

Kraftschluss messungen auf Schnee

mit dem Reifen-Innentrommel- Prüfstand



Im Bereich Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe wurde in Zusammenarbeit mit der Continental AG ein Reifen-Schnee-Prüfstand entwickelt, der ganzjährig Tests von Winterreifen auf Kunstsnowe ermöglicht. Da hierbei sowohl die Fahrbahn- als auch die Umgebungsbedingungen einstellbar sind, können die Reifentests unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt werden. In diesem Beitrag wird unter anderem durch einen Vergleich mit Messungen im Freien das große Potenzial dieser Prüfeinrichtung für die Entwicklung von Winterreifen aufgezeigt.

1 Motivation

Winterreifen bieten einen entscheidenden Beitrag zur Fahrsicherheit bei winterlichen Witterungsbedingungen. Die Kraftübertragung auf schneebedeckter Straße ist dabei von besonderer Bedeutung. Für die Verbesserung des Übertragungsverhaltens in Längs- und Querrichtung ist der Reifenentwickler bei der Bewertung von Entwicklungsschritten auf möglichst hoch auflösende und verlässliche Messverfahren angewiesen.

Die Untersuchung des Kraftschlussverhaltens auf Schnee wird heute praktisch ausschließlich auf Naturschnee im Freien durchgeführt. Täglich und tageszeitlich wechselnde meteorologische Randbedingungen haben dabei selbst in schneesicheren Gebieten einen großen Einfluss auf die Testergebnisse; statistisch gesicherte Ergebnisse sind nur in aufwändigen Versuchsprogrammen zu erzielen.

Continental hat nach Wintertests im Harz und im Weserbergland in den fünfziger Jahren vor allem schneesichere Gebiete in den Alpen genutzt. Das war jedoch nur während des mitteleuropäischen Winters möglich, ganzjährige Tests auf Gletschern verboten sich aus Umweltgründen.

Eine wichtige Voraussetzung zur Verkürzung der Entwicklungszeiten für Winterreifen ist jedoch eine möglichst ganzjährige Durchführung von Schneeversuchen.

Deshalb werden heute weltweit Prüfgelände in Skandinavien, Nord- und Südamerika, Japan und Neuseeland genutzt, um die Entwicklungszyklen von der Jahreszeit abzukoppeln.

Versuche auf Kunstschnee versprachen neue Möglichkeiten:

- Außenprüfungen in ausreichend kalten Gebieten unabhängig von den Naturschneeverhältnissen
- Fahrzeugversuche in großen kühlbaren Räumen
- Reifenversuche im Labor auf entsprechend präparierbaren Reifenprüfständen.

Zwingende Voraussetzung für Prüfungen auf Kunstschnee war dabei der Nachweis einer ausreichenden Korrelation zu den Prüfergebnissen auf Naturschnee. Deshalb hat Continental 1996 in Ivalo, Finnland, unter idealen klimatischen und technischen Voraussetzungen ein umfangreiches Korrelationsprogramm durchgeführt. Auf sorgfältig präparierten Schneeflächen ergab sich dabei eine sehr gute Korrelation zwischen den Prüfergebnissen auf Kunstschnee und Naturschnee. Der Einsatz von Schneekanonen im Freien, **Bild 1**, erwies sich jedoch als nicht sinnvoll; die Testprogramme bleiben wegen der nicht ausreichend stabilen Witterungsverhältnisse zeitaufwändig und zu teuer.

Bei Fahrzeugversuchen in gekühlten Räumen, beispielhaft überprüft im Hurre Ski Tunnel Voukatti, Finnland, **Bild 2**, erga-

1 Motivation



Bild 1: Niederdruckschneekanone im Betrieb
Figure 1: Low-pressure snow gun in operation

Die Autoren



Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Rolf Gnadler ist Leiter der Abteilung Kraftfahrzeugbau und Mitglied der kollegialen Leitung des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe (i. R.).



Prof. Heinrich Huinink ist Honorarprofessor an der Universität Karlsruhe und war Leiter Strategische Technologie bei der Continental AG in Hannover.



Dr.-Ing. Michael Frey ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe.



Dr.-Ing. Reinhard Mundt ist Leiter Prüfmechanik bei der Continental AG in Hannover.



Dr.-Ing. Jürgen Sommer war Leiter Prüfmaschinenentwicklung bei der Continental AG in Hannover.



Dipl.-Ing. Hans-Joachim Unrau ist wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe.



Dr.-Ing. Burkhard Wies ist Hauptabteilungsleiter Entwicklung Replacement bei der Continental AG in Hannover.

ben sich erhebliche technische Probleme vor allem bei der Oberflächenpräparation. Die Prüfkosten waren wegen hoher Mieten – beziehungsweise erforderlicher Investitionen – und Energiekosten unwirtschaftlich hoch. Damit war die Motivation gegeben, einen Ansatz für Kunstschneeversuche am Einzelrad im Labor zu untersuchen.

Neben den Fahrzeugversuchen ist für den Reifentechniker die Messung am Einzelrad unter sehr gut kontrollierbaren und reproduzierbaren Randbedingungen für Klima, Schnee, Längs- und Querschleppbedingungen sowie Lastvorgaben von großem Wert. Bei hoher Prüfschärfe (geringe kritische Messwertdifferenz) bietet sich die Chance, auch den Einfluss „kleiner“ Entwicklungsschritte zu bewerten; Weiterentwicklung bedeutet oft das Umsetzen einer Summe von kleinen Einzelschritten.

Erste Diskussionen hatte es bereits auf der VDI Tagung Reifen Fahrwerk Fahrbahn im Oktober 1995 mit Herrn Prof. Dr. Gnadler und Ingenieuren der Continental AG gegeben. Der Reifen-Innentrommelprüfstand an der Universität Karlsruhe – an dem im Übrigen schon Eisversuche durchgeführt werden konnten – bot nach gemeinsamer Einschätzung für Schneeversuche im Labor die besten Voraussetzungen.

In Zusammenarbeit mit der Continental AG wurde am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der Universität Karlsruhe ein Reifen-Schnee-Prüfstand entwickelt, der vielseitige Schneeprüfungen am Einzelrad ermöglicht. Im Folgenden wird diese Versuchseinrichtung vorgestellt, anhand ausgewählter Messungen und durch einen Vergleich mit Messergebnissen auf Naturschnee im Freien wird das große Potenzial dieser Prüfeinrichtung für die Entwicklung von Winterreifen aufgezeigt.

2 Prüfstandsbeschreibung

Eine Grundvoraussetzung für die Durchführung von Kraftschlussmessungen auf Schnee an einem Reifen-Prüfstand ist der Einsatz einer Versuchseinrichtung, die eine hohe Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit gewährleistet. Der Reifen-Innentrommel-Prüfstand des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Abteilung Kraftfahrzeugbau (derzeit: Institut für Produktentwicklung, zukünftig: Institut für Fahrzeugtechnik) an der Universität Karlsruhe erfüllt diese Voraussetzung und erlaubt darüber hinaus, durch die Installation des kompletten Prüfstands in einer klimatisierten Kammer, die Durchführung von Messungen bei konstanter Umgebungstemperatur in einem großen Temperaturbereich, auch deutlich unter dem Gefrierpunkt.

1 Motivation

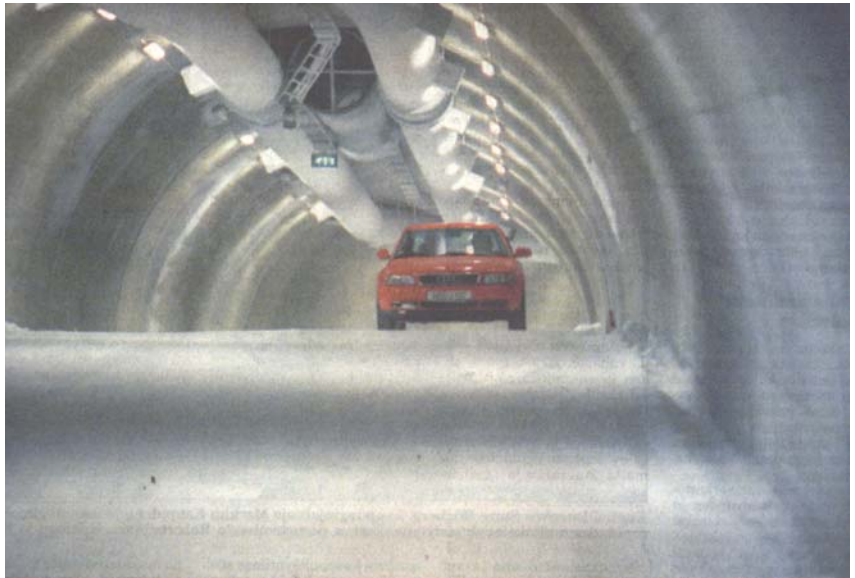


Bild 2: Hurre Ski Tunnel Voukatti, Finnland
Figure 2: Hurre ski tunnel Voukatti, Finland

2 Prüfstandsbeschreibung



Bild 3: Die Prüfstands-Radaufhängung des Innentrommelprüfstands mit servohydraulischen Regeleinrichtungen
Figure 3: The wheel suspension on the internal test drum test rig with servohydraulic control devices

Bei diesem Prüfstand [1] laufen die Testreifen, durch eine servohydraulisch angesteuerte Prüfstands-Radaufhängung geführt, **Bild 3**, auf der Innenseite einer zylindrischen Trommel mit 3,8 m Durchmesser.

Die Prüfstands-Radaufhängung erlaubt hierbei die kontinuierliche Verstellung von Schräglaufwinkel, Sturzwinkel und Einfederung, wobei alle Bewegungen gleichzeitig nach annähernd beliebigen Vorgaben

2 Prüfstandsbeschreibung

<u>Innentrommelprüfstand</u>		
Trommel-Innendurchmesser		3,80 m
Fahrbahnbeläge	Safety-Walk verschiedene Betonbeläge verschiedene Asphaltbeläge Eis, Schnee	
Höchstgeschwindigkeit	- auf Safety-Walk - auf Asphalt / Beton	200 km/h 150 km/h
Wasserhöhe		0 ... 4 mm
Umgebungstemperatur		-15 ... +30 °C
Schräglaufwinkel		-20° ... +20°
Sturzwinkel		-10° ... +20° (+20° ... +45°)
<u>Messsystem für Kraftschluss</u>		
Max. Radlast, Seitenkraft, Umfangskraft		15 kN
Max. Antriebsmoment, Sturzmoment		5500 Nm
Max. Rückstellmoment		1500 Nm

Bild 4: Technische Daten des Prüfstands und des Messsystems
 Figure 4: Technical data of the test drum and measuring system

durchgeführt werden können. Zum Antreiben und Bremsen des Rads ist ein Hydraulikmotor installiert. Hierbei ist es besonders vorteilhaft, dass, im Gegensatz zum Betrieb mit einer mechanischen Reibungsbremse, stabile Messpunkte auch jenseits des Umfangskraftmaximums angefahren werden können.

Das verwendete Innentrommel-Prinzip bietet unter Anderem den Vorteil, dass unterschiedliche reale Fahrbahnbeläge installiert werden können. Neben gängigen Safety-Walk-Belägen können somit Kassetten mit Asphalt- oder Betonfüllungen segmentartig in der Trommel befestigt werden [2]. Darüber hinaus sind Messungen auf nasser, vereister und, wie nachfolgend beschrieben, auch auf verschneiter Fahrbahn möglich.

Die am Rad angreifenden Kräfte und Momente werden mit einer Sechs-Komponenten-Messnabe gemessen, die zwischen Rad und Radaufhängung angeordnet ist und mitrotiert. Dadurch werden nur die am Rad angreifenden Kräfte und Momente ohne Beeinflussung durch die Antriebswelle

gemessen, wobei die störende Radlagerreibung eliminiert wird. In **Bild 4** sind die wichtigsten Daten des Prüfstands und des Messsystems zusammengefasst.

3 Schneeherstellung und Fahrbahnaufbereitung

Der zur Herstellung der Prüffahrbahn notwendige Schnee wird direkt am klimatisierten Prüfstand künstlich erzeugt. Hierzu musste ein neues Verfahren zur Herstellung dieses Kunstschnees entwickelt werden, da eine Anwendung der beispielsweise auf Skipisten üblichen Verfahren zur Schneeerzeugung (dort sind Wurfweiten von etwa 30 bis 50 m notwendig) wegen der am Prüfstand vorliegenden Platzverhältnisse nicht möglich war. Das neue Verfahren gewährleistet auch, dass der erzeugte Schnee eine ähnliche Konsistenz wie natürlicher Schnee aufweist, was bei üblichen Schneekanonen nicht der Fall ist.

Für den vorliegenden Anwendungsfall wurde eine spezielle Schneekanone entwickelt, bei welcher der Kunstschnee durch

Verwendung von flüssigem Stickstoff aus Leitungswasser erzeugt wird. Dabei kann durch entsprechende Wahl der Mischungsverhältnisse der Einzelkomponenten die Konsistenz des Kunstschnees beeinflusst werden. Durch die Anordnung der Schneekanone und das Produktionsverfahren ist gewährleistet, dass der Schnee sich gleichmäßig auf der Fahrbahn verteilt und eine geschlossene Schneedecke ausbildet.

Nach der Schneeherstellung besteht die Schneefahrbahn zunächst aus sehr lockerem Schnee, der jedoch noch nicht für Reifentests genutzt werden kann. Um reproduzierbare Messbedingungen zu erhalten, muss die Fahrbahn in einem weiteren Schritt konditioniert werden. Hierzu wird mit Hilfe eines ebenfalls neu entwickelten Verfahrens reproduzierbar eine homogene Fahrbahn erzeugt. Die Konsistenz (zum Beispiel Härte) der Schneefahrbahn kann dabei durch die Wahl der Konditionierungsparameter, durch eine entsprechende Kombination von verdichtenden und homogenisierenden Arbeitsgängen und durch die Wahl der Prüftemperatur beeinflusst werden.

Da die Schneefahrbahn während der Versuche einem gewissen Verschleiß unterliegt, ist eine Aufarbeitung der Prüffahrbahn nach einer bestimmten Anzahl von Messungen notwendig. Ausgehend vom zuvor beschriebenen Verfahren, wurde hierzu eine effiziente Prozedur zur Aufbereitung der Schneefahrbahn erarbeitet und mit Erfolg erprobt.

4 Prüfprozedur Indoor

Bei der Durchführung von Kraftschlussmessungen auf festen Fahrbahnoberflächen wie Safety-Walk, Asphalt oder Beton kommt es während einer Messserie zu keinen nennenswerten Abnutzungs- oder Verschleißerscheinungen der Fahrbahn. Bei Messungen auf Schnee tritt jedoch, wie bereits erwähnt, wegen der relativ weichen Fahrbahn ein gewisser Verschleiß auf. Damit ist es nicht möglich, eine größere Anzahl von Messungen auf der exakt gleichen Fahrbahn durchzuführen. Somit können sich durch den auftretenden Fahrbahnverschleiß die Eigenschaften des Schnees auch während einer Messreihe in einer Größenordnung ändern, die im Hinblick auf die angestrebte Messgenauigkeit nicht vernachlässigt werden darf. Es mussten daher Prüfprozeduren entwickelt werden, die einerseits den Verschleiß des Schnees auf ein Minimum reduzieren und andererseits unempfindlich gegenüber Änderungen der Schneeeigenschaften sind.

Am Beispiel von Seitenkraftmessungen soll kurz der prinzipielle Ablauf der verwendeten Prüfprozedur erläutert werden.

Zum Erzeugen von Seitenkräften wird bei diesen Messungen der Schräglaufwinkel des Prüfrads, ausgehend vom geradeaus laufenden Rad, in jede Richtung kontinuierlich auf jeweils sechs Grad erhöht und anschließend, ebenfalls kontinuierlich, auf null zurückgenommen. Um hierbei den Schneeverschleiß zu minimieren, wird der Schräglaufwinkel etwas schneller verstellt, als dies bei Seitenkraftmessungen auf festen Fahrbahnoberflächen üblich ist.

Ein wesentliches Merkmal der Prüfprozedur ist, dass jeder Reifen relativ zu einem so genannten Referenzreifen beurteilt wird. Zu diesem Zweck werden, mit dem jeweiligen Prüfreifen und dem Referenzreifen abwechselnd, mehrfach hintereinander Seitenkraftmessungen unter gleichen Bedingungen durchgeführt. Durch diese Vorgehensweise bedingt, fallen auftretende Änderungen der Fahrbahneigenschaften zwischen den Messungen mit beiden Reifen relativ klein aus. Gleichzeitig werden durch die abwechselnde Untersuchung der beiden Reifen auch die Änderungen der Fahrbahneigenschaften erfasst. Die mit jeweils gleichen Betriebsparametern mehrfach durchgeführten Messungen erlauben für jeden Reifen den Einfluss des aufgetretenen Schneeverschleißes auf das Kraftschlussverhalten des jeweiligen Reifens zu beschreiben. Damit ist es dann auch möglich, diesen Einfluss bei der Auswertung der Messungen zu berücksichtigen.

5 Messergebnisse Indoor

Mit dem zuvor beschriebenen Messverfahren wurde bereits eine sehr große Zahl von Messungen erfolgreich durchgeführt. Nachfolgend sollen am Beispiel von Seitenkraftmessungen einige Messergebnisse vorgestellt werden.

In **Bild 5** sind hierzu Seitenkraftkennlinien und in **Bild 6** die zugehörigen Rückstellmomentkennlinien für drei unterschiedliche Reifen der Größe 205/55 R 16 aus einem Versuchsprogramm zur Untersuchung verschiedener Gummimischungen dargestellt. Diese Reifen wiesen Laufflächenmischungen auf, die sich im Wesentlichen in der Härte unterscheiden, jedoch das gleiche Winterprofil ContiWinterContact TS 790 V haben.

Die Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kurven zeigen den Einfluss der Gummimischung, der sich durch ein deutliches Aufspreizen der übertragbaren Seitenkräfte bemerkbar macht, Bild 5. Dabei werden mit den weicheren Gummimischungen höhere maximale Seitenkräfte erzielt. Interessant ist hierbei die Tatsache, dass die Reifen mit der weicheren Gummimischung bei kleinen Schräglaufwinkeln zunächst geringere

5 Messergebnisse Indoor

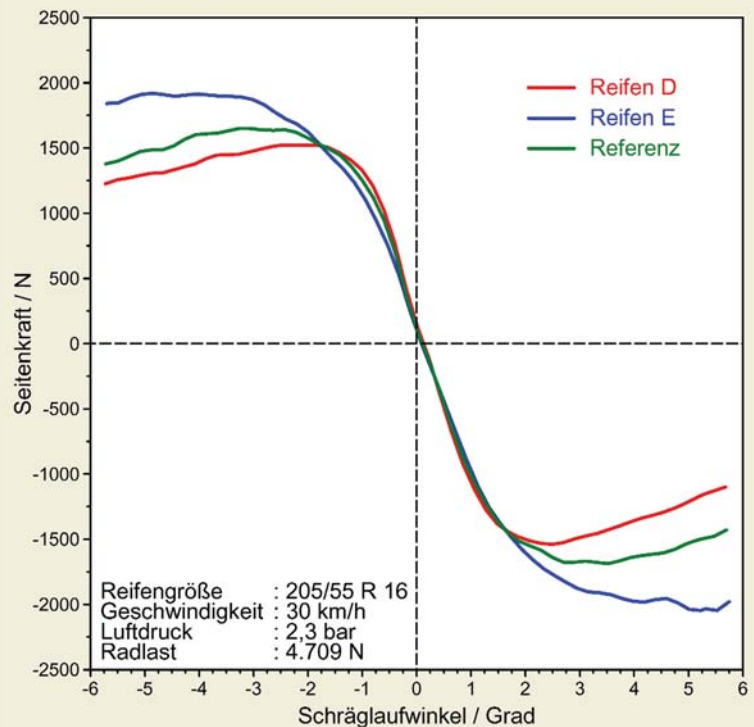


Bild 5: Beispiele für gemessene Seitenkraftkennlinien

Figure 5: Examples of lateral-force characteristic curves, as measured

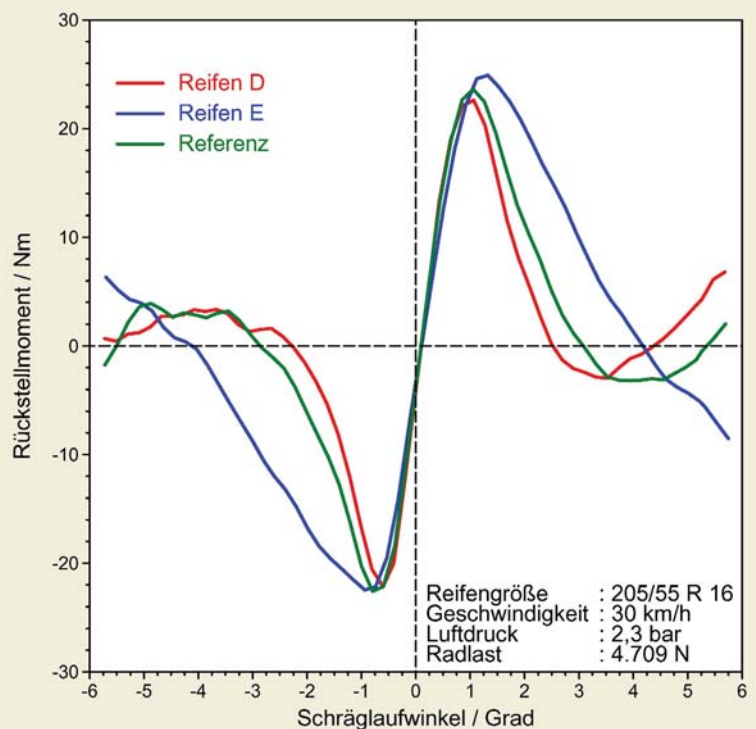


Bild 6: Beispiele für gemessene Rückstellmomentkennlinien

Figure 6: Examples of certain aligning torque characteristics, as measured

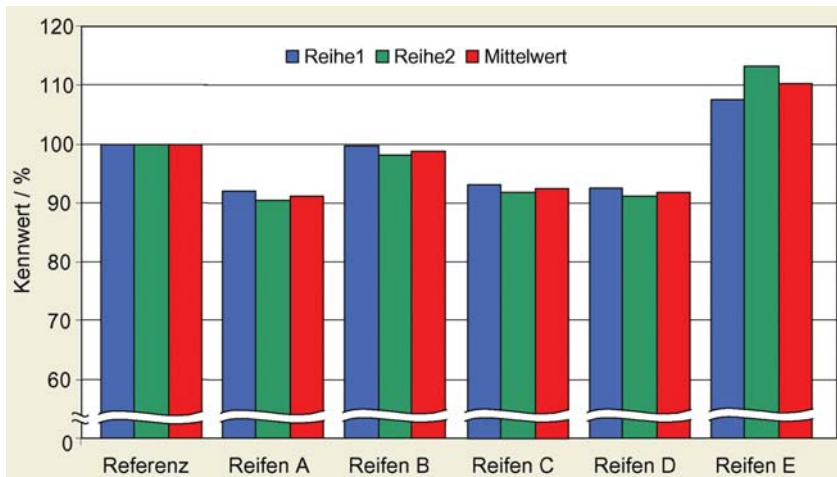


Bild 7: Vergleich der verschiedenen Reifenvarianten anhand von Kennwerten, ermittelt aus Seitenkraftmessungen am Prüfstand: Kennwerte für zwei Messreihen mit berechnetem Mittelwert
 Figure 7: Comparison of the different tire variants on the basis of indices, determined from lateral force measurements on the test drum. Indices for two series of measurements and related mean values calculated

6 Vergleich Indoor-Outdoor

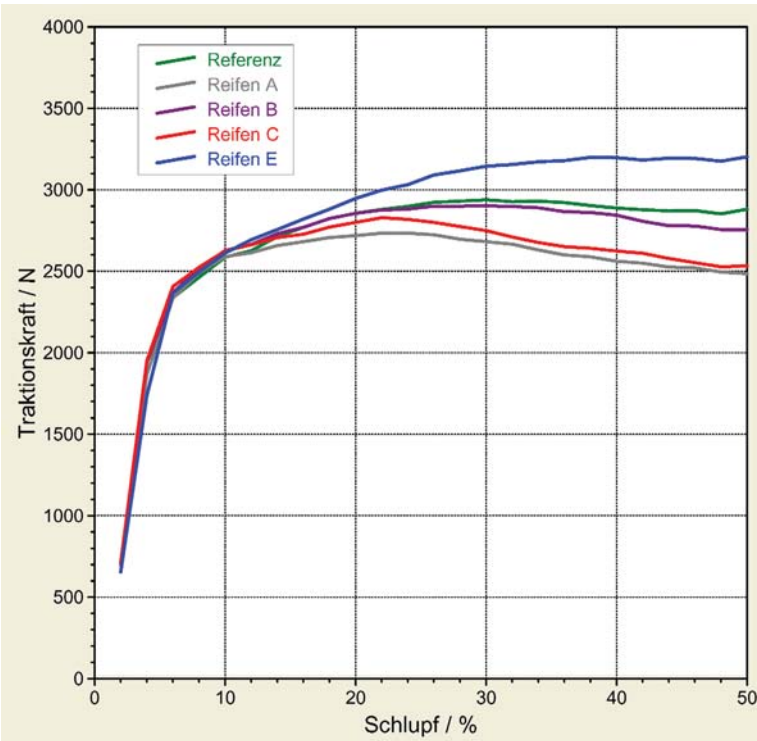


Bild 8: Beispiele für gemessene Umfangskraft-Schlupf-Kurven. Dargestellt sind die auf einem Prüfgelände mit einer festen, abgezogenen Schneedecke ermittelten Messkurven für verschiedene Reifen
 Figure 8: Examples of characteristic curves for longitudinal force / slip, as measured. Shows curves measured for different tires on a test track with a hard-packed, planed cover of snow

Seitenkräfte aufbauen als die Reifen mit vergleichsweise höherer Laufstreifenhärte. Dies ist mit der bei weicherem Gummi niedrigeren Steifigkeit der einzelnen Profilklötze und den damit bei gleichem Schräglaufwinkel geringeren Kräften, die auf den jeweiligen Profilklötz wirken, zu erklären. Der Einfluss der Gummihärte auf die Rückstellmoment-Schräglaufwinkel-Kurven ist tendenziell gleich, aber in der Ausprägung nicht ganz so deutlich, Bild 6.

Im Wesentlichen dienen die Messungen auf Kunstschnee am Reifenprüfstand zum Vergleich verschiedener Reifenvarianten. Um diese Varianten auf einfache Weise miteinander vergleichen zu können, werden Vergleichsgrößen berechnet, die das Kraftschlussverhalten des jeweiligen Testreifens relativ zum Referenzreifen beschreiben. Hierzu wird für jeden Reifen aus den gemessenen Daten in einem festgelegten Schräglaufwinkelbereich eine mittlere Seitenkraft berechnet. Dieser Wert wird auf den Wert des Referenzreifens bezogen und als Kennwert bezeichnet.

In Bild 7 sind diese Kennwerte der insgesamt sechs Reifen (ein Referenzreifen und fünf Mischungsvarianten) des Versuchsprogramms zum Einfluss der Laufflächenmischung aufgetragen. Diese Kennwerte bestätigen die aus den Kennlinien bekannte, durch die unterschiedliche Gummimischung bedingte relativ große Aufsprei-zung der einzelnen Reifen. Gleichzeitig kann aus diesem Diagramm abgelesen werden, dass die Messungen, die mit den einzelnen Reifen jeweils zweimal an verschiedenen Tagen durchgeführt wurden, sehr geringe Streuungen aufweisen.

Es kann also festgehalten werden, dass Messungen auf künstlich erzeugtem Schnee am Reifen-Innentrommel-Prüfstand unter konstanten (Schnee-, Umwelt- und Betriebs-) Bedingungen sehr gut reproduzierbare Ergebnisse liefern. Somit ist nachgewiesen, dass diese Prüfeinrichtung zur Untersuchung verschiedener Reifen, insbesondere für vergleichende Messungen von Gummimischungsvarianten, eingesetzt werden kann.

6 Vergleich Indoor-Outdoor

Bevor auf die Messergebnisse der Versuche im Freien eingegangen wird, soll zunächst das verwendete Messverfahren erläutert werden. Die vorwiegend verwendete Standardprüfung zur Bewertung des Traktionsverhaltens von Winterreifen auf verschneiten Fahrbahnen ist die Messung der Fahrzeuglängsbeschleunigung bei gleichzeitiger Messung des Reifenschlupfs der angetriebenen Achse. Dabei wird aus etwa 12 km/h das Gaspedal zügig durchgetreten,

bis nach 1 bis 2 Sekunden ein Schlupf von 50 % erreicht wird.

Um die Aussageschärfe dieses Versuches zu erhöhen, wird die Messung etwa zwanzig Mal wiederholt, so dass anschließend in zugehörigen Schlupfklassen der Mittelwert über alle Versuche gebildet werden kann. Zur Auswertung wird aus der Masse des Fahrzeugs zusammen mit der gemessenen Beschleunigung die Traktionskraft berechnet und über steigenden Schlupfklassen aufgetragen, **Bild 8**. Die Traktionskraft wird in einem definierten Schlupfbereich gemittelt und in Relation zum entsprechenden Wert eines Referenzreifens als Traktionskennziffer in Prozent ausgegeben, **Bild 9**.

Die in Bild 8 dargestellte Kurvenschar entstammt dem in Kapitel 5 bereits erwähnten Entwicklungsprogramm für Winterlaufflächenmischungen, bei dem alle Reifen einheitlich das gleiche Winterprofil aufwiesen. In Bild 9 sind die Traktionskennziffern für die untersuchten Mischungen als Balkendiagramm aufgetragen, wobei die Messprozedur an zwei verschiedenen Tagen durchgeführt wurde, um die Streuung der Ergebnisse und insbesondere den Einfluss der Schneevariabilität beurteilen zu können.

Die Korrelationsanalyse für die Mittelwerte des Indoor- und des Outdoor-Messverfahrens ergibt einen sehr hohen Korrelationskoeffizienten von $r^2 = 0,99$, **Bild 10**. Die zugeordnete Korrelationsgerade überdeckt die angegebenen Streubereiche der einzelnen Durchgänge, was die hohe Güte dieser Korrelation qualitativ bestätigt.

Bemerkenswert an dieser hohen Korrelation ist die Tatsache, dass sie zwischen einem Traktionsversuch in Längsrichtung (outdoor) und Querrichtung (indoor) beobachtet wird. Dies ist jedoch insofern nicht erstaunlich, da das Reibungsverhalten der Laufflächenmischung isotrop, also richtungsunabhängig ist. Für einen Reifenprofilvergleich hingegen wird so ein klarer Zusammenhang in aller Regel nicht gegeben sein.

Die Tatsache, dass der Seitenführungsversuch um etwa 60 % mehr aufspreizt, kann durch Wechselwirkung zwischen Profil und Mischung erklärt werden. Da die Feinschnitte des zugrunde liegenden Winterreifenprofils im Wesentlichen parallel zur Querrichtung des Reifens liegen, dominiert beim Seitenführungstest das Mischungsverhalten der Lauffläche bei reduzierter Kantenwirkung [3].

Auch die Formen der Traktions-Schlupfkurven sind mit jenen der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kurven vergleichbar: Nach dem linearen Anstieg im Haftbereich der Profilverformung differenzieren die Mischungen durch unterschiedliches Niveau im hohen Schlupfbereich, Bild 5 und Bild 8.

6 Vergleich Indoor-Outdoor

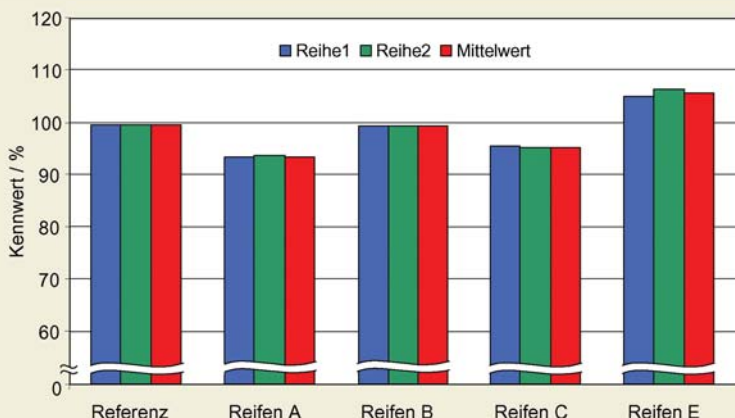


Bild 9: Vergleich der verschiedenen Reifenvarianten anhand von Kennwerten für zwei auf einem Prüfgelände durchgeführte Traktions-Messreihen und dem daraus berechneten Mittelwert

Figure 9: Comparison of different tire variants on the basis of indices for two series of traction measurements conducted on a test track and the resulting mean value

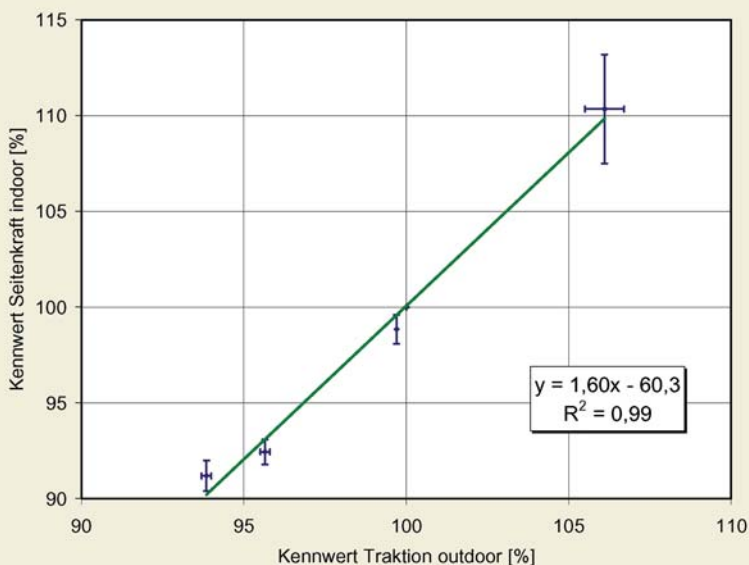


Bild 10: Korrelation zwischen Indoor-Seitenkraftmessungen und Outdoor-Traktionstests

Figure 10: Correlation between indoor lateral force measurements and outdoor traction tests

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung des Kraftschlussverhaltens von Winterreifen auf Schnee wird heute praktisch ausschließlich auf Testgeländen durchgeführt. Auf Grund der meteorologischen Randbedingungen sind daher

verlässliche Wintertests nur zu bestimmten Zeiten und mit hohem Aufwand durchzuführen. Zur Verkürzung der Entwicklungszeiten von Winterreifen ist jedoch eine ganzjährige Durchführung von Schneemessungen wünschenswert. Daher wurde am Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau der

Universität Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Continental AG ein Reifen-Schnee-Prüfstand entwickelt, der ganzjährig Tests von Winterreifen auf Laborschnee ermöglicht.

Hierzu wurde der vorhandene Reifen-Innentrommel-Prüfstand, vor allem im Bereich der Klimatisierung, modifiziert und mit einer Vorrichtung zur Herstellung von Kunstschnee ausgerüstet. Damit kann die Schneefahrbahn direkt im Prüfstand erzeugt und mit entsprechenden Einrichtungen konditioniert werden.

Mit Hilfe eines eigens für Messungen auf Schnee entwickelten Prüfverfahrens ermöglicht diese Versuchseinrichtung somit eine effiziente Durchführung von Seitenkraftmessungen. Ein Vergleich von Indoor- und Outdoor-Messungen zeigt hohe Korrelationen und unterstreicht das große Potenzial dieser Prüfeinrichtung für die Entwicklung von Winterreifen und deren Wechselwirkung zu Fahrzeugregelsystemen:

■ Nach weiterer Optimierung der Effizienz bietet eine Einbindung dieser Prüfmethode in den Entwicklungsablauf von Winterreifen weiteres Potenzial zur Verkürzung der Entwicklungszeiten.

■ Die hohe Prüfschärfe sowie die Möglichkeit von gezielten Variationen der Betriebsparameter ermöglichen ein gezieltes Studium der physikalischen Traktionsmechanismen von Winterreifen auf Schnee.

■ Die wetterunabhängige Präparation der Schneeoberfläche erlaubt darüber hinaus ein gezieltes Studium des Einflusses witterungsbedingter Veränderungen bei Outdoor-Messungen. So kann deren Einfluss auf den Reibbeiwert studiert und zur Ergänzung von Outdoor-Prüfungen herangezogen werden.

■ Des Weiteren bietet der Prüfstand die Möglichkeit, die Wechselwirkung neuer ABS-Regelsysteme und -algorithmen mit den neuen Winterreifengenerationen zu testen und so beide Technologien sorgfältig

aufeinander abzustimmen.

Dennoch wird diese Prüfmethode, auch aus Kostengründen, bestehende und anerkannte Outdoor-Prüfungen auf Schnee nicht ablösen. Die Anwendung wird aber sicherlich helfen, die Leistungsfähigkeit und Entwicklungsgeschwindigkeit moderner High-Performance-Winterreifen und ABS-Regelsysteme zu steigern und damit einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zu leisten.

Literaturhinweise

- [1] Gnadler, R.; Unrau, H.-J.; Fischlein, H.; Frey, M.: Umfangskraftverhalten von Pkw-Reifen bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen. In: ATZ (98) 1996, Nr. 8, S. 458-466
- [2] Fischlein, H.; Gnadler, R.; Unrau, H.-J.: Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenstruktur auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen bei trockener und nasser Fahrbahn: In: ATZ (103) 2001, Nr. 10, S. 950-962
- [3] Dopporto, M.; Mundl, R.; Wies, B.: Zusammenwirken von Profil und Laufflächenmischung. In: ATZ (105) 2003, Nr. 3, S. 238-249

Traction Measurements on Snow

with Internal Drum Test Bench



**By Rolf Gnadler,
Heinrich Huinink,
Michael Frey,
Reinhard Mundi,
Jürgen Sommer,
Hans-Joachim Unrau
and Burkhard Wies**

A snow test rig for tires was developed at the automotive department of the Universität Karlsruhe in collaboration with Continental AG. The test drum makes it possible to test winter tires on artificial snow throughout the year. The fact that both, roadway and environmental conditions, can be adjusted makes it possible to conduct tire tests under reproducible conditions. Drawing on a comparison with outdoor measurements, the present paper presents, inter alia, the enormous potential of this test facility for the development of winter tires.

1 Motivation

Winter tires make a crucial contribution to driving safety in wintry conditions. The transmission of forces on a snow-covered road is highly significant here. In endeavoring to improve transmission performance in a longitudinal and lateral direction, the tire developer is dependent on measuring methods with the highest possible resolution and reliability.

Nowadays traction performance on snow is tested more or less exclusively outdoors on natural snow. Meteorological conditions that vary from day to day and at different times of the day have a major influence on test results, even in regions with a stable snow cover; statistically corroborated results can be obtained only by means of elaborate test programs.

After testing winter tires in the Harz Mountains and in the Weser Hills, in the fifties Continental primarily made use of areas in the Alps where a snow cover was ensured. This was possible, however, only during the Central European winter; environmental considerations precluded testing on the glaciers all year round.

An important prerequisite for shorter winter tire development times is, nonetheless, that snow tests can be conducted throughout as much of the year as possible. That's why testing grounds all around the world are presently used – in Scandinavia, North and South America, Japan and New Zealand – as a means of decoupling development cycles from seasonal limitations.

Tests on artificial snow held the promise of new possibilities:

- outdoor testing in sufficiently cold regions, regardless of natural snow conditions
- vehicle testing in spacious, coolable rooms
- lab testing of tires on adopted tire testing rigs.

The necessary prerequisite for testing on artificial snow was proof of a sufficient correlation to test results on natural snow. To ensure this, Continental carried out a comprehensive correlation program under ideal climatic and technical conditions in Ivalo, Finland in 1996. On carefully prepared snow surfaces, a very good correlation was obtained between the test results on artificial and natural snow. Using snow guns, **Figure 1**, did not prove to be a successful idea, however. Because of insufficiently stable atmospheric conditions, the test programs proved to be time-consuming and costly.

In vehicle tests conducted in cooled rooms – in the Hurre Ski Tunnel in Voukatti, Finland, **Figure 2**, for example – major

technical problems were confronted, above all in the preparation of the surfaces. The cost of testing was exorbitant due to high rents and/or the expenses entailed for investments and energy.

This provided the motivation to turn to lab testing using a single wheel on artificial snow. Alongside driving tests, single-wheel measurements taken under strictly controlled and highly reproducible boundary conditions – for climate, snow, longitudinal and lateral slip and load specifications – are of great value. When high test accuracy is maintained (small critical differences) they also offer a chance to evaluate the impact of “small” development steps. After all, advances in development often involves the implementation of a sum of just such incremental individual steps.

Initial discussions already took place with Prof. Gnadler and engineers from Continental AG at the VDI Tire-Chassis-Road conference held in October 1995. The internal drum tire test rig at the University of Karlsruhe – on which, by the way, it was already possible to conduct ice testing – was commonly thought to offer the best prerequisites for lab snow testing.

In collaboration with Continental AG, a tire-snow test rig was developed at the Universität Karlsruhe's Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau (MKL) [Institute of Machine Design and Automotive Engineering]; the rig allows for different snow tests with a single wheel. This test facility is presented here below. The huge potential that this facility harbors for the development of winter tires is

shown on the basis of select measurements, which are then compared with measurements taken outdoors on natural snow.

2 Description of the Test Rig

A basic precondition for measuring grip on snow on a tire test rig is to use test equipment guaranteeing a high degree of measuring accuracy and reproducibility. The internal drum tire test rig at MKL, Institute of Machine Design and Automotive Engineering, department Automotive Engineering (currently: Institute for Product Development, in the future: Institute for Automotive Technology) at the Universität Karlsruhe meets this precondition. The incasing of the complete test drum in an air-conditioned chamber also allows for the taking of measurements at a constant ambient temperature over a wide range of temperatures, even well below the freezing point.

In the case of this test drum [1] the test tires, loaded by a servohydraulic wheel suspension, **Figure 3**, run on the inner side of a cylindrical drum 3.8 meters in diameter. In this case the wheel suspension allows for the continuous adjustment of the slip angle, camber angle and tire deflection, with it being possible to steer all the movements simultaneously following any specifications. A hydraulic motor is installed to drive and brake the wheel. In this regard it is of particular advantage that – unlike operation with a mechanical friction brake – stable measuring points can be targeted even beyond the maximum longitudinal force.

2 Description of the Test Rig

Internal drum test bench		
Inner diameter of the drum		3,80 m
Track surfaces		Safety-Walk several concrete surfaces several asphalt surfaces ice, snow
Top speed	- on Safety-Walk - on asphalt / concrete	200 km/h 150 km/h
Water film depth		0 ... 4 mm
Ambient temperature		-15 ... +30 °C
Slip angle		-20° ... +20°
Camber angle		-10° ... +20° (+20° ... +45°)

Figure 4: Technical data of the test drum

Among other things, the internal drum principle applied here offers the advantage that different real roadway surfaces can be installed. Alongside usual safety-walk surface it is thus possible for cassettes filled with asphalt or concrete to be fastened in segments inside the drum [2]. Above and beyond this measurements on wet, icy and even on snow-covered roads, as described below, are possible.

The forces and moments to which the wheel is subjected are measured by means of a six-component measurement hub positioned between the wheel and the wheel suspension. The hub rotates with the wheel. In this way only the forces and moments to which the wheel is subjected are measured, without being influenced by the drive shaft. This has the effect of eliminating any disturbing wheel bearing friction. **Figure 4** summarizes the key data for the test drum.

3 Snow Production and Roadway Preparation

The snow needed in preparing the roadway for testing is artificially generated directly inside the air-conditioned test drum. For this purpose a new process had to be developed for producing artificial snow as test rig space was not sufficient for using the methods usually employed to make snow on ski slopes, for example (where a throw range of approx. 30 – 50 meters is required). The new method also guarantees that the snow generated shows a consistency similar to that of natural snow, which is not the case with typical snow guns.

For the present application, a special snow gun that makes artificial snow using tap water and liquid nitrogen had to be developed. The consistency of the snow can be influenced by selection of the appropriate proportions for the individual components used in the mix. The positioning of the snow gun and the production method guarantees that the snow is evenly distributed across the roadway to form a solid snow cover thickness.

Immediately after the snow is made, the roadway is covered by very loose snow that cannot yet be used for tire testing purposes. In a further step the roadway has to be conditioned to obtain reproducible measuring conditions. With the help of a likewise newly developed method, a homogeneous roadway is created. The consistency (e.g. hardness) of the snow-covered roadway can be influenced by the conditioning parameters selected, by a corresponding combination of compressing and homogenizing operations and by the test temperature selection.

Since the snow-covered roadway is subjected to a certain wear during testing, it is necessary to treat the test roadway after a certain number of measurements have been taken. On the basis of the method described above, an efficient procedure was worked out for treating the snow-covered roadway. This procedure has been tested with success.

4 Testing Procedure Indoors

In conducting frictional force measurements on rigid road surfaces like safety-walk, asphalt or concrete, there was no occurrence of notable roadway abrasion or wear during the series of tests. As already mentioned, the relatively soft roadway surface did, however, give rise to a certain degree of wear in the course of measurements on snow. For this reason, it is not possible to take a larger number of measurements on the exactly same surface. In the course of a series of tests, roadway wear occurs and this modifies the characteristics of the snow to such an extent that its impact on measuring accuracy must be taken into account. It was thus necessary to develop test procedures that minimized snow wear, on the one hand, while at the same time rendering the measurements insensitive to changes in snow characteristics.

The example of lateral force measurements can be used to briefly explain the principle behind the test procedure applied. To generate lateral forces for these measurements, the slip angle of the initially straight-running test wheel was continuously increased up to six degrees in each direction and then – likewise continuously – returned to a slip angle of zero. To minimize snow wear, in this case, the slip angle was adjusted at a somewhat faster rate than is normal when measuring lateral force on rigid road surfaces.

A key characteristic of the test procedure is that each tire is evaluated in relation to a so-called reference tire. For this purpose the respective test tire and the reference tire are subjected alternately to lateral force measurements under identical conditions. Proceeding in this manner, the changes in roadway characteristics occurring from one measurement to another with the two tires are relatively minor. Thanks to the alternating testing of the two tires, the changes in roadway characteristics are, at the same time, also recorded. The multiple measurements, taken under the same operating parameters in each case, make it possible to determine the impact of occurring snow wear on the respective tire's frictional force behaviour. This impact can then also be taken into account in the evaluation of the measurements.

5 Testing Results Indoors

A large number of measurements have already been carried out applying the measuring procedure described above. By way of example, a few lateral force measuring results are presented below. **Figure 5** shows lateral force characteristic curves and **Figure 6** shows the related aligning torque characteristic curves for three different tires of size 205/55 R 16 in the program used to test different rubber compounds. These tires had tread compounds differing mainly with respect to hardness. They all had the same winter tread pattern ContiWinterContact TS 790 V, though.

The curves of lateral force vs. slip angle, **Figure 5**, show the impact of the rubber compound, which is clearly evident in the marked spread of the lateral forces transmitted. Higher maximum lateral forces were obtained with softer rubber compounds. Of interest here is the fact that when slip angles are small, tires with softer rubber compounds initially generate more modest lateral forces than tires having comparatively hard treads. This can be explained by the lower tread block stiffness in the case of softer rubber. The respective blocks are thus subjected to more modest forces with the same slip angle.

The impact of rubber hardness on the aligning torque-slip angle curves tends to be the same, although not quite as conspicuous, **Figure 6**. The tire rig measurements taken on artificial snow serve largely as a means of comparing different tire variants. To be allow for uncomplicated comparison of these variants, referenced indices are calculated that describe the traction performance of the respective test tire in relation to the reference tire. For that purpose a mean lateral force is calculated for each tire from the data gathered in a defined slip angle range. This value relates to the value of the reference tire and is given as an index. **Figure 7** plots the indices for all six tires (a reference tire and five compounds variants) in the program used to test the impact of tread compounds. These indices confirm what was shown by the characteristic curves, i.e. a relatively wide compound-related spread for the individual tires. At the same time it can be seen from the diagram that very little spread is shown in the measurements taken on the individual tires twice each on different days.

It can thus be demonstrated that measurements taken on the internal tire test drum using artificially made snow deliver highly reproducible results under constant conditions (for snow, environment and operation). That proves that this test facility can provide service in investigating differ-

ent tires, and in particular in comparative measurements of tread compound variants.

6 Indoor-Outdoor Comparison

Before dealing with the measuring results obtained in outdoor testing, the measuring method applied should first be elucidated. The standard test primarily used to evaluate the traction of winter tires on snow-covered roadways is the measurement of longitudinal vehicle acceleration accompanied by measurement of tire slip on the driven axle. This involves slamming on the gas pedal at a speed of roughly 12 km/h until slip of 50% is attained after 1 to 2 seconds. To render the findings more meaningful, the measurement is repeated about twenty times so that the average of all tests can be calculated for related slip classes. For evaluation, the tractive force is calculated from the mass of the vehicle and the measured acceleration and then plotted versus increasing slip classes, **Figure 8**. The tractive force is determined in a defined slip range and shown as percentile traction index relative to the corresponding value of a reference tire, **Figure 9**.

The group of curves shown in **Figure 8** is derived from the winter tread compound development program already mentioned in section 5. All tires were compared with the same winter tread pattern. In **Figure 9** the traction indices for the compounds tested are plotted on a bar chart, with the measuring procedure being carried out on two different days to allow for assessment of the spread of results and especially of the impact of snow variability.

Analysis of the mean values for the two measuring methods (indoor and outdoor) shows a very high correlation coefficient of $r^2 = 0.99$, **Figure 10**. The related correlation line overlaps the given spreads for the individual passes, thereby corroborating the high quality of this correlation.

Worth noting in the case of this high correlation is the fact that it is observed between a traction test in longitudinal direction (outdoor) and in lateral direction (indoor). This is not surprising insofar as the

tractional behavior of the tread compound is isotropic, i.e. directionally independent. For a comparison of tire tread patterns, on the other hand, such a clear correlation will be not generally present. The fact that the cornering test shows a spread that is about 60% greater can be explained by the interaction of tread pattern and compound. As the sipes in the underlying winter tire tread pattern run basically parallel to the tire's lateral direction, the tread compound plays the predominant role in cornering tests because of the reduced edge effect [3].

The shapes of the traction/slip curves are also comparative to those of the lateral force/slip angle curves: a linear ascent reflecting the adhesive phase during tread pattern deformation is followed by varying levels for the different compounds in the high slip phase, **Figure 5** and **Figure 8**.

7 Summary and Outlook

Investigations into winter tire traction on snow are presently conducted almost exclusively on test tracks. With the meteorological conditions being as they are, reliable winter tests can thus be carried out only at certain times of the year and entail a major expense. To shorten winter tire development times, it would be preferable, however, if snow measurements could be taken the whole year through.

For that reason a snow test rig for tires was developed at the Universität Karlsruhe's Institute of Machine Design and Automotive Engineering in collaboration with Continental AG. The rig makes it possible to test winter tires on lab snow throughout the year.

To achieve this, the existing internal tire test drum was modified, mainly in terms of air conditioning, and a device for making artificial snow was added to it. With these changes a snow-covered roadway can now be generated directly in the test drum and conditioned with appropriate devices. With help of a test method developed specifically for measurements on snow this test bench allows an efficient performance of

lateral force measurements.

A comparison of these lab measurements with outdoor measurements shows a high correlation and underscores the high potential of the test facility for the development of winter tires and their interaction with automotive control systems:

- After further upgrading efficiency, this test methodology can be integrated into the winter tire development processes. This provides added potential for shorter development cycles.

- The high test accuracy and the possibility of specific variations in the operating parameters allow for a pinpointed study of the physics of the traction mechanics involved in winter tires on snow.

- Above and beyond this, the weather-dependent preparation of the snow surface allows for a pinpointed study of the impact of atmospheric changes on outdoor measurements. Their influence on traction coefficients, for example, can be investigated and used to complement outdoor tests.

- The test rig also offers the possibility of testing the interaction of the new ABS control systems/algorithms and the new winter tire generations with the aim of carefully synchronizing the two technologies.

This test method will not, for all that, replace existing and recognized outdoor tests on snow, if for cost reasons alone. The application will, however, certainly help to enhance the performance capability and speed of development of Continental's modern high-performance winter tires and ABS control systems and thus constitute a major contribution to enhance traffic safety.

References

- [1] Gnadler, R.; Unrau, H.-J.; Fischlein, H.; Frey, M.: Umfangskraftverhalten von Pkw-Reifen bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen, ATZ (98) 1996, Nr. 8, S. 458-466
- [2] Fischlein, H.; Gnadler, R.; Unrau, H.-J.: Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenstruktur auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen bei trockener und nasser Fahrbahn, ATZ (103) 2001, Nr. 10, S. 950-962
- [3] Dopporto, M.; Mundl, R.; Wies, B.: Zusammenwirken von Profil und Laufflächenmischung, ATZ (105) 2003, Nr. 3, S. 238-249