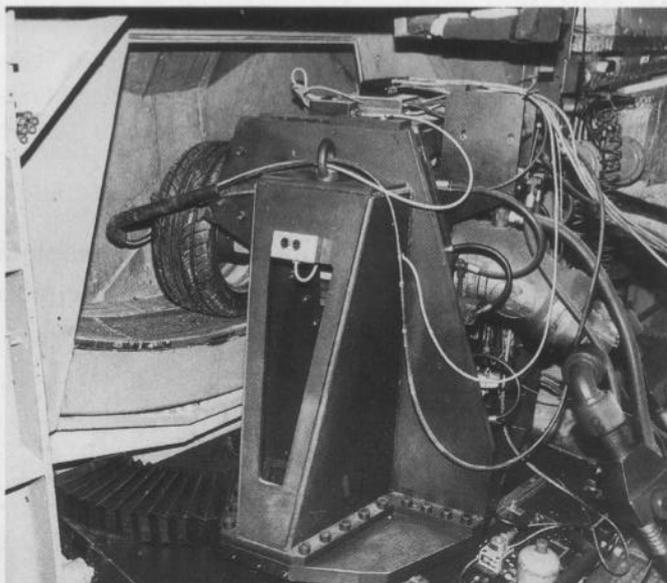


Bild 1: Der Reifen-Innentrommel-Prüfstand der Universität Karlsruhe (TH)

Fig. 1: The inside drum tyre testing device of the University of Karlsruhe (TH)

Trommel mit 3,8 m Durchmesser. Dieser relativ große Durchmesser hat den Vorteil, daß die Eigenschaften von Reifen in Pkw-Dimensionen durch die Trommelkrümmung fast nicht beeinflußt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, daß es möglich ist, auf der Innenseite der Trommel einen sehr gleichmäßigen Wasserfilm aufzubauen, so daß der Einfluß der Nässe auf den Kraftschluß der Reifen untersucht werden kann. Des weiteren sind Messungen auf vereister Fahrbahn möglich, da die gesamte Trommel mit einer im Prüfstand integrierten Kältemaschine auf 40 °C unter Umgebungstemperatur abgekühlt werden kann.

Die Einstellung der Radlast, des Schräglauf- und des Sturzwinkels erfolgt mit Hilfe von hydraulischen Regeleinrichtungen. Bei Umfangskraftmessungen wird das Prüfrad mit einem Hydraulikmotor angetrieben oder gebremst. Dadurch erhält man – im Gegensatz zum Betrieb einer Prüfeinrichtung mit mechanischer Reibungsbremse – stabile Meßpunkte der Antriebs- und Bremskraft auch bei Schlupfwerten, die größer sind als der Schlupf bei maximaler Umfangskraft.

Die am Rad angreifenden Kräfte und Momente werden mit einer Sechs-Komponenten-Meßnabe gemessen, die zwischen Rad und Radlagerung angeordnet ist und deren Meßsystem mit Raddrehzahl mitrotiert. Dadurch werden nur die am Rad angreifenden Kräfte und Momente ohne Beeinflussung durch die Antriebswelle gemessen, wobei die störende Radlagerreibung eliminiert wird.

3 Reifen- und Parametervariationen

Um abschätzen zu können, wie stark sich unterschiedliche Reifenvarianten hinsichtlich ihres μ -Schlupf-Verhaltens unterscheiden, wurden für die Untersuchungen sechs Reifen ausgewählt, mit denen das Spektrum heute eingesetzter Reifen abgedeckt werden kann. So reicht die Bandbreite der untersuchten Reifen von einem Standardwinterreifen über einen rollwiderstandsarmen All-Season-Reifen bis zu einem extrem sportlich ausgelegten Niederquerschnitts-Sommerreifen mit lauffrichtungsgebundenem Profil. Somit ist sichergestellt, daß die meisten übrigen auf dem Markt angebotenen Reifen dem ermittelten Kennlinienbereich zugeordnet werden können. Im einzelnen wurden die in **Tabelle 1** aufgelisteten Reifen untersucht.

Bei der Festlegung des Meßprogramms wurde darauf geachtet, den Einfluß der wichtigsten Betriebsparameter innerhalb praxisrelevanter Bereiche zu untersuchen. **Bild 2** gibt einen Überblick darüber, welche Parametervariationen im Rahmen des Forschungsvorhabens im einzelnen durchgeführt wurden.

Tabelle 1: Die untersuchten Reifen
Table 1: The explored tyres

Reifen Nr.	Bezeichnung		Felge
1	All-Season-Reifen	185/70 R 14 S	6 x 14
2	Sommerreifen	195/65 R 15 V	6,5 x 15
3	Sommerreifen	225/50 ZR 16	7 x 16
4	Winterreifen	175 R 14 Q	6 x 14
5	Winterreifen	195/65 R 15 T	6,5 x 15
6	Winterreifen	225/50 R 16 H	7 x 16

Während auf vereister Fahrbahn die Temperatur variiert wurde, wurde sie auf trockener, feuchter und nasser Fahrbahn konstant gehalten. Sie betrug auf trockener Fahrbahn 22 °C, auf feuchter und nasser Fahrbahn 17 °C.

Der eingesetzte reale Asphaltbelag entspricht im Aufbau der ZTV bit StB 84 (siehe [1]). Für die Versuche wurde eine 0/8-Körnung verwendet. Der SRT-Wert (Skid-Resistance-Tester, englisches Pendelgerät) betrug 58 ± 2 , die mit der Sandflächenmethode ermittelte Rauhtiefe 0,6 mm. Auf die Auswirkung unterschiedlicher SRT-

Werte und die Sandflächenmethode wird in Kapitel 4.3.1 eingegangen.

4 Meßergebnisse

Für das Forschungsvorhaben (siehe [2]) wurden insgesamt etwa 1500 Kennlinien ermittelt. In diesem Beitrag wird eine Auswahl von interessanten Ergebnissen veröffentlicht. Dabei ist jeweils der Umfangskraftbeiwert μ über dem Schlupf s aufgezeichnet. Der Umfangskraftbeiwert wird aus der Umfangskraft und der Rad-

Longitudinal Force Behaviour of Passenger Car Tyres at Different Road Conditions

by Rolf Gnadler, Hans-Joachim Unrau, Hartmut Fischlein and Michael Frey

In the context of a research project initiated by the Forschungsgemeinschaft Automobiltechnik e. V. (FAT) longitudinal force-slip-curves for six representative tyre types were measured for different road surface conditions (dry, humid, wet, icy) at the inside drum tyre testing device of the University of Karlsruhe (TH), where real asphalt surface elements are being used and defined surface conditions, such as water depth and ice temperature, can be produced.

With the help of this project a kind of catalogue could be established, which summarizes the parameter influence on the longitudinal force behaviour of representative tyres.

For dry surfaces, the velocity has little impact on the initial gradient of the curves, but influences the maximum value and the curve for larger slip values, as can be seen in fig. 4. A lower tread depth leads to an increase in the gradient (fig. 5) and snow tyres show a significantly lower gradient than summer tyres (fig. 7).

When going from a dry to a humid surface, it can be noted that the maximum longitudinal force coefficient decreases significantly (fig. 9), while the initial gradient only decreases for large velocities and water depths.

For icy surface it was found that the maximum longitudinal force coefficient and the form of the curves depend largely on the velocity and the temperature (fig. 11 and 12).

New insights were found on the influence of the skid resistance at wet and humid surface on the longitudinal force behaviour (fig. 8), even though further research on this aspect will be necessary.

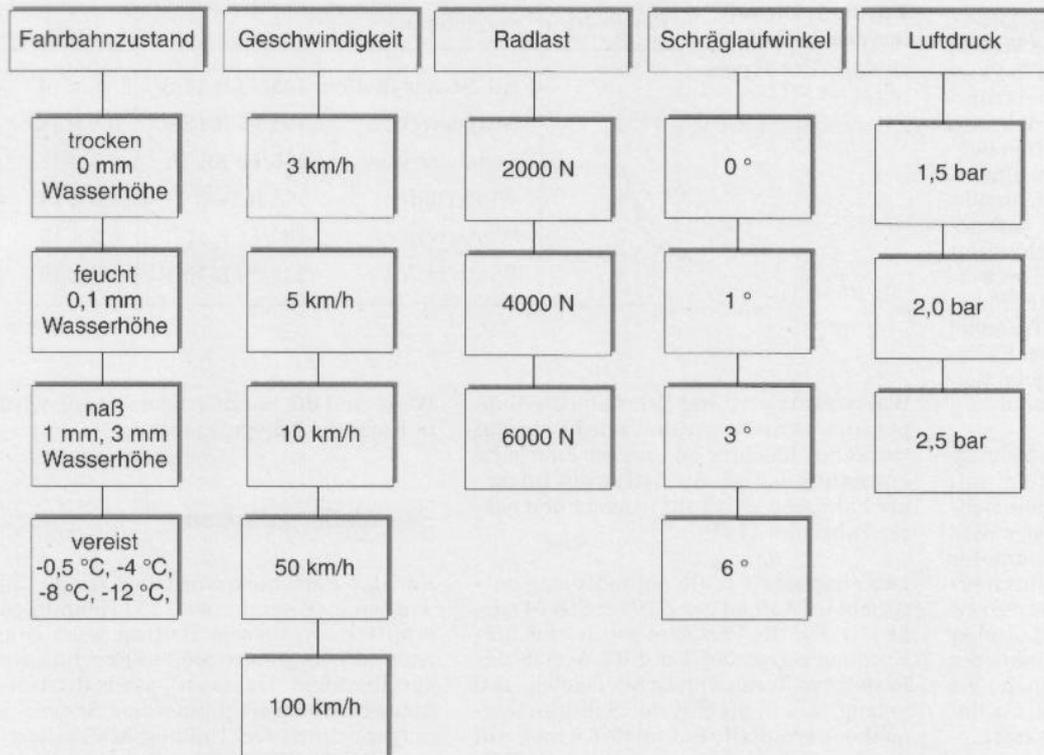


Bild 2: Übersicht über das Meßprogramm

Fig. 2: Survey on the measuring program

last gemäß Gl.(1) gebildet. Für die Schlupfberechnung wird auf der Antriebs- und Bremsseite die Definition gemäß Gl.(2) verwendet.

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (1)$$

worin μ = Umfangskraftbeiwert
 F_x = Umfangskraft
 F_z = Radlast

$$s = \frac{r_{dyn} \cdot \omega_R - v_F}{v_F} \quad (2)$$

worin s = Schlupf
 r_{dyn} = dynamischer Rollhalbmesser
 ω_R = Raddrehwinkelgeschwindigkeit
 v_F = Fahrgeschwindigkeit

4.1 Variationsbreite der maximalen Umfangskraftbeiwerte

Bevor auf die Auswirkung der einzelnen Parametervariationen eingegangen wird, soll zunächst die Variationsbreite der maximalen Umfangskraftbeiwerte aufgezeigt werden, die durch die verschiedenen Fahrbahnzustände erreicht wurde.

Durch die Fahrbahnzustände trocken, feucht, naß und vereist wurden die Reifen bei maximalen Umfangskraftbeiwerten von etwa 1,2 bis hinunter zu Werten nahe Null untersucht. **Bild 3** zeigt beispielhaft die μ -Schlupf-Kurven für Reifen 5 bei verschiedenen Fahrbahnzuständen bei 100 km/h. Auf trockener Fahrbahn werden bei Reifen 5 maximale Reibwerte von etwa 1,1 erreicht. Schon eine Wasserhöhe von nur 0,1 mm (feuchte Fahrbahn) bewirkt, daß nur noch Maximalwerte von

zirka 0,8 möglich sind (siehe Kapitel 4.3.2). Da die Profilhöhe bei den auf nasser Fahrbahn untersuchten Reifen dem Neuzustand entspricht, ist die Differenz zwischen der 0,1 mm-Kurve und der 1 mm-Kurve relativ gering. Bei 3 mm Wasserhöhe kann die vorliegende Wassermenge dagegen nicht mehr problemlos verdrängt werden, was sich dadurch zeigt, daß die entsprechende μ -Schlupf-Kurve deutlich tiefer ist. Die niedrigsten Reibwerte werden auf Spiegeleis erreicht, wobei sich hier die Eisoberflächentemperatur extrem auswirkt. Bei Temperaturen nahe 0 °C werden nur noch minimale Umfangskräfte übertragen.

Ein auffälliges Merkmal der in Bild 3 dargestellten Kurven ist, daß die Anfangssteigung im linearen Bereich bis auf eine Ausnahme nahezu gleich ist. Lediglich bei 3 mm Wasserhöhe wird der Anstieg der Kurve im linearen Bereich merklich beeinflusst. Dieses auffällige Verhalten wird in Kapitel 4.3.2 näher erläutert.

4.2 Messungen auf trockener Fahrbahn

4.2.1 Einfluß der Fahrgeschwindigkeit

In **Bild 4** ist beispielhaft für Reifen 2 der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die μ -Schlupf-Kurven dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die übertragbaren Antriebskräfte unabhängig vom Reifen größer sind als die übertragbaren Bremskräfte. Die Anfangssteigungen der Kurven sind sehr ähnlich, was darauf zurückzuführen ist, daß in diesem Bereich im wesentlichen nur Formänderungsschlupf vorliegt. Hier spielt, bei konstantem Luftdruck und konstanter Radlast, fast ausschließlich die Laufstreifenelastizität in

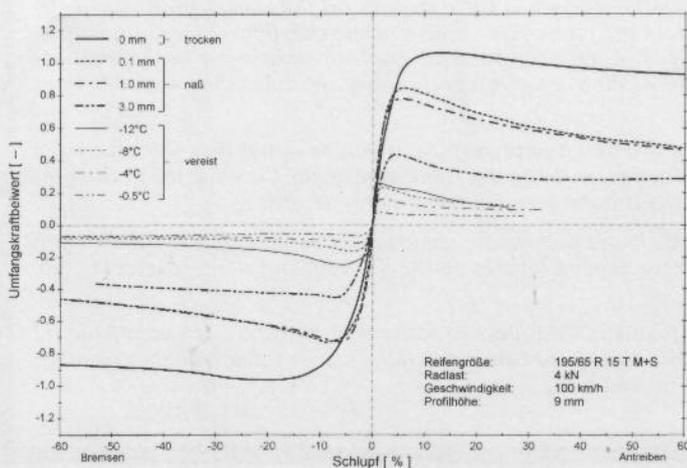


Bild 3: μ -Schlupf-Kurven für Reifen 5 bei verschiedenen Fahrbahnzuständen

Fig. 3: μ -slip-curves of tyre 5 for different track surface conditions

Reifengröße: 195/65 R 15 T M+S
 Radlast: 4 kN
 Geschwindigkeit: 100 km/h
 Profilhöhe: 9 mm

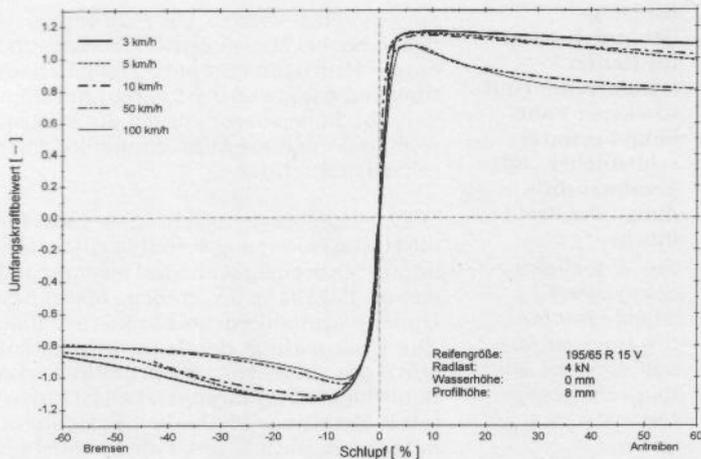


Bild 4: μ -Schlupf-Kurven für Reifen 2 auf trockener Fahrbahn bei verschiedenen Geschwindigkeiten

Fig. 4: μ -slip-curves of tyre 2 for dry track surface and different velocities

Reifengröße: 195/65 R 15 V
Radlast: 4 kN
Wasserhöhe: 0 mm
Profilhöhe: 8 mm

Längsrichtung eine Rolle. Die Maximalwerte der Kurven nehmen mit zunehmender Geschwindigkeit leicht ab, wobei sich die Lage des Maximums bezüglich der Schlupfachse zu kleineren Werten hin verschiebt. Bei der Erklärung dieses Effektes ist zu beachten, daß sich im Maximalbereich der Kurven dem Formänderungsschlupf bereits Gleitschlupf überlagert. Die größten Umfangskräfte können bei einer optimalen, sehr niedrigen Gleitgeschwindigkeit übertragen werden (siehe [3]). Diese optimale Gleitgeschwindigkeit wird aufgrund der Schlupfdefinition bei höheren Fahrgeschwindigkeiten bereits bei niedrigeren Schlupfwerten erreicht als bei geringeren Fahrgeschwindigkeiten, wodurch sich die Verschiebung des Maximums erklärt.

Mit Hilfe der vorliegenden Gleitgeschwindigkeiten können auch die unterschiedlichen Verläufe der μ -Schlupf-Kurven jenseits des Maximums erklärt werden. Charakteristisch für die Gummireibung ist der kontinuierliche Abfall der Umfangskraft mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit, sobald die optimale Gleitgeschwindigkeit überschritten ist. Da aufgrund der Schlupfdefinition die Gleitgeschwindigkeit bei hohen Fahrgeschwindigkeiten mit zunehmendem Schlupf schneller ansteigt, muß die Umfangskraft

bei hohen Fahrgeschwindigkeiten jenseits des Maximums schneller abfallen als bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten, das Diagramm zeigt das deutlich.

4.2.2 Einfluß der Profilhöhe

In Bild 5 sind die μ -Schlupf-Kurven für Reifen 5 (Winterreifen) bei 4 mm und 9 mm Profilhöhe (letztere entspricht dem Neuzustand) dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, daß mit abnehmendem Profil auf trockener Straße die maximal übertragbare Umfangskraft zunimmt. Dies liegt zum einen daran, daß wegen der zum Profilgrund hin verjüngend zulaufenden Rillen mit abnehmender Profilhöhe weniger Negativanteil vorliegt, wodurch die Flächenpressung sinkt. Zum anderen nimmt die Verformung der Gummiklötze unter der Umfangskraft ab, so daß die Flächenpressung, über die Klotzfläche betrachtet, gleichmäßiger wird.

Weiter ist auffällig, daß die Anfangssteigung der Kurven mit abnehmendem Profil stark zunimmt. Mit abnehmendem Profil nimmt die Laufflächenelastizität ab, so daß im Bereich des Formänderungsschlupfes bei gleichen Schlupfwerten höhere Umfangskräfte aufgebaut werden. Die gleichen Effekte beobachtet man auch bei Sommerreifen, nur weit weniger ausgeprägt, da hier die Laufflächenelastizität

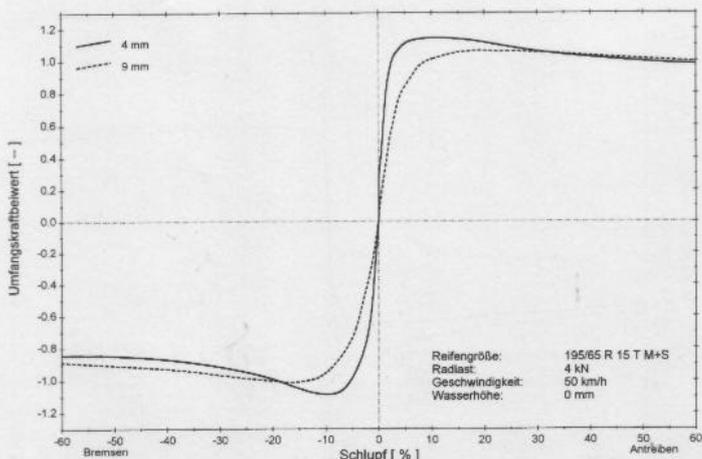


Bild 5: μ -Schlupf-Kurven für Reifen 5 auf trockener Fahrbahn für verschiedene Profilhöhen

Fig. 5: μ -slip-curves of tyre 5 for dry track surface and different tread depths

Reifengröße: 195/65 R 15 T M+S
Radlast: 4 kN
Geschwindigkeit: 50 km/h
Wasserhöhe: 0 mm

wegen der etwas niedrigeren Profilhöhe, der geringeren Feinlamellierung und der anderen Gummimischung von vornherein auf einem niedrigeren Niveau liegt.

4.2.3 Einfluß der „Sägezahnausbildung“

Bei manchen Reifen ist es bei der Interpretation der $\mu(s)$ -Kurven fast wichtiger, auf das Verschleißbild zu achten als auf die Abnahme der Profilhöhe. Durch das symmetrische Einfahrprogramm, aber auch durch das symmetrische Meßprogramm (Antreiben und Bremsen), wurde erreicht, daß ein gleichmäßiges Verschleißbild vorliegt. Weicht man von dem symmetrischen Programm ab, hat dies insbesondere bei Winterreifen sehr großen Einfluß auf die μ -Schlupf-Kurven. Dessen Ursache ist in der Ausbildung von „Sägezähnen“ zu finden. Führt man einen Winterreifen abweichend von dem genannten Programm ein, indem nur Bremschlupf, aber nie Antriebschlupf aufgebracht wird, bildet sich durch die Verformung der Profilelemente infolge des Verschleißes an jedem Profileinschnitt ein Sägezahnprofil aus, bei Winterreifen also auch an jeder einzelnen Lamelle.

Diese Ausbildung der Reifenoberfläche führt dazu, daß bei einer Bremsmessung ein gleichmäßiger Kontakt zwischen Laufstreifen und Fahrbahn vorliegt. Bei einer Antriebsmessung werden aber die Profilelemente in die entgegengesetzte Richtung verformt, so daß lediglich die „Sägezahnspitzen“ einen Kontakt zur Fahrbahn bekommen, wodurch nur eine kleine Kontaktfläche mit großer Flächenpressung wirksam wird. Die Folge ist, daß der Reifen weit höhere Bremskräfte als Antriebskräfte übertragen kann, wie Bild 6 zeigt. Das gleiche gilt sinngemäß natürlich auch für einen Reifen, der nur mit Antriebschlupf eingefahren wurde.

Abschließend soll zum Sägezahneffekt bei Winterreifen noch festgehalten werden, daß sich bei normalem Fahrbetrieb auf der Straße ein derart ausgeprägter Sägezahn nicht einstellt, da hier auch normale Abriebvorgänge bei einem freierollenden Rad auftreten. Somit ist das μ -Schlupf-Verhalten von Winterreifen am Prüfstand am besten durch symmetrisch eingefahrene Reifen zu ermitteln. Bei Sommerreifen ist der beschriebene Effekt sehr viel weniger ausgeprägt, da die Profilklötze verformungssteifer sind. Bei Reifen mit längsorientiertem Profil sieht man nur noch minimale Unterschiede bei den Umfangskräften, da sich hier kein ausgeprägter Sägezahn bilden kann.

4.2.4 Vergleich des Umfangskraftverhaltens verschiedener Reifen

Bild 7 zeigt die μ -Schlupf-Kurven verschiedener Reifen auf trockener Fahrbahn. Prinzipiell haben alle Kurven einen ähnlichen Verlauf, sie unterscheiden sich aber deutlich bezüglich des Anfangsgradienten, der Lage des Maximums, der Ausprägung des Maximums und des Gleitbeiwertes (letzterer kann in Bild 7

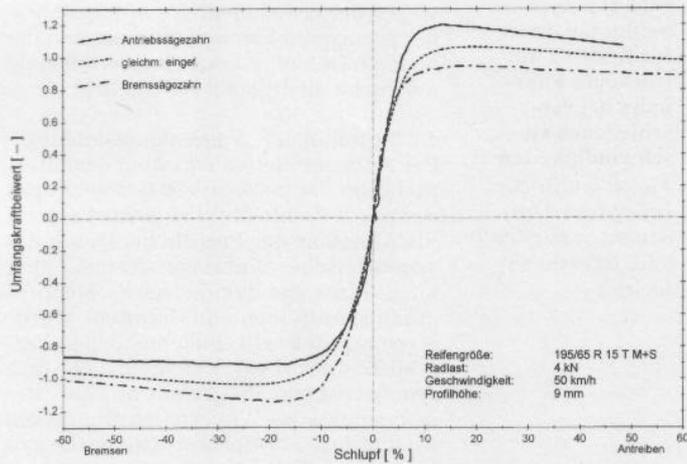


Bild 6: μ -Schlupf-Kurven für Reifen 5 (Winterreifen) auf trockener Fahrbahn bei unterschiedlicher „Sägezahnusbildung“ der Profilblöcke

Fig. 6: μ -slip-curves of tyre 5 (snow tyre) for dry track surface and different saw tooth shapes of the tread bars

angesprochen werden. Die Fahrbahngriffigkeit hat bei Messungen auf feuchter und nasser Fahrbahn eine sehr große Bedeutung und hängt von der Fahrbahnrauigkeit ab, die wiederum durch die Makrorauigkeit und die Mikrorauigkeit charakterisiert wird.

Die Makrorauigkeit ist in erster Linie für die Hysteresereibung verantwortlich (siehe [3]). Sie beeinflusst also auf feuchter und nasser Fahrbahn in großem Maße den Umfangskraftaufbau bei blockiertem Rad. Zur Überprüfung der Makrorauigkeit wird am Innentrommelprüfstand das Sandflächenverfahren (siehe [4]) eingesetzt. Mit dieser Methode läßt sich eine mittlere Rauhtiefe des Fahrbahnbelags bestimmen, die am Prüfstand bei dem verwendeten Fahrbahnbelag (Typ 0/8) 0,6 mm betrug. Damit ist sichergestellt, daß der Trommelbelag die Makrorauigkeit einer durchschnittlichen Straße aufweist. Die Mikrorauigkeit hat auf feuchter und nasser Fahrbahn sehr großen Einfluß auf die Adhäsionsreibung und beeinflusst sehr stark den Verlauf der μ -Schlupf-Kurven im Bereich des Kraftschlußmaximums. Zur Überprüfung der Mikrorauigkeit wurde der Skid-Resistance-Tester SRT eingesetzt, mit dem die Griffigkeit eines Belags ermittelt werden kann und somit Rückschlüsse auf die Mikrorauigkeit gezogen werden können (siehe [5]).

Bild 8 zeigt, wie sich unterschiedliche Griffigkeiten auf die Reifenkennlinien bei feuchter Fahrbahn auswirken können. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Griffigkeit auf die Anfangssteigung der Kurven keinen Einfluß hat. Dies ist nicht verwunderlich, da im linearen Bereich von einem Haften der Gummielemente ausgegangen werden kann und somit nur die Reifenelastizitäten eine Rolle spielen. Im nichtlinearen Teil kommt es dann aber zu Abweichungen der Kennlinien, wobei sich große Veränderungen im Bereich der Maximalwerte ergeben. Die Kennlinien bei niedrigen SRT-Werten haben keine ausgeprägten Umfangskraftmaxima und verlaufen bei mittleren bis hohen Schlupfwerten annähernd horizontal.

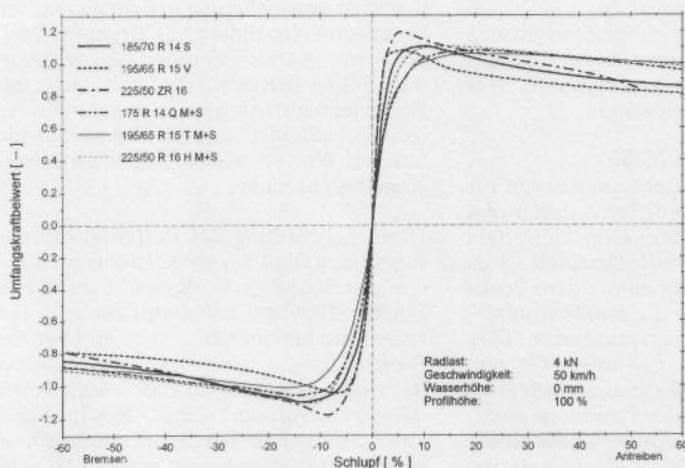


Bild 7: μ -Schlupf-Kurven für verschiedene Reifen auf trockener Fahrbahn bei 50 km/h

Fig. 7: μ -slip-curves of different tyres for dry track surface at 50 km/h

mit Hilfe von $\mu(s) = 60\%$ abgeschätzt werden).

Es ist zu erkennen, daß der breiteste Sommerreifen die größten Umfangskräfte übertragen kann, während die anderen Reifen von den erreichten Maximalwerten her relativ dicht beisammen liegen, obwohl sie recht große Unterschiede bezüglich des Anfangsgradienten und der Ausprägung der Umfangskraftmaxima aufweisen. Betrachtet man den linearen Anfangsbereich der Kennlinien, kann festgestellt werden, daß die Sommerreifen größere Anfangsgradienten aufweisen, während die Kurven der Winterreifen bei kleinen Schlupfwerten deutlich flacher verlaufen. Es ist klar ersichtlich, daß die Laufstreifenelastizität auf die Anfangssteigungen einen wesentlich größeren Einfluß hat als die Reifengröße oder das Höhen-Breiten-Verhältnis. Die Winterreifen weisen aufgrund ihrer weicheren Gummimischung, ihrer größeren Profilhöhe und der Feinlamellierung eine größere Laufstreifenelastizität auf und benötigen somit für die gleiche Umfangskraft einen größeren Formänderungsschlupf als die Sommerreifen. Unterschiede sind auch in der Ausprägung der Maxima festzustellen. Tendenzmäßig sind die Kurvenmaxima bei den Sommerreifen ausgeprägter als bei den Winterreifen. Dies

führt dazu, daß der Unterschied zwischen Maximalwert und Blockierwert bzw. den μ -Werten bei hohem Schlupf bei Sommerreifen größer ist als bei Winterreifen.

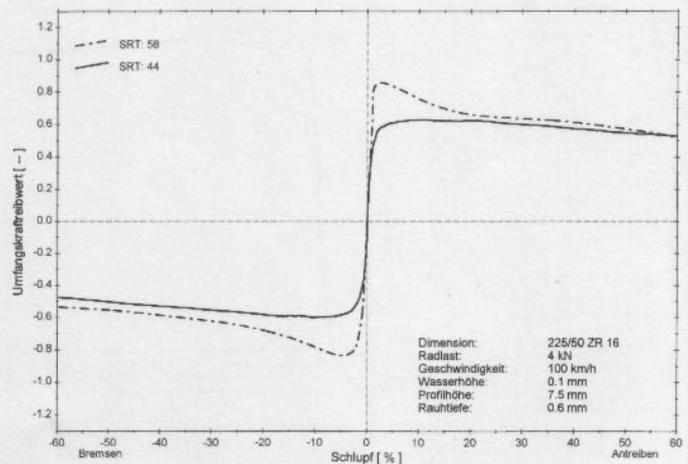
4.3 Messungen auf feuchter und nasser Fahrbahn

4.3.1 Einfluß der Fahrbahngriffigkeit

Bevor auf das eigentliche Meßprogramm auf feuchter und nasser Fahrbahn eingegangen wird, muß der Einfluß der Fahrbahngriffigkeit auf die μ -Schlupf-Kurven

Bild 8: Einfluß verschiedener Griffigkeiten bei geringer Wasserhöhe für große Änderungen der SRT-Werte

Fig. 8: Influence of different skid resistance at low water depth for large changes of the SRT-values



Daß die Änderung des SRT-Wertes auf die Maximalwerte der Kurven einen größeren Einfluß haben muß als auf die Kraftschlußbeiwerte bei hohen Schlupfwerten, erklärt sich aus der Theorie der Gummi-Reibung. Demnach ist die Adhäsionsreibung überwiegend für den Kraftschlußbeiwert im Maximalbereich verantwortlich, während mit zunehmenden Schlupfwerten die Hysteresereibung an Bedeutung gewinnt. Die Adhäsionsreibung ist auf feuchter Fahrbahn wiederum stark von der Mikrorauigkeit abhängig, während die Hysteresereibung von der Makrorauigkeit beeinflußt wird. Da die in Bild 8 dargestellten Kennlinien auf Belägen gemessen wurden, die sich lediglich durch die Mikrorauigkeit, nicht aber durch die Makrorauigkeit unterscheiden haben, müssen die Kurvenverläufe im Bereich maximaler Umfangskraft größere Differenzen aufweisen als im Bereich hoher Schlupfwerte.

Abschließend soll zum Einfluß der Fahrbahngriffigkeit auf μ -Schlupf-Kurven bei feuchter und nasser Fahrbahn festgehalten werden, daß auf diesem Gebiet noch Forschungsbedarf besteht, da an dieser Stelle nur Tendenzen aufgezeigt werden konnten. Man kann davon ausgehen, daß unterschiedliche Reifen auch unterschiedlich auf Rauigkeitsänderungen reagieren. Beispielsweise ist es denkbar, daß Reifen mit einem stark ausgeprägten Umfangskraftmaximum besonders empfindlich auf eine Mikrorauigkeitsabnahme reagieren.

4.3.2 Einfluß der Wasserhöhe

In Bild 9 ist der Einfluß der Wasserhöhe auf die μ -Schlupf-Kurven bei 100 km/h für Reifen 2 dargestellt. Zum Vergleich ist die Kurve für die trockene Fahrbahn bei der gleichen Geschwindigkeit eingetragen. Deutlich erkennt man den Einfluß des Wassers auf die maximalen Umfangskraftbeiwerte. Während auf trockener

Straße Werte um $\mu = 1,05$ bis 1,1 erreicht werden, sind auf feuchter Straße (0,1 mm Wasserhöhe) bei diesem Reifen nur noch Werte um $\mu = 0,75$ bis 0,8 erreichbar. Hier macht sich ein im Latsch zurückbleibender, benetzender Mikro-Wasserfilm bemerkbar, der beim Übergang von der trockenen auf die feuchte Fahrbahn den Reibwertsprung verursacht (siehe [6]). Eine Wasserhöhe von 1 mm bringt bei 100 km/h im Vergleich zu 0,1 mm Wasserhöhe bei Neureifen nur kleine Unterschiede. Bei dieser geringen Wasserhöhe ist das Profil, das zur Wasserverdrängung und -aufnahme zur Verfügung steht, noch ausreichend, um das Wasser bis auf den genannten Mikro-Wasserfilm aus der Kontaktfläche zu verdrängen.

Auffällig ist, daß die Anfangssteigungen der μ -Schlupf-Kurven auf trockener, feuchter und nasser Fahrbahn bis 1 mm Wasserhöhe nicht als Indikator für den maximalen Umfangskraftbeiwert verwendet werden können. Obwohl auf feuchter und nasser Fahrbahn geringere Maximalwerte erreicht werden, ist dort der Anstieg der Kurven steiler als auf trockener Straße. Dies ist darauf zurückzuführen, daß im linearen Bereich der μ -Schlupf-Kurven im wesentlichen Haften der Gummielemente vorliegt, so daß auch auf nasser Fahrbahn, zumindest bei geringen Wasserhöhen, im Bereich des Formänderungsschlupfes der Kurvenverlauf fast ausschließlich von den Gummielastizitäten beeinflußt wird. Diese sind wiederum stark von der Laufstreifen-temperatur abhängig, die auf feuchter oder nasser Fahrbahn niedriger ist als auf trockener Fahrbahn. Zwar lag die Umgebungstemperatur bei den Naßmessungen mit 17 °C nur wenig unter den Umgebungstemperaturen bei den Trockenmessungen (22 °C), jedoch wird der Reifen durch die „Wasserkühlung“ auf einem deutlich geringeren Temperaturniveau gehalten. Dadurch sinkt die Elastizität des

Gummis, wodurch die μ -Schlupf-Kurven im Bereich des Formänderungsschlupfes steiler werden. Dieses Verhalten ist bei den Winterreifen etwas stärker ausgeprägt als bei den Sommerreifen.

Bei 3 mm Wasserhöhe hat die μ -Schlupf-Kurve ein deutlich niedrigeres Niveau. Der Reifen hat Probleme, das Wasser innerhalb der kurzen Kontaktzeit zwischen Gummielementen und Fahrbahn aus der Latschfläche zu verdrängen, so daß der Adhäsionskontakt durch das Restwasser deutlich gestört wird. Dieser schlechtere Adhäsionskontakt zeigt sich dadurch, daß das Maximum der Kurve wesentlich weniger ausgeprägt ist als bei der 1-mm-Kurve. Bei großen Wasserhöhen ist weiter festzustellen, daß die Anfangssteigung in diesem Geschwindigkeitsbereich niedriger ist als bei geringen Wasserhöhen und auch niedriger ist als bei trockener Fahrbahn. Hier macht sich bemerkbar, daß sich ein Wasserkeil in die Aufstandsfläche schiebt und die Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn verkürzt. Dieser Einfluß der Wasserhöhe auf die Anfangssteigungen der μ -Schlupf-Kurven zeigt sich allerdings erst dann deutlich, wenn auch ein großer Einfluß auf die maximalen Umfangskraftbeiwerte vorhanden ist. Der maximale Umfangskraftbeiwert bei nasser Fahrbahn muß unter $\mu = 0,4$ bis 0,5 sinken, damit die Steigung im linearen Bereich deutlich flacher wird.

4.3.3 Vergleich des Umfangskraftverhaltens verschiedener Reifen

Wie nicht anders zu erwarten war, unterscheiden sich die Reifen in ihrem Verhalten auf feuchter und nasser Fahrbahn deutlich. Besonders extrem sind diese Unterschiede bei großen Wasserhöhen (3 mm) und einer Geschwindigkeit von 100 km/h, Bild 10. Die maximalen Umfangskraftbeiwerte sind beim schlechtesten Reifen etwa 40 % niedriger als beim besten Reifen. Bemerkenswert sind aber auch die

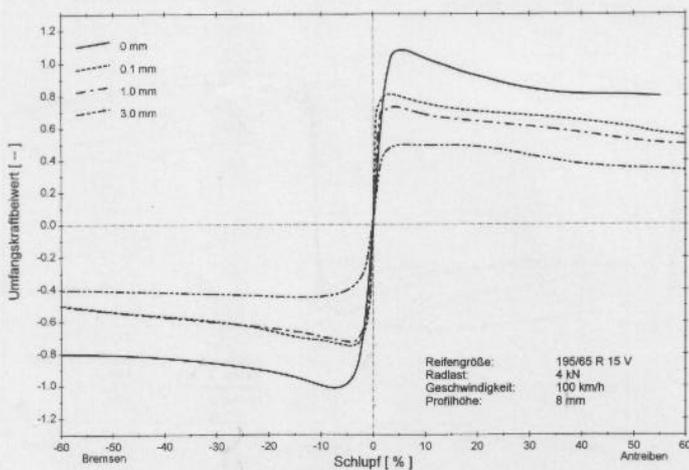


Bild 9: μ -Schlupf-Kurven für Reifen 2 bei 100 km/h und verschiedenen Wasserhöhen
 Fig. 9: μ -slip-curves of tyre 2 at 100 km/h and different water depths

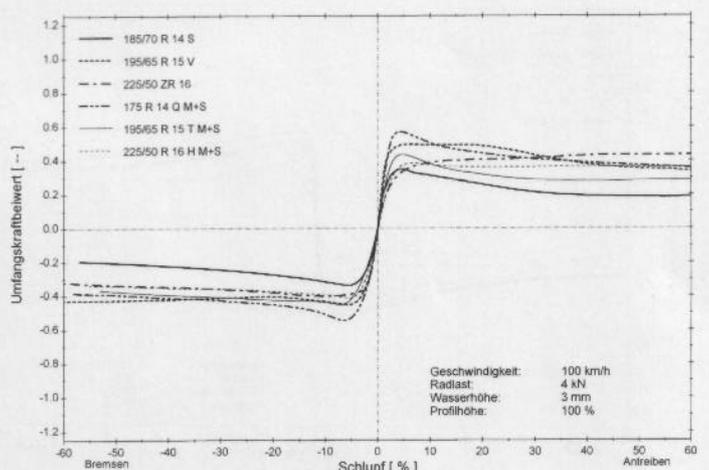


Bild 10: μ -Schlupf-Kurven für verschiedene Reifen bei 3 mm Wasserhöhe und 100 km/h
 Fig. 10: μ -slip-curves of different tyres at 3 mm water depth and 100 km/h

unterschiedlichen Kurvenverläufe, insbesondere auf der Antriebsseite. Während sie auf der Bremsseite tendenziell ähnlich sind, gibt es bezüglich der Ausbildung und der Lage des Maximalwertes auf der Antriebsseite große Differenzen. Allen Kurven gemeinsam ist aber, daß der in die Aufstandsfläche eindringende Wasserkeil dazu führt, daß die Anfangssteigung der μ -Schlupf-Kurven bei 3 mm Wasserhöhe geringer ausfällt als bei 1 mm Wasserhöhe.

4.4 Messungen auf vereister Fahrbahn

Die Eismessungen wurden bei festgelegter konstanter Eisoberflächentemperatur durchgeführt. Hierbei wurde die Innenlufttemperatur der Trommel so lange auf dem gewünschten Wert gehalten, bis sich die gleiche Eisoberflächentemperatur einstellte. Zur Messung der Eisoberflächentemperatur wurde ein Gesamtstrahlungs-pyrometer eingesetzt [7].

4.4.1 Einfluß der Fahrgeschwindigkeit und der Temperatur

Bild 11 zeigt beispielhaft für Reifen 5 den großen Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die μ -Schlupf-Kurven bei vereister Fahrbahn und einer Temperatur von $-0,5$ °C. Deutlich ist zu erkennen, daß der maximale Kraftschlußbeiwert mit zunehmender Geschwindigkeit stark abnimmt. Die Lage des Maximums bezüglich der Schlupfachse hängt ebenfalls von der Geschwindigkeit ab. Wie auf trockener (siehe Kapitel 4.2.1) und nasser Fahrbahn gibt es auf Eis eine optimale Gleitgeschwindigkeit, bei der die Umfangskräfte infolge maximaler Adhäsionsreibung die größten Werte annehmen. Diese optimale Gleitgeschwindigkeit wird aufgrund der Schlupfdefinition bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten bei höheren Schlupfwerten erreicht als bei hohen Fahrgeschwindigkeiten.

Weiter hat die Fahrgeschwindigkeit nicht

nur auf den Maximalwert, sondern auch auf den Kurvenverlauf hinter dem Maximum einen großen Einfluß. Während zwischen dem maximalen Umfangskraftbeiwert und dem Blockierwert (kann in Bild 11 mit Hilfe von $\mu(s) = 60\%$ abgeschätzt werden) bei 3 km/h große Unterschiede festzustellen sind, haben diese beiden Werte bei 100 km/h ähnliches Niveau. Dies ist im Diagramm besonders deutlich auf der Bremsseite zu erkennen, da die Kurven für die höheren Geschwindigkeiten bei großen Schlupfwerten annähernd horizontal verlaufen. Dadurch nähern sich die Meßkurven der einzelnen Geschwindigkeiten bei hohen Schlupfwerten immer mehr aneinander an, wodurch in diesem Bereich nur noch geringe Unterschiede auszumachen sind. Praktisch unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit liegen die Kurven bei Schlupfwerten um 60 % auf äußerst niedrigem Niveau. Sowohl auf der Antriebsseite als auch auf der Bremsseite werden nur noch Umfangskraftbeiwerte von etwa $\mu = 0,08$ erreicht. Diese niedrigen Werte deuten darauf hin, daß sich durch die entstehenden Reibungsverluste bei den untersuchten Fahrgeschwindigkeiten ein Wasserfilm im Latsch bildet, der einen nennenswerten Umfangskraftaufbau verhindert.

Auffällig ist, daß wie bei den Naßmessungen auch bei den Eismessungen die Anfangssteigungen der Kurven ähnlich sind. Auch auf Eis überwiegt bei geringen Umfangskräften der Formänderungsschlupf, so daß in diesem Bereich die Laufstreifenelastizität des Reifens die entscheidende Rolle spielt. Erst im degressiven Bereich der Kurven tritt in der Latschfläche auch nennenswerter Gleitschlupf auf.

Eine Absenkung der Temperatur führt zu einer Erhöhung der Maximalwerte, teilweise aber auch zu einer veränderten Abhängigkeit des Kurvenverlaufs von der Geschwindigkeit. Vergleicht man die μ -Schlupf-Kurven bei -4 °C, **Bild 12**, mit de-

nen bei $-0,5$ °C, **Bild 11**, so sieht man, daß die Ausprägung des Maximalwertes bei 3 km/h bei der tieferen Temperatur geringer ist als bei der höheren Temperatur. Andererseits hat die Ausprägung bei 100 km/h bei der tieferen Temperatur im Vergleich zu der höheren Temperatur zugenommen. Dieser geänderte Kurvenverlauf führt auch dazu, daß die Unterschiede der Umfangskraftbeiwerte bei hohem Schlupf mit abnehmender Temperatur zunehmen. Extrem niedrige Umfangskraftbeiwerte liegen nur noch bei hohen Schlupfwerten und hohen Geschwindigkeiten vor, was darauf hindeutet, daß auch nur bei hohen Geschwindigkeiten durch die Reibungsverluste ein bedeutender Wasserfilm im Latsch entsteht.

4.4.2 Vergleich des Umfangskraftverhaltens verschiedener Reifen

In **Bild 13** werden die μ -Schlupf-Kurven der untersuchten Reifen bei -8 °C und 3 km/h miteinander verglichen. Es sind die Vorteile der Winterreifen im Vergleich zu den Sommerreifen zu erkennen, die bei tiefen Temperaturen besonders groß sind. Beispielsweise erreicht der breite 225er Sommerreifen (Reifen 3) lediglich etwa 45 % des Umfangskraftmaximums des 175er Winterreifens (Reifen 4). Das relativ gute Abschneiden des Reifens 185/70 R 14 S (Reifen 1) ist darauf zurückzuführen, daß dieser Reifen ein Allwetterreifen ist. Insgesamt wurde festgestellt, daß sich die Reifen bezüglich der erreichbaren Umfangskraftbeiwerte deutlich unterscheiden, wobei der Verlauf der Kurven aber insgesamt ähnlich ist.

5 Zusammenfassung

In dem von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) initiierten Forschungsvorhaben sollten für sechs repräsentative Reifenvarianten μ -Schlupf-Kurven auf den unterschiedlichsten Fahr-

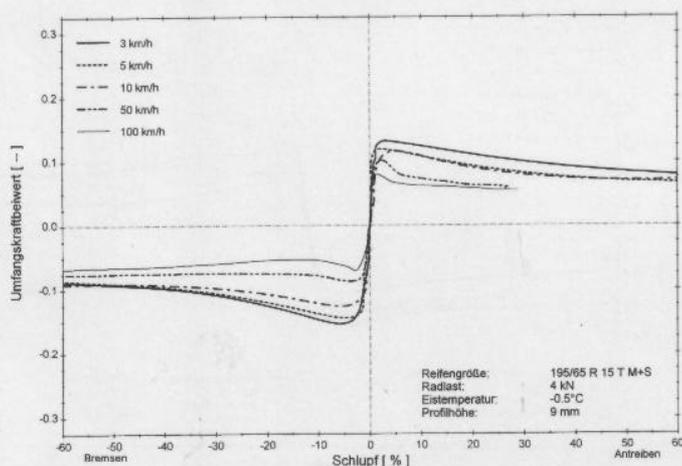


Bild 11: μ -Schlupf-Kurven für Reifen 5 auf vereister Fahrbahn bei $-0,5$ °C und verschiedenen Geschwindigkeiten
Fig. 11: μ -slip-curves of tyre 5 on icy track surface at $-0,5$ °C and different velocities

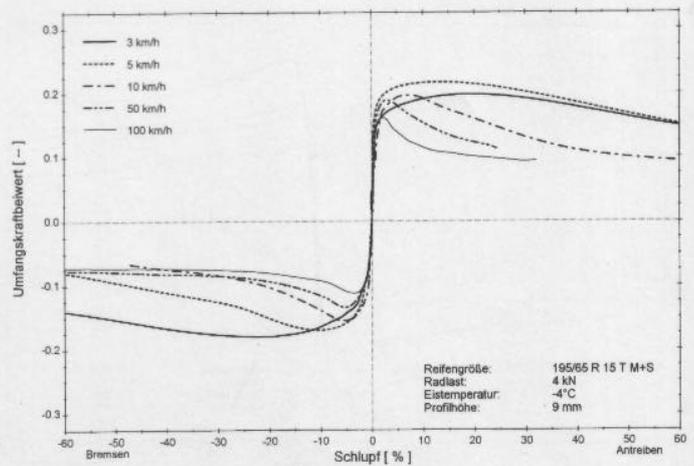


Bild 12: μ -Schlupf-Kurven für Reifen 5 auf vereister Fahrbahn bei -4 °C und verschiedenen Geschwindigkeiten
Fig. 12: μ -slip-curves of tyre 5 on icy track surface at -4 °C and different velocities

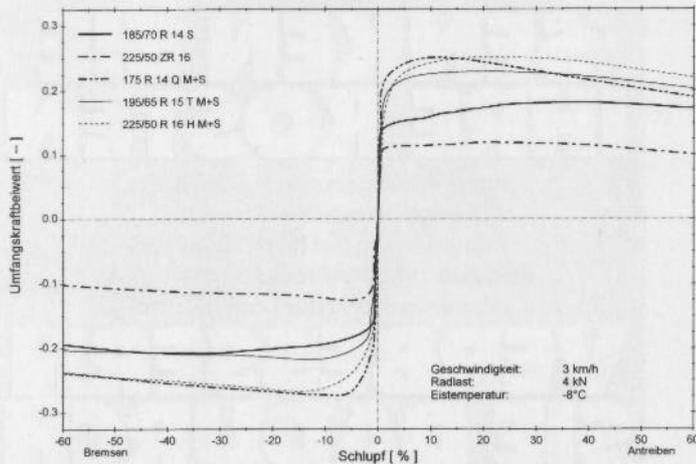


Bild 13: μ -Schlupf-Kurven für verschiedene Reifen auf vereister Fahrbahn bei $-8\text{ }^\circ\text{C}$ und 3 km/h

Fig. 13: μ -slip-curves of different tyres on icy track surface at $-8\text{ }^\circ\text{C}$ and 3 km/h

bahnzuständen (trocken, feucht, naß, vereist) gemessen werden, da die genaue Kenntnis des Reifenverhaltens eine Voraussetzung zur Verbesserung von modernen Regelsystemen, wie beispielsweise ABS, ASR und ESP, ist.

Für die Durchführung dieses umfangreichen Forschungsvorhabens wurde der Reifen-Innentrommel-Prüfstand der Universität Karlsruhe (TH) eingesetzt, da er hierfür besondere Vorteile aufweist. Dazu zählen unter anderem der reale Fahrbahnbelag aus Asphalt, die Möglichkeit, einen exakt bemessenen Wasserfilm aufzubringen und die genaue Einstellbarkeit der Eis- und Umgebungstemperatur.

Wegen der Vielzahl der Ergebnisse können nun genauere Angaben über den Verlauf von μ -Schlupf-Kurven gemacht werden. Auf trockener Fahrbahn zeigte sich beispielsweise, daß die Fahrgeschwindigkeit nur einen geringen Einfluß auf die Anfangssteigung der Kurven hat, daß aber die Lage des Maximums und der Kurvenverlauf bei hohen Schlupfwerten deutlich beeinflusst werden. Außerdem stellte sich heraus, daß durch eine geringere Profilhöhe der Anstieg der μ -Schlupf-Kurven merklich vergrößert wird. Zum Einfluß des Reifentyps ist festzustellen, daß Winterreifen einen auffällig flacheren Kurvenanstieg als Sommerreifen bewirken.

Wichtig ist auch die Erkenntnis, daß beim Übergang von der trockenen auf die feuchte Fahrbahn zwar ein merklicher Abfall des maximalen Umfangskraftbeiwertes zu verzeichnen ist, die Anfangssteigung der μ -Schlupf-Kurven aber erst dann deutlich abnimmt, wenn der Maximalwert bei höheren Fahrgeschwindigkeiten und größeren Wasserhöhen unter etwa $\mu = 0,4$ bis $0,5$ sinkt.

Bei der systematischen Untersuchung des Reifenverhaltens auf vereister Fahrbahn wurde festgestellt, daß der Maximalwert und die Form der μ -Schlupf-Kurven in großem Maße durch die Fahrgeschwindigkeit und die Temperatur beeinflusst werden.

Abschließend soll festgehalten werden, daß mit dieser Arbeit eine Art Katalog geschaffen wurde, in dem die einzelnen Parametereinflüsse auf die μ -Schlupf-Kurven repräsentativer Reifen nachgeschlagen werden können. Natürlich kann dieser Katalog weiter vervollständigt werden. So haben sich bezüglich des Einflusses der Fahrbahngriffigkeit auf die μ -Schlupf-Kurven bei feuchter und nasser Fahrbahn neue Erkenntnisse ergeben. Hier besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf, da dieser Parameter nicht nur das Niveau, sondern auch den Verlauf der Kennlinien in hohem Maße beeinflusst.

Literaturhinweise

- [1] ZTV bit StB 84: Zusätzliche Vorschriften für den Bau bituminöser Fahrbahndecken, Blatt 1-33, 1984
- [2] Gnadler, R.; Unrau, H.-J.; Fischlein, H.; Frey, M.: Ermittlung von μ -Schlupf-Kurven an Pkw-Reifen. FAT-Schriftenreihe Nr. 119, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V., Frankfurt am Main, 1995
- [3] Kummer, H. W.; Meyer, W. E.: Verbesserter Kraftschluß zwischen Reifen und Fahrbahn - Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie. In: ATZ 69 (1967) Nr. 8, S. 245-251 und Nr. 11, S. 382-386
- [4] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. In: Straßenbau-Technik 3/71, S. 131-135
- [5] Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen: Arbeitsanweisung für kombinierte Griffigkeits- und Rauheitsmessungen mit dem Pendelgerät und dem Ausflußmesser. Köln, 1972
- [6] Gnadler, R.: Naßgriff- und Aquaplaningverhalten von Pkw-Reifen. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1988) Nr. 11, S. 297-302 und Nr. 12, S. 306-310
- [7] Weber, R.: Der Kraftschluß von Fahrzeugreifen und Gummiprüfen auf vereister Oberfläche. Karlsruhe (TH), Universität, Dissertation, 1970