

Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 20

bast

Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand

von

Klaus Sander

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 20

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A – Allgemeines
B – Brücken- und Ingenieurbau
F – Fahrzeugtechnik
M – Mensch und Sicherheit
S – Straßenbau
V – Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt- Str. 74 –76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 95.530:
Vergleich von Rollwiderstandsuntersuchungen auf der Straße und im Prüfstand

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon (0 22 04) 43 - 0
Telefax (0 22 04) 43 - 6 74

Redaktion:

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax (04 71) 9 45 44 88

ISSN 0943-9307

ISBN 3-89429-718-2

Bergisch Gladbach, Juni 1996

Kurzfassung · Abstract · Résumé

Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand

Dem Benzinverbrauch heutiger moderner Kraftfahrzeuge wird in zunehmendem Maße Beachtung geschenkt, um dem Konflikt zwischen Mobilität einerseits und Umweltschutz andererseits entgegenzuwirken. Ein Beitrag hierzu wird in der Reduzierung des Rollwiderstands der Bereifung mit einem Potential von bis zu 5% gesehen. Insbesondere bei Geschwindigkeiten unterhalb von 80 km/h dominiert der Roll- gegenüber dem Luftwiderstand.

Bei der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden Systeme und Verfahren für Messungen des Rollwiderstandes von Pkw-Reifen in einem Innentrommelprüfstand sowie mit einem Meßanhänger entwickelt. In der vorliegenden Untersuchung wird gezielt der Frage nachgegangen, inwieweit Ergebnisse einer Messung im Prüfstand auf Ergebnisse einer Straßenmessung übertragen werden können und umgekehrt.

Der Vergleich zeigt, daß die Meßgenauigkeit mit dem Anhänger auf der Straße im Mittel geringer anzusetzen ist und erwartungsgemäß nicht die Aussagequalität von Messungen im Prüfstandsversuch erreicht wird.

Dennoch weist jedes System Vorteile auf: So steht mit der Rollwiderstandsmessung im Prüfstand ein Verfahren zur Verfügung, bei dem als Schwerpunkt mehr der reifenseitige als der fahrbahnseitige Aspekt des Rollwiderstandes im Vordergrund steht. Hingegen kann mit dem Meßanhänger vornehmlich der Einfluß der Oberflächeneigenschaften von verschiedenartigen Fahrbahnen untersucht werden.

Beide Systeme ergänzen sich und können bei Fragestellungen zum Rollwiderstand sowohl von Reifen als auch von Fahrbahnoberflächen eingesetzt werden.

Comparative Measurements of the Rolling Resistance on Highways and in the Laboratory

Attention is increasingly paid to the petrol consumption of modern motor vehicles to counteract the conflict between mobility on the one hand and environmental protection on the other. The reduction of the rolling resistance of tyres, a measure with a potential of up to 5 %, might contribute to solving this problem. Particularly at speeds below 80 km/h, the rolling resistance exceeds the air resistance.

At the Federal Highway Research Institute (BAST), systems and procedures to measure the rolling resistance of car tyres at the Interior Drum Testing Facility and by means of a monitoring trailer have been developed. In this study, the extent of comparability between measurements at the testing facility and roadway measurements is looked into.

As was expected, the comparison reveals that the measurements of the monitoring trailer, on average, are less accurate and do not attain the quality of information yielded by measurements at the testing facility.

Still, each of these systems has its advantages: in the measurement of the rolling resistance at the testing facility the focus is more on the tyre aspect of rolling resistance than on role played by the roadway in it. The monitoring trailer, on the other hand, primarily allows studying the effects of various roadway surface characteristics on rolling resistance.

Both systems complement one another and can thus be used both to study the rolling resistance of tyres and that of roadway surfaces.

Mesures comparatives de la résistance au roulement, effectuées sur la route et sur le banc d'essai

Dans un effort de maîtriser le conflit entre la mobilité d'un côté et la protection de l'environnement de l'autre côté, la consommation d'essence des véhicules modernes se trouve de plus en plus au centre d'intérêt. La réduction de la résistance au roulement des pneus, avec un potentiel de jusqu'à 5 %, pourrait contribuer à résoudre ce problème. C'est en particulier au-dessous d'une vitesse de 80 km/h que la résistance au roulement résulte plus importante que la résistance de l'air.

L'Institut fédéral de recherches routières (BAST) a mis au point des systèmes et procédés capables de mesurer la résistance au roulement des pneus de voitures particulières dans un tambour giratoire ainsi que sur la route, à l'aide d'une remorque équipée de dispositifs de mesure. La présente étude s'applique à la question de savoir dans quelle mesure les résultats obtenus sur le banc d'essai sont comparables à ceux issus de mesures sur la route.

Comme on s'y attendait, la comparaison des deux procédés fait ressortir que la précision obtenue avec la remorque de mesure est en moyenne plus

faible et n'atteint pas la qualité d'information fournie par les mesures effectuées sur le banc d'essai.

Pourtant, chacun des deux procédés de mesure de la résistance au roulement a ses avantages: dans le cas du tambour giratoire, ce sont les aspects des pneus qui prévalent contre ceux du revêtement. Par contre, la remorque de mesure se prête plutôt à mesurer les influences des caractéristiques superficielles de différents types de revêtements.

Les deux systèmes sont complémentaires et peuvent être mis en oeuvre pour la mesure de la résistance au roulement de pneus ainsi que de surfaces de revêtements.

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Problemstellung	7
3	Zum Einfluß der Randbedingungen auf den Rollwiderstand	7
4	Einrichtungen und Methodik zur Messung des Rollwiderstandes	9
4.1	Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn	10
4.2	Meßanhänger	13
4.3	Meßmethodik zur Rollwiderstands- messung	15
4.4	Weiterentwicklung des Meßanhängers	16
4.4.1	Grundsätzliche Überlegungen	16
4.4.2	Realisierung	16
5	Zur Übertragbarkeit von Messungen im Prüfstand und auf der Straße	18
6	Versuchsgestaltung	21
6.1	Prüfreifen	22
6.2	Versuchsfahrbahnen	23
7	Versuchsdurchführung	26
7.1	Versuche im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn	26
7.2	Fahrversuche auf dem Testgelände	27
7.3	Fahrversuche auf der A555	28
8	Versuchsergebnisse	28
8.1	Rollwiderstandsmessungen	28
8.1.1	Prüfstandsversuche	28
8.1.2	Fahrversuche auf dem Testgelände	29
8.1.3	Fahrversuche auf der A555	29
8.2	Zum Einfluß der Textur	31
8.2.1	Prüfstandsversuche	31
8.2.2	Fahrversuche auf der A555	31
9	Vergleich und Analyse	35
9.1	Rollwiderstand	35
9.2	Einfluß der Textur	36
10	Zusammenfassung	37
	Literatur	38
	Anlagen	39

1 Einleitung

Dem Benzinverbrauch heutiger moderner Kraftfahrzeuge wird in zunehmendem Maße Beachtung geschenkt. Vor dem Hintergrund eines gestiegenen Umweltbewußtseins und wegen der weiter zunehmenden Schadstoffemissionen der Gesamtheit der in der Bundesrepublik Deutschland bewegten Fahrzeuge (Pkw und Lkw) werden inzwischen vermehrt von den Fahrzeugherstellern Anstrengungen unternommen, um dem Konflikt zwischen Mobilität einerseits und Umweltschutz andererseits entgegenzuwirken. Auf politischer Ebene werden ebenfalls erste Ziele und Vorgaben (3-Liter-Auto) entwickelt, um eine langfristige Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs der Kraftfahrzeuge zu erreichen.

Neben der Entwicklung energiesparender Antriebskonzepte und der Reduzierung von Motorleistung und Fahrzeuggewicht wird unter anderem auch in der Reduzierung des Rollwiderstand der Bereifung - der insbesondere bei geringer Geschwindigkeit unterhalb von 80 km/h gegenüber dem Luftwiderstand dominiert - ein möglicher Beitrag mit einem Potential von bis zu 5 % auf dem Wege zum 3-Liter-Auto gesehen [1].

Neben dem Beitrag auf Seiten der Bereifung sind in Zukunft auch Entwicklungen rollwiderstandsarmer Fahrbahnbeläge denkbar, da bei der Suche nach lärmarmen oder besonders griffigen Decken auch der Rollwiderstandsaspekt immer mit berücksichtigt werden muß, wenn für die Zukunft sämtliche Potentiale zur Reduzierung der Schadstoffemissionen der Fahrzeuge ausgeschöpft werden sollen.

Aus diesem Grund wurden bei der Bundesanstalt für Straßenwesen frühzeitig Meßmethoden und -einrichtungen entwickelt und erprobt [2], mit denen der Rollwiderstand von Pkw-Reifen sowohl in einem Innentrommelprüfstand als auch mit einem Meßanhänger auf der Straße gemessen werden kann.

2 Problemstellung

Die bei der BAST entwickelten Meßverfahren wurden in der Vergangenheit mit gutem Erfolg bei mehreren Untersuchungen zum Rollwiderstand von unterschiedlichen Pkw-Reifen und Fahrbahndecken eingesetzt [3],[4].

Bislang war jedoch ein direkter Vergleich von Meßergebnissen, die im Prüfstands- oder Straßenversuch erzielt worden waren, nicht möglich, da zum einen zwischenzeitlich eine Alterung der vor-

handenen Rollwiderstandsreferenzreifen - dies sind Reifen, deren Rollwiderstände bekannt sind - eingetreten war oder zum anderen eine identische oder wenigstens vergleichbare Fahrbahntextur für die Versuche nicht bereitgestellt werden konnte.

Nachdem unter anderem auch der Textureinfluß auf den Rollwiderstand von unterschiedlichen Fahrbahndecken untersucht worden war [5], konnte nunmehr in einer vergleichenden Betrachtung eine Überprüfung der Eigenschaften von Methodik und Meßeinrichtung sowohl für die Prüfstandsmessung als auch für die Straßenmessung stattfinden, die neben dem reifenspezifischen Rollwiderstand insbesondere auch den fahrbahnseitigen Einfluß auf den Rollwiderstand umfassen sollte.

Eine umfassende Beurteilung muß zum einen zunächst hinsichtlich der Differenzierung des Rollwiderstandes unterschiedlicher Reifen erfolgen. Die hierbei eingesetzten Fahrbahnoberflächen müssen weitgehend vergleichbar sein. Zum anderen sollte die Eignung von Meßsystem und -methodik auch anhand der Differenzierung von Fahrbahnbelägen mit unterschiedlichen Textureigenschaften überprüft werden. Ein Einfluß durch unterschiedliche Reifentypen ist nur gering ausgeprägt und kann vernachlässigt werden.

Zuvor war eine Weiterentwicklung der Meßtechnik des Rollwiderstandsmeßanhängers unerläßlich, wie es bereits in [2] für den weiteren zukünftigen Einsatz des Meßanhängers in der Praxis gefordert wurde. Eine ausführliche Darstellung der durchgeführten Maßnahmen erfolgt weiter unten in Kap. 4.4.

3 Zum Einfluß der Randbedingungen auf den Rollwiderstand

Bevor die spezifischen Eigenschaften der bei der BAST eingesetzten beiden Meßsysteme diskutiert werden, soll zunächst in einer grundsätzlichen Betrachtung auf den allgemeinen Einfluß der Randbedingungen bei der Messung des Rollwiderstandes eingegangen werden.

Die Messung des Rollwiderstandes ist mit den üblichen Verfahren und Anordnungen nur indirekt möglich, da der beim Abrollen eines Reifens auftretende Widerstand zunächst ursächlich als skalare Größe eines Energieverlustes pro Wegeinheit (Maßeinheit Nm/m) definiert ist. Sämtliche Meßverfahren vermeiden wegen des hohen Aufwandes eine direkte Messung des Energieverlustes und

messen indirekt, z.B. Reaktionskräfte oder Drehmomente. Dies gilt sowohl für Anordnungen in Prüfständen als auch für die bei Meßanhängern eingesetzten Meßmechaniken.

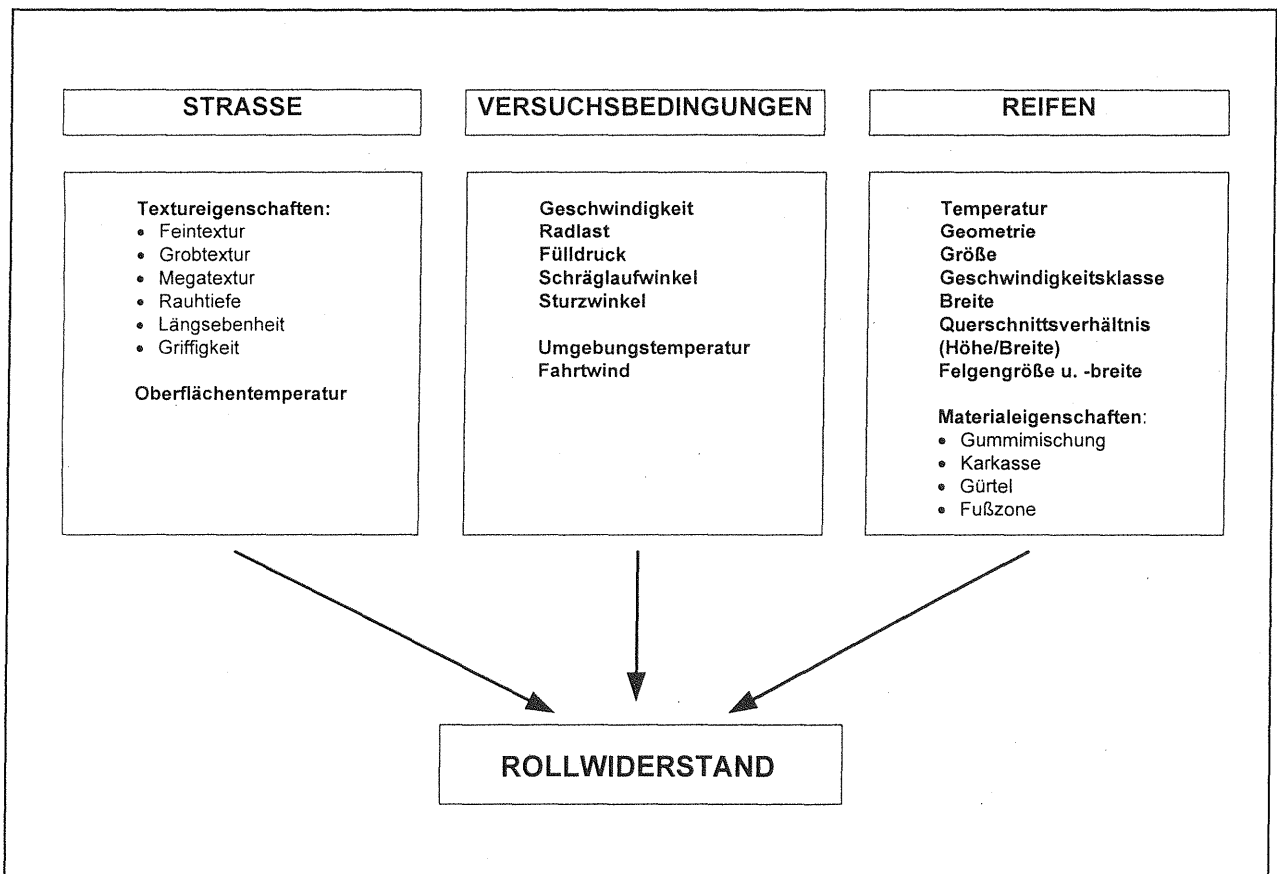
Eine grundsätzliche Arbeit zum Rollwiderstand und dessen Randparametern findet sich in [6], aus der die wesentlichen Größen nachfolgend in Tabelle 3.1 zusammengestellt sind. Mit den zwischenzeitlich vorliegenden Ergebnissen von eigenen Untersuchungen zum Einfluß der Textur auf den Rollwiderstand wurden die straßenseitigen Komponenten, die bislang in der Literatur nur wenig behandelt wurden, ergänzt. Weiterhin ist anzumerken, daß eine Differenzierung hinsichtlich des Meßsystems - Prüfstand oder Meßanhänger - hier noch nicht erfolgt.

Bei den durch drei Kategorien definierten Einflußgrößen auf den Rollwiderstand - Straße, Versuchsbedingungen und Reifen - ist die Temperatur als gemeinsamer Begriff zu verzeichnen. Bei den straßenseitigen Größen zeigt sich dies in der Oberflächentemperatur der Decke als Funktion der thermischen Eigenschaften des Fahrbahnmaterials (Emissionsfaktor, Reflexionsgrad, Wärmeleitfähig-

keit usw.). Bei den allgemeinen Versuchsbedingungen tritt der Temperatureinfluß in der Temperatur der Umgebungsluft auf. Schließlich ist auf der Seite des Reifens die Eigentemperatur zu berücksichtigen, die von der Radlast, Geschwindigkeit und Fülldruck mit gegenseitiger Beeinflussung der beteiligten Größen abhängt.

Es muß ferner berücksichtigt werden, daß einerseits die Wärmeleitfähigkeit zwischen Fahrbahnoberfläche und Reifenlatsch, andererseits aber auch der Fahrwind - im Prüfstandsversuch als Anströmung des Prüfrades - einen entscheidenden Einfluß auf die Temperaturverhältnisse am und im Reifen haben.

Hierdurch wird bereits deutlich, daß selbst unter idealen Bedingungen schon allein aufgrund des Parameters Temperatur eine Herleitung einer Übertragbarkeit zwischen Prüfstands- und Straßenmessung nur mit großen Schwierigkeiten gelingen kann. In gleicher Weise läßt sich eine komplexe, gegenseitige Abhängigkeit zwischen Radlast, Geschwindigkeit, und Fülldruck aufzeigen, die hier jedoch nicht weiter vertieft werden soll.



Tab. 3.1: Zusammenstellung der wichtigsten Einflußgrößen auf den Rollwiderstand eines Pkw-Reifens

Aufgrund dieser allgemeinen Problematik wird eine Versuchsanordnung zur Messung des Rollwiderstandes so ausgelegt sein müssen, daß entweder die Konstanz der fraglichen Randbedingungen gewährleistet wird - z.B. durch Regelung der Raumtemperatur bei Prüfstandsversuchen - oder mittels geeigneter Meßmethodiken der jeweilige Einfluß der Störgrößen minimiert wird.

In der Literatur finden sich vielfach Beispiele für sog. Ringversuche von Rollwiderstandsmessungen, bei denen im allgemeinen erhebliche Streuungen der einzelnen gemessenen Werte zu verzeichnen sind [7],[8]. Wie groß diese Streuungen im Absolutbetrag des Rollwiderstandes ein und desselben Reifens in verschiedenen Instituten und mit unterschiedlichen Meßeinrichtungen üblicherweise ausfallen, verdeutlicht sehr anschaulich eine Darstellung aus [9], die beispielhaft eine Gegenüberstellung von Messungen in verschiedenen Prüfständen und mit einem Meßfahrzeug auf der Straße zeigt (Bild 3.1).

Dieses Beispiel stellt nicht eine selten anzutreffende Ausnahme, sondern kann vielmehr als eine allgemeine Regel einer Rollwiderstandsmessung angesehen werden, daß selbst in perfekt ausge-

rüsteten und methodisch präzise arbeitenden Instituten erhebliche Abweichungen bei Rollwiderstandsmessungen ein und desselben Reifens auftreten. Hierdurch wird die Erwartung deutlich, daß ein Vergleich von Ergebnissen, die mit unterschiedlichen Meßsystemen und -methodiken erzielt wurden, mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sein kann.

4 Einrichtungen und Methodik zur Messung des Rollwiderstandes

Nachfolgend werden in verkürzter Form die wesentlichen Eigenschaften der zu vergleichenden Meßeinrichtungen dargestellt, da ausgehend von den in Kap. 3 dargelegten allgemeinen Einflußgrößen einer Rollwiderstandsmessung die in Kap. 5 ausgeführten Bewertungen verständlich werden. Bei der Betrachtung muß auch die am jeweiligen Meßsystem eingesetzte Meßmethodik Berücksichtigung finden, so daß an dieser Stelle die für diese Systeme entwickelten Verfahren hier kurz vorgestellt werden. Eine ausführliche Darstellung findet sich in [2].

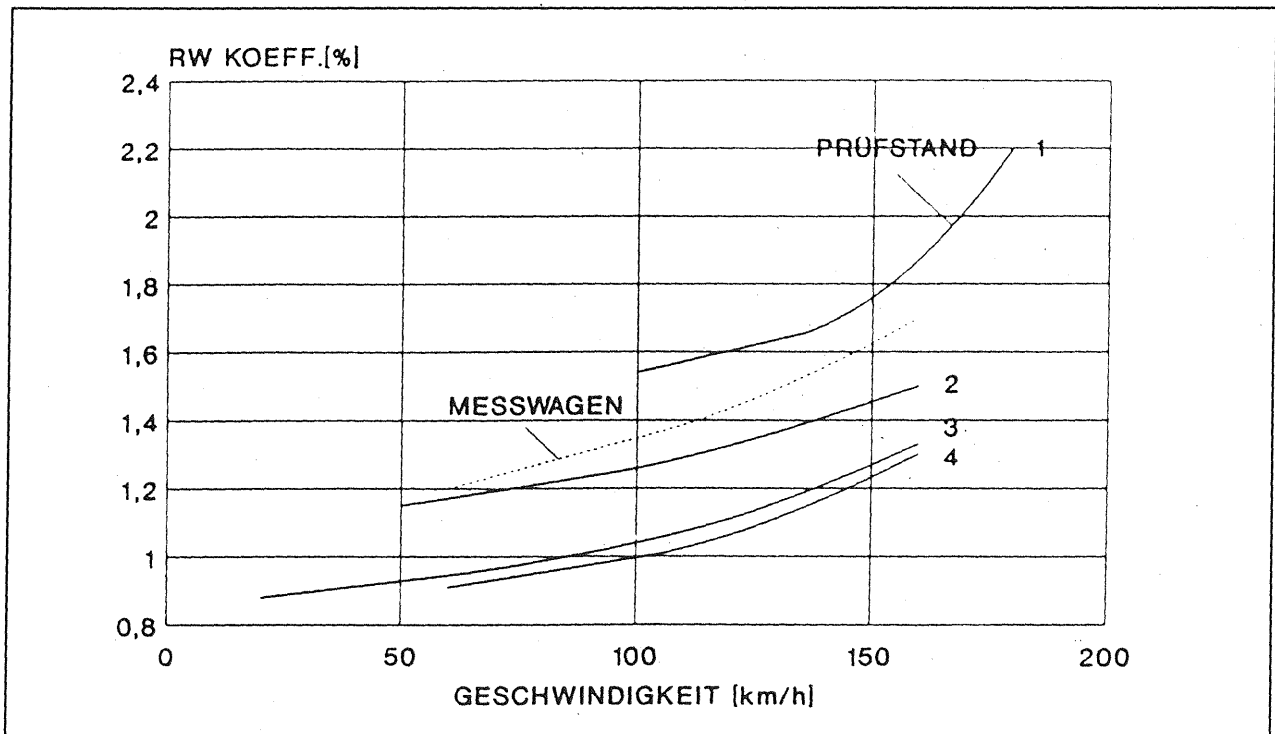


Bild 3.1: Rollwiderstandskoeffizienten, auf verschiedenen Prüfständen und mit einem Meßwagen ermittelt

4.1 Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn

Der Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (PFF) wurde 1990 bei der BAST in Betrieb genommen [13]. Er weist nicht nur aufgrund seiner Größe, sondern vielmehr auch wegen der erstmaligen Anwendung des Magnetlagerungsprinzips eine Sonderstellung unter den vielen bislang realisierten Konstruktionen für einen Prüfstand nach dem Innentrommelprinzip auf (Bild 4.1). Der beidseitig offene Kreisring mit einem Innendurchmesser von 5,5 m und einem Gewicht von 18000 kg wird über Elektromagnetgruppen berührungsfrei gelagert und geführt. Die Hauptkräfte übernehmen dabei die im Tiefpunkt des offenen Kreisrings angeordneten Tragmagnetgruppen. Zur Stabilisierung des Ringes in vertikaler und axialer Richtung sind gesonderte Trag- und Führeinheiten vorgesehen (Bild 4.2).

Das Prüfrad wird durch eine verfahrbare Radstation geführt. Elektrische Stellzylinder erlauben die dynamische Verstellung des Schräglauf-, Sturz- und Nachlaufwinkels am Prüfrad. Die Radlast wird durch eine pneumatisch geregelte Doppelluftfe-

derinheit aufgebracht; sämtliche am Rad wirkenden Kräfte werden über eine oberhalb der Radführung integrierte Dreikomponenten-Kraftmeßeinheit gemessen (Bild 4.3). Der Antrieb des Rades erfolgt durch einen in der Drehzahl stufenlos einstellbaren Asynchronmotor mit einer Leistung von 50 kW.

Die frei zugängliche Innenfläche des Kreisrings mit ca. 18 m Umfangslänge kann mit einer Fahrbahn versehen werden. Diese wird von 18 mit einem Spezialverfahren befüllten Belagskassetten gebildet. Zement- und Asphaltbetonfahrbahnen bis zu einem Größtkorn von 16 mm sind bei einer Fahrbahnbelagsdicke von ca. 40 mm realisierbar. In Tabelle 4.1 sind die technischen Daten des Prüfstands Fahrzeug/Fahrbahn zusammengestellt.

Bei Rollwiderstandsuntersuchungen wird die sonst für Versuche mit hohen Umfangs- und Seitenkräften vorgesehene stabile Längs- und Querlenker-einheit gegen eine leichte Radanlenkung ausgetauscht.

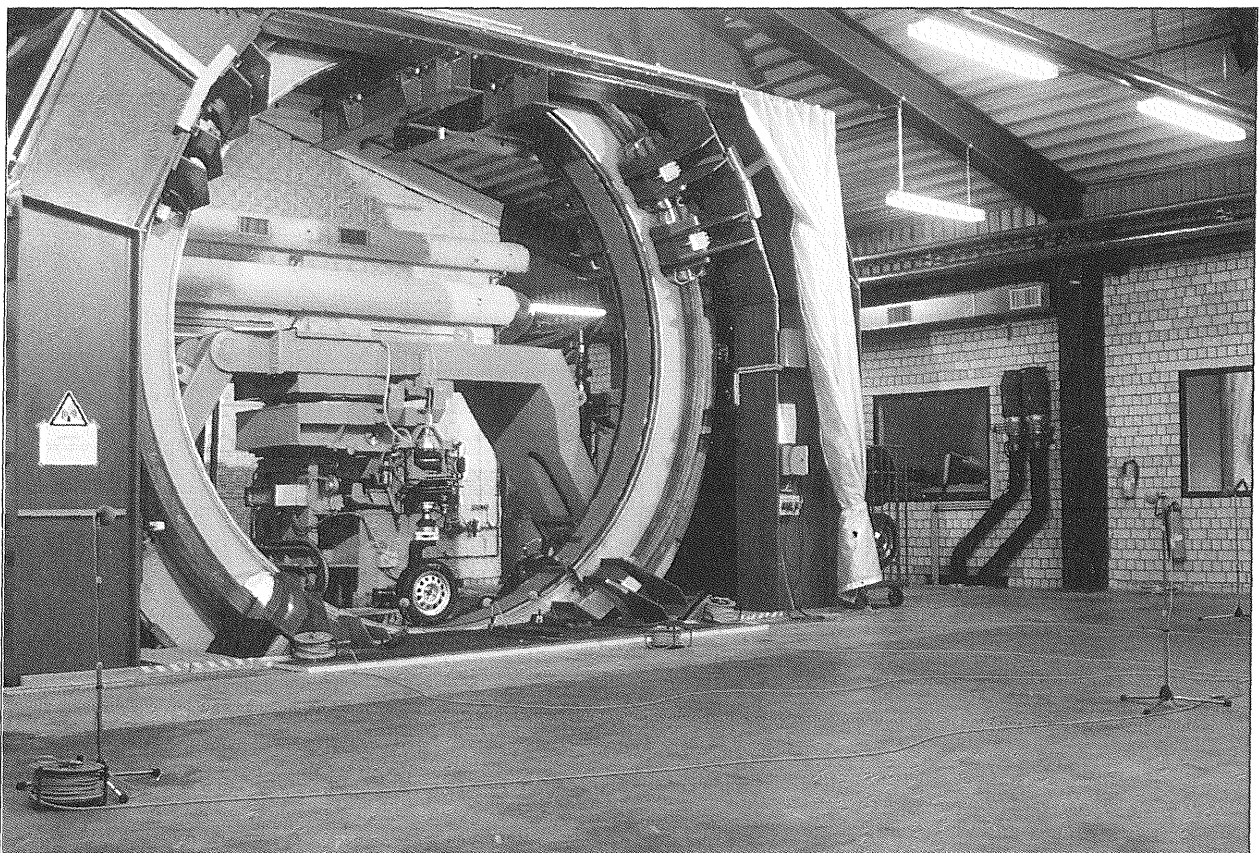


Bild 4.1: Ansicht des Prüfstandes Fahrzeug/Fahrbahn

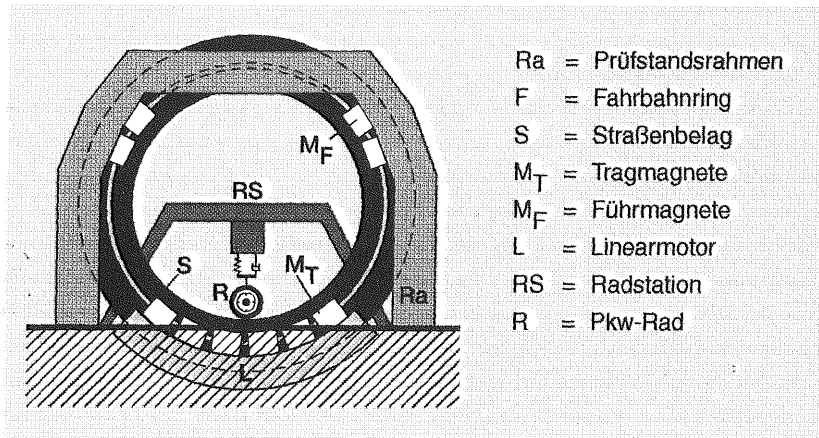


Bild 4.2: Schematischer Aufbau des PFF

Innendurchmesser des Fahrbahnringes:	5,50 m
Breite der Fahrbahn:	0,50 m
Dicke des Fahrbahnbelages:	40 mm
Dimensionen der Pkw-Räder:	4 x 13 ... 7 x 15
Fahrgeschwindigkeit:	0 ... ± 260 km/h
Schlupf:	0 ... ± 100 %
Radlast:	0 ... 10 kN
Rollspur:	0 ... ± 200 mm
Schräglaufwinkel:	0 ... ± 30° (... -75°)
Sturzwinkel:	0 ... ± 6°
Nachlaufwinkel:	0 ... ± 6°
Leistungsaufnahme der Magnetlagerung:	16 kW
Antriebsleistung der Trommel:	200 kW
Antriebsleistung des Rades:	50 kW

Tab. 4.1: Technische Daten des PFF

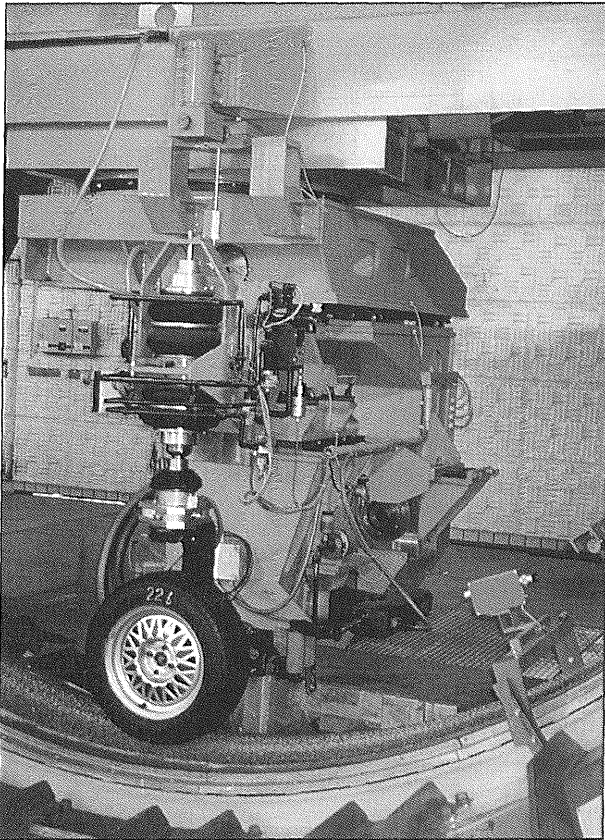


Bild 4.3: Radstation des PFF mit Radträger, Kraftmeßsystem und pneumatischer Doppelluftfeder zur Radbelastung

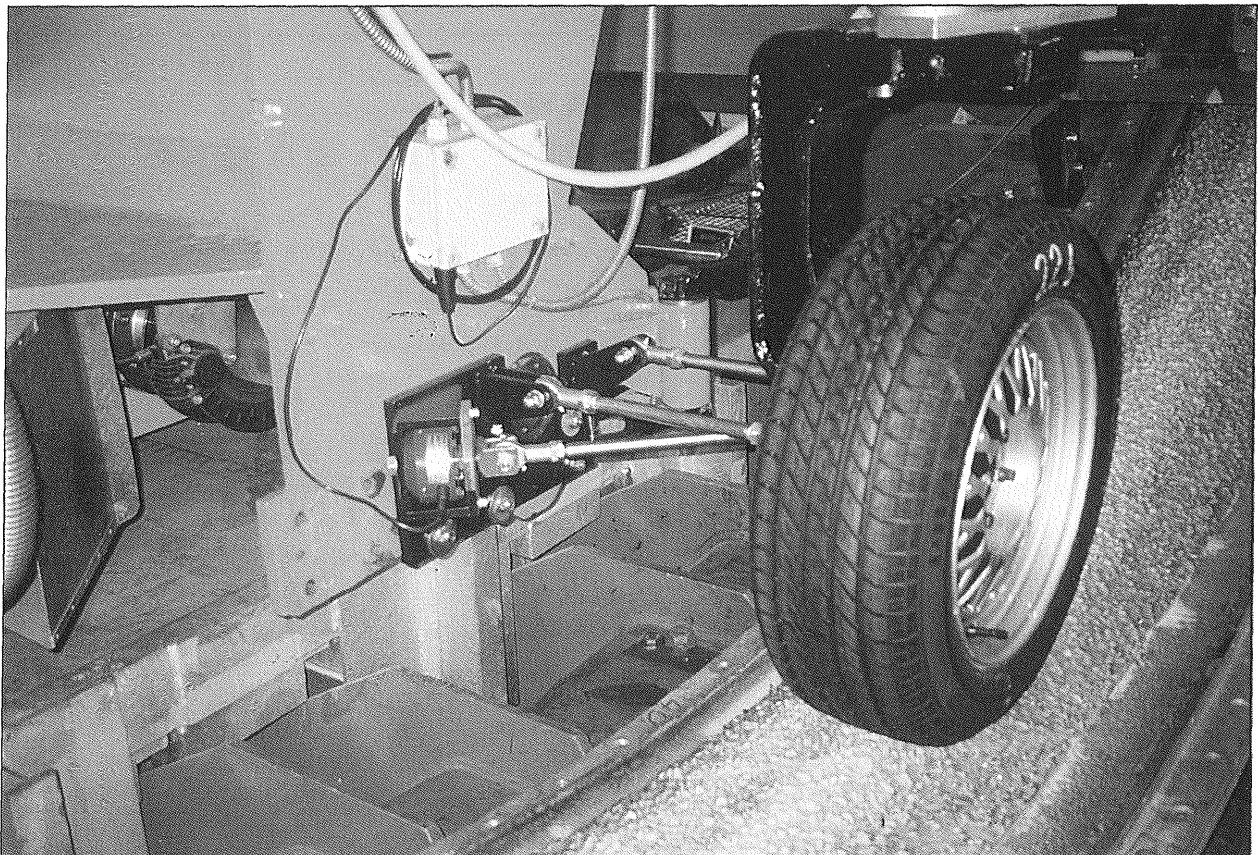


Bild 4.4: DMS-Aufnehmer zur Messung der Längskraft

Durch Verwendung von nadelgelagerten Gelenkköpfen mit geringer Reibung und Spiel für beide Querlenker und den diagonal angeordneten Meßlenker wird eine präzise und weitgehend reibungs- und rückwirkungsfreie Führung des Prüfrades erzielt. Ein spezieller DMS-Aufnehmer mit hoher dynamischer Belastbarkeit in Meßrichtung (Meßbereich $\pm 1,25$ kN) ist am prüfstandsseitigen Gelenkpunkt des Meßlenkers angeordnet und erfaßt die Horizontalkomponente der Stützkraft (Bild 4.4).

4.2 Meßanhänger

Im Rahmen eines umfangreichen Untersuchungsprogramms zur Verkehrssicherheit von PKW-Reifen wurde ein Meßanhänger für Straßenversuche zur Beurteilung der Reifenbelastung und der Schnellauffestigkeit von PKW-Reifen gebaut, der bereits unter anderem auch für die Messung des Rollwiderstandes vorbereitet war [10].

Das Konzept des Anhängers sieht hierbei die Anordnung des Prüfrades als drittes Rad innerhalb eines serienmäßig hergestellten, einachsigen Anhängerchassis vor, wobei das Hauptelement des

Meßanhängers durch eine Radführung mit integrierter Kraftmeßeinrichtung für die Vertikal- und Längskraft gebildet wird. Zur Radbelastung war ein pneumatischer Stellzylinder vorgesehen. Für aussagefähige Rollwiderstandsmessungen war jedoch eine umfangreiche Neukonstruktion der Radführung notwendig, deren Schema Bild 4.5 zeigt.

Das Prüfrad wird an insgesamt fünf Gelenkstäben - drei Querlenker und zwei Längslenker in Parallelogrammanordnung - mit Sturz = 0 - in den Punkten B und C geführt. Der untere Längslenker L_u ist mit der Kraftmeßdose K_1 zur Messung der durch den Rollwiderstand hervorgerufenen Radumfangskraft F_R ausgestattet. Die vertikale Ausrichtung der Achse ABC in Richtung der Radaufstandskraft F_v wird durch eine Neigungsverstellung der Führungsstütze erreicht. Die Luftfederkraft F_z wird im Gelenkpunkt C des oberen Längslenkers reibungsarm über ein Nadellager eingeleitet. Die realisierte Radführung des Meßanhängers zeigt Bild 4.6. In Bild 4.7 ist der Meßanhänger in einer Gesamtansicht dargestellt.

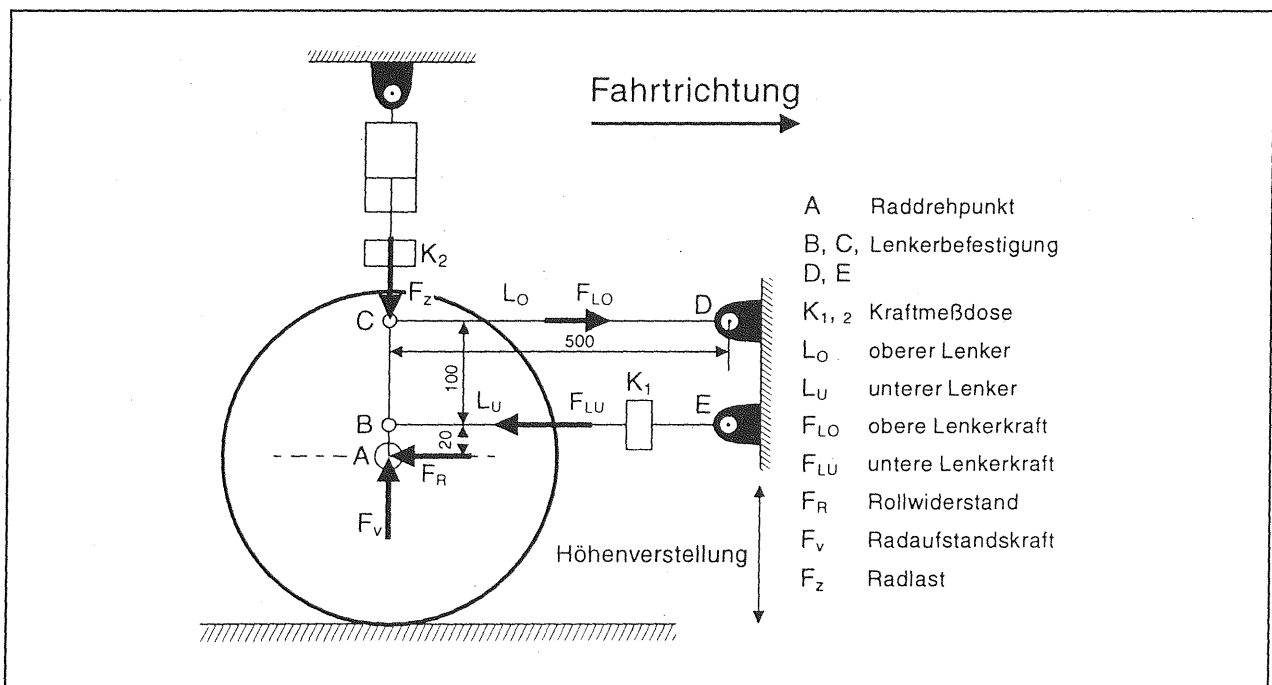


Bild 4.5: Schema der Radführung des Meßanhängers

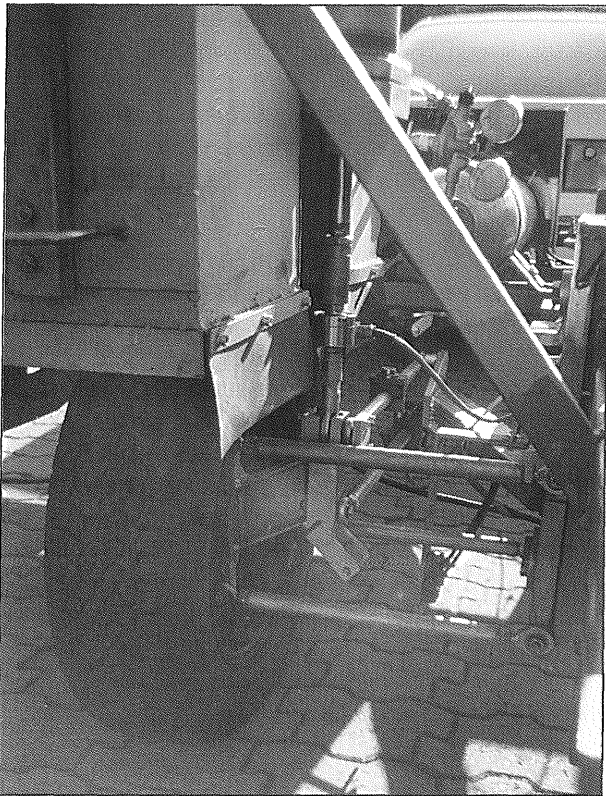


Bild 4.6: Die Radführung des Meßanhängers

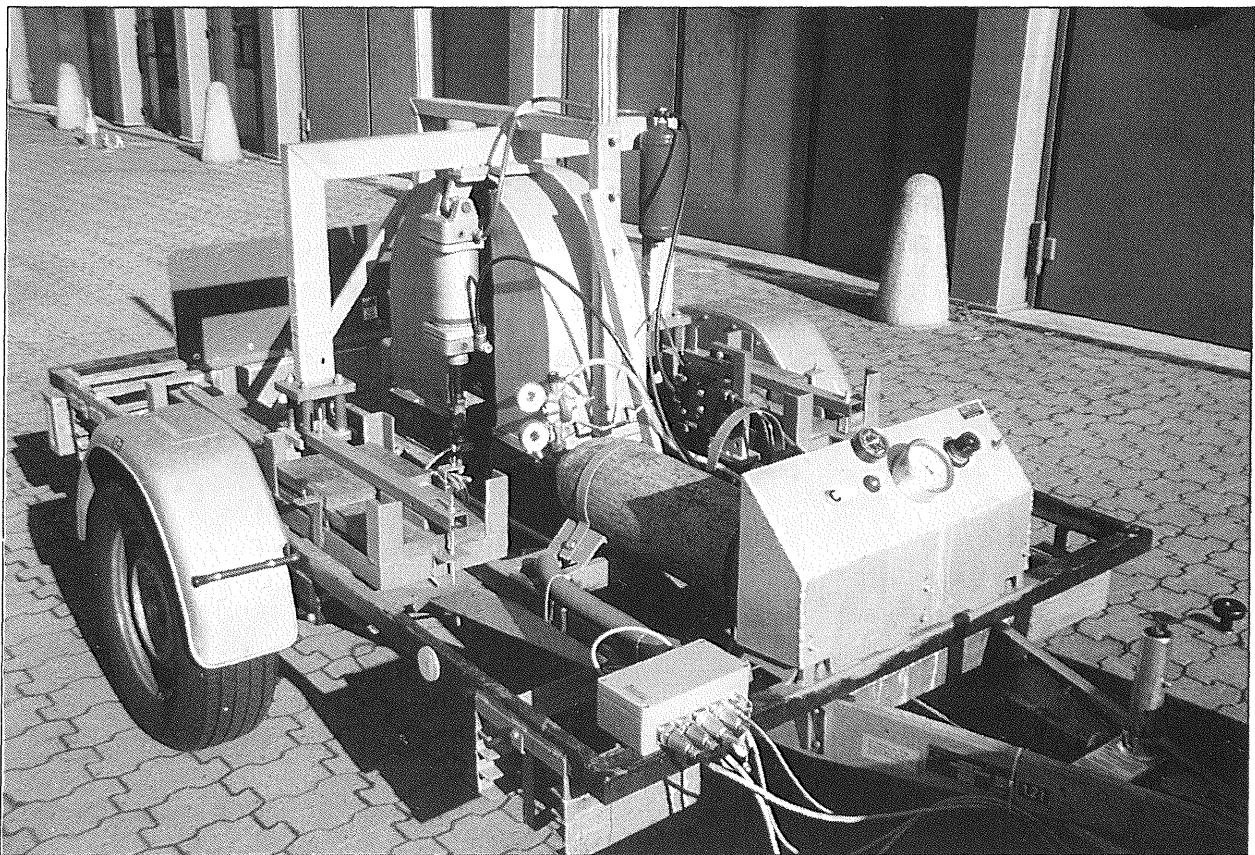


Bild 4.7: Gesamtansicht des Rollwiderstands-Meßanhänger der BAST

4.3 Meßmethodik zur Rollwiderstandsmessung

Die durch den Energieverlust eines Reifens verursachte Rollwiderstandskraft kann als Längskraft gesehen werden, die im Latsch des Reifens auftritt und der Richtung der Fortbewegung entgegengesetzt wirkt. Bei der Messung der Längskraft ist zu berücksichtigen, daß neben dem Rollwiderstand unerwünschte zusätzliche Kräfte auftreten, deren Ursachen im wesentlichen zurückgeführt werden können auf:

- Lagerreibung
- Strömungsverluste des Prüfrades durch Luftwirbel im Reifenprofil
- Luftwiderstand durch Fahrtwind
- Längskraft infolge einer vertikalen Fehlstellung der Radführung und -belastung
- elektrischer und mechanischer Nullpunktfehler der Meßdose aufgrund von Temperatur und mechanischer Wechselbelastung

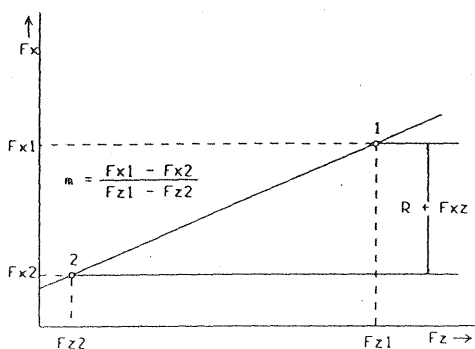
Für die Trennung der einzelnen Längskraftanteile wird eine Methode in Form einer Zweipunktmessung verwandt. Das Prinzip der Meßmethode zeigt Bild 4.8. Unter der Voraussetzung eines linearen Zusammenhangs zwischen der Längskraft F_x und der Radlast F_z wird in einer Zweipunktmessung

- jeweils eine Messung mit hoher und niedriger Radlast - die für jede Reifen/Fahrbahn-Kombination geltende typische Kennlinie bestimmt. Der reifenspezifische Rollwiderstand kann durch die Steigung m vollständig beschrieben werden. Durch die Differenzbildung werden additive Kraftanteile, die nicht ursächlich mit dem Rollwiderstand verknüpft sind - Nullpunktdrift der Meßdose, Lagerreibung, Luftwiderstand und strömungsbedingte Verluste am Prüfrad - eliminiert und nur die durch den Prüfreifen aufgrund der Radlast induzierte Rollwiderstandskomponente erfaßt.

Der noch unbestimmte Wert des Längskraftfehlers F_{xz} muß in einer gesonderten Messung ermittelt werden. Im Prüfstand wird hierzu bei geringer Geschwindigkeit der Fahrbahn die Längskraft in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung bestimmt nach

$$F_{xz} = \frac{F_{xv} + F_{xr}}{2}$$

mit F_{xv} = Längskraft der Vorwärtsmessung
 F_{xr} = Längskraft der Rückwärtsmessung



R = Rollwiderstandskraft
 F_L = Kraft durch Lagerreibung
 F_W = Luftwiderstand und Luftwirbelung
 F_{xz} = Längskraftfehler
 F_0 = Nullpunktfehler der Meßdose

$$1. \quad F_{x1} = R + F_L + F_W + F_{xz1} + F_0$$

$$2. \quad F_{x2} = F_L + F_W + F_{xz2} + F_0$$

$$\rightarrow \quad F_{x1} - F_{x2} = R + F_{xz}$$

$$R = F_{x1} - F_{x2} - F_{xz}$$

Bild 4.8: Prinzip der Zweipunktmessung

Am Meßanhänger ist diese Methode nicht anwendbar, da keine ebene Fläche mit einer Mindestlänge von 30 m für eine Messung mit dem Gespann zur Verfügung steht. Es wird daher die Längskraft in einer statischen Messung bestimmt, wobei das Prüfrad wie bei der späteren Messung auf der Straße mit der Nennradlast und mit einem reduzierten Wert belastet wird. Diese sog. Offsetmessung wird vor und nach einer Meßfahrt unter definierten Bedingungen auf einem ebenen Boden einer Versuchshalle durchgeführt und muß bei jedem Wechsel des Prüfreifens, bei Änderung der Radlast oder bei einer neuen mechanischen Einstellung der Radführung am Meßanhänger wiederholt werden. Auf die Weiterentwicklung der Offsetmessung wird in Kap. 4.4 eingegangen.

Bei einer Längskraftmessung im Prüfstand geht im Gegensatz zur Anhängermessung, die auf weitgehend ebenen Fahrbahnen stattfindet, die Krümmung der Innentrommel bzw. der eingebauten Fahrbahn ein. Die Höhe der Radachse gemessenen Längskraft muß mit Berücksichtigung des dynamischen Rollradius des Reifens und des Fahrbahnradius korrigiert werden nach:

$$R = F_x \cdot \left(1 - \frac{h}{r}\right)$$

mit R = Rollwiderstandskraft im Latsch des Reifens
 h = dynamischer Rollradius des Reifens
 r = Fahrbahnradius

Da weder am Prüfstand noch bei einer Messung mit dem Meßanhänger eine Konstanthaltung bzw. Regelung der Umgebungstemperatur möglich ist, muß deren Einfluß auf den Rollwiderstand (vgl. Kap. 3) mit einem Korrekturansatz für PKW-Reifen nach [11] bzw. [12] kompensiert werden. Für den auf eine Raumtemperatur von 25 °C bezogenen Rollwiderstand R_{25} erhält man:

$$R_{25} = R \cdot \left(1 + K \cdot (T_u - T_b)\right)$$

mit R = Rollwiderstand in N, gemessen bei Umgebungstemperatur
 K = Konstante für PKW-Reifen = 0,01
 T_u = Umgebungstemperatur in °C
 T_b = Bezugstemperatur, üblicherweise 25 °C

4.4 Weiterentwicklung des Meßanhängers

4.4.1 Grundsätzliche Überlegungen

In [2] war bereits auf die beim Meßanhänger systembedingte Problematik der Abhängigkeit der Längskraft (Längskraftfehler F_{xz} wie im Prüfstand) von der Höhe des Koppelpunktes zwischen Zugfahrzeug und Anhänger hingewiesen worden. Durch Erweiterung der Meßmethodik in Form einer Kalibrierung vor Beginn und nach Beendigung einer Meßfahrt kann der Einfluß weitgehend minimiert werden. Voraussetzung ist allerdings, daß für die Kalibrierung eine ebene Fläche für das Gespann zur Verfügung steht. Dies kann jedoch bei Einsätzen, die außerhalb der direkten Nähe zur BASt stattfinden, problematisch sein.

Es mußte daher nach einer Möglichkeit zur meßtechnischen Erfassung der aktuellen Lage von Zugfahrzeug und Meßanhänger im stationären Zustand vor einer Messung und während der Messung auf der Straße gesucht werden.

4.4.2 Realisierung

Grundsätzlich kann für die gestellte Aufgabe eine kreiselstabilisierte Plattform in Frage kommen. Zusammen mit dem hohen finanziellen Aufwand für ein solches System steht unter anderem auch die nur geringe Auflösung und das Driftverhalten einem praxistauglichen Einsatz entgegen. In gleicher Weise sind einfache Winkelgeber oder Schwerkraftpendel - selbst mit hoher interner Dämpfung - aufgrund der auftretenden geringen Winkeländerungen in Bezug zur Fahrbahn nicht anwendbar.

Eine relativ einfach einzusetzende Anordnung wurde in einem doppelten optischen Lasermeßsystem gefunden, das die Höhe des Anhängerchassis vorne und hinten als Abstand von der Fahrbahnoberfläche erfaßt. Aus der Höhendifferenz kann bei bekanntem Abstand der Sensoren über eine einfache trigonometrische Beziehung mit guter Genauigkeit die Winkellage des Anhängers gemessen werden.

In einer statischen Kalibrierung werden in zwei getrennten Messungen sowohl der Arbeitspunkt der Meßmechanik, d.h. die Lage des Anhängers in Bezug zum Boden mit der Messung von beiden Höhenwerten und des zugehörigen Längskraftfehlers F_{xz} , als auch die Funktion der Längskraft in Abhängigkeit der Höhendifferenz bezogen auf den einkalibrierten Arbeitspunkt bestimmt.

Für sämtliche nachfolgenden Meßfahrten kann nunmehr über den funktionellen Zusammenhang zwischen Längskraft und Höhendifferenz zusammen mit dem eingemessenen Arbeitspunkt die Längskraft während der Messung korrigiert werden. In Bild 4.9 ist die erweiterte meßtechnische Instrumentierung des Meßgespanns dargestellt.

Die erwähnten optischen, berührungslosen Abstandssensoren sind am vorderen und hinteren Querrahmen des Anhängers angebracht. Beispiele für die ermittelten Funktionen der Höhenabhängigkeit der Längskraft von vier untersuchten Prüfreifen (A10 - A13) sind in Bild 4.10 gezeigt. Die Funktio-

nen weisen in allen Fällen einen weitgehend linearen Verlauf auf. Im vorliegenden Fall betragen die Steigungen der Funktionen zwischen 1 N/mm und 1,5 N/mm. Mit anderen Prüfreifen und einer anderen mechanischen Ausrichtung der Radführung des Meßanhängers wurden Werte zwischen 0,8 N/mm und 2,0 N/mm gemessen. Die erzielbare Meßgenauigkeit der Höhenmessung erreicht Werte von besser als 0,1 mm, so daß im Mittel der Restfehler bis auf einen verbleibenden Anteil von ca. 0,5 % bei einem mittleren Rollwiderstandswert von 40 N reduziert wird.

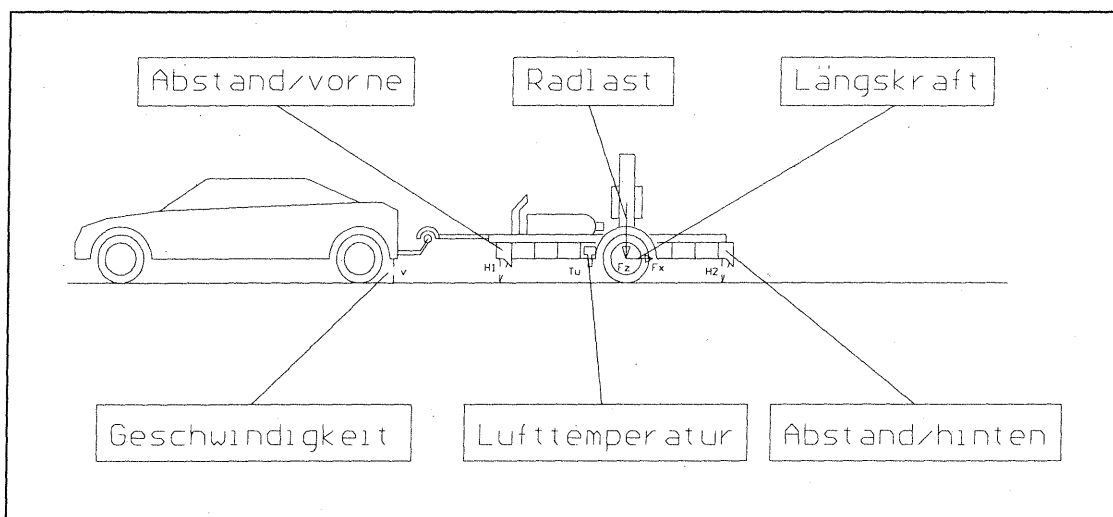


Bild 4.9: Schema der am Meßfahrzeug und Meßanhänger eingesetzten Sensoren

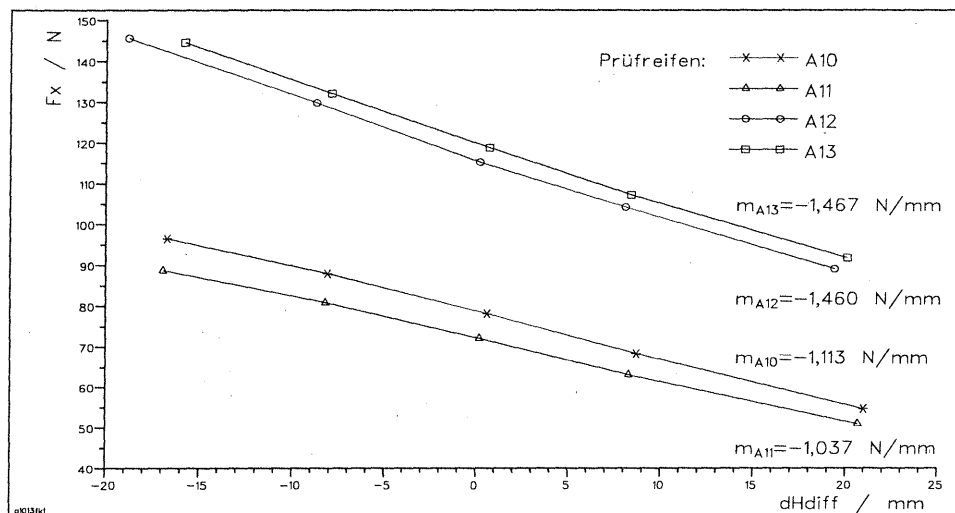


Bild 4.10: Typische Funktionsverläufe der Längskraft (Prüfreifen A10 - A13) in Abhängigkeit von der Abweichung von der Höhendifferenz der statischen Kalibrierung

5 Zur Übertragbarkeit von Messungen im Prüfstand und auf der Straße

Mit Hinweis auf die in Kap. 3 aufgeführten allgemeinen Einflußgrößen, die bei einer Messung des Rollwiderstandes auftreten, wird nachfolgend im speziellen auf die bei der BAST realisierten Meßanordnungen - Prüfstand PFF und Meßanhänger - eingegangen und aufgezeigt, inwieweit eine Übertragung der Meßwerte zwischen beiden System a priori möglich erscheint (Tab. 5.1).

Es sind innerhalb der jeweiligen Kategorien - Versuchseinstellungen, Randbedingungen, Fahrbahn

und Meßparameter - die Eigenschaften im Hinblick auf eine optimale Auslegung der Meßanordnung bewertet und gegenübergestellt.

Es ist insgesamt zu erkennen, daß Versuche unter Laborbedingungen im Prüfstand grundsätzlich wesentlich bessere Voraussetzungen hinsichtlich der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen mitbringen als ein mobiles Meßgerät für Straßenmessungen, bei denen bei Wiederholungsmessungen z.B. prinzipiell weder die zuvor gefahrene Rollspur noch die gleiche Konstanz von Geradeauslauf und Geschwindigkeit reproduziert werden kann.

Parameter:	Prüfstand	Meßanhänger
Versuchseinstellungen:		
Geschwindigkeit	++	+
Radlast	++	+
Schräglaufwinkel	++	-
Sturzwinkel	++	-
Fülldruck	+	+
Randbedingungen:		
Radlastschwankungen	+	-
Rollspur	++	--
Meßlänge	++	++
Fahrtwind	-	-
Störungen durch Fremdströmungen	++	-
Aufwärmbedingungen	++	-
Umgebungstemperatur	+	-
Fahrbahn:		
Temperatur	+	-
Textur	++	-
Rauhtiefe	++	-
Längsebenheit	+	-
Fugen bzw. Übergänge	+	-
Gleichmäßigkeit	+	-
Krümmung	+	++
Meßparameter:		
Elektrik:		
Meßbereich	++	-
Kalibrierung	++	-
Offset	++	-
Temperatur	+	-
Mechanik:		
Spiel	++	+
Reibung	++	+
ideale Ausrichtung	++	-

Tab. 5.1: Vergleich der spezifischen Eigenschaften der Meßsysteme (++ = sehr gut + = gut - = befriedigend -- = weniger befriedigend)

In gleicher Weise sind Umweltgrößen wie Luft- und Fahrbahntemperatur und andere Störströmungen - z.B. Gegenwind oder Anströmungen von vorbeifahrenden Fahrzeugen bei Messungen im Verkehr - nicht hinreichend genau zu definieren und konstant zu halten. Weiterhin sind vielfach die beteiligten Texturwerte oder Rautiefen aufgrund vielfacher Inhomogenitäten der Fahrbahndecken nur punktuell bekannt.

Abschließend läßt im Hinblick auf die meßtechnische Seite der Rollwiderstandmessung feststellen, daß wegen der wesentlich besseren methodischer Bedingungen - Meßbereiche, Möglichkeit der Offsetbestimmung und Kalibrierung der Meßeinrichtungen - unter Laborbedingungen grundsätzlich bessere Meßeigenschaften zu erzielen sind als bei fahrenden Meßsystemen.

Dies stellt keine Abwertung des Meßsystems für die Straßenmessung dar, da jedes System für eine spezifische Anforderung innerhalb der allgemeinen Meßaufgabe konzipiert und optimiert wurde. So liegen die Vorteile der Prüfstandsversuche bei der einfachen Beurteilung der Textureigenschaften der Versuchsfahrbahn. Der mehrfache Wechsel der Fahrbahn ist nur mit hohem zeitlichen und finanziellen Aufwand zu realisieren. Dahingegen können auf einer definierten Fahrbahn bei nahezu ver-

gleichbaren Temperaturverhältnissen relativ rasch verschiedene Reifen untersucht werden.

Für den Meßanhänger gelten genau die entgegengesetzten Aussagen. Die Untersuchung des Rollwiderstandes unterschiedlicher Fahrbahndecken ist bei bekannten Texturgrößen einfach durchzuführen. Die Untersuchung verschiedener Reifen auf einer oder auch mehreren Fahrbahnen hingegen ist aufgrund der Notwendigkeit der mechanischen Einstellung des Meßgestänges des Meßanhängers auf die jeweilige Reifengröße nur mit erheblichem zeitlichen oder meßtechnischen Aufwand - im besonderen bei der Messung des Längskraftfehlers - durchführbar. Es ergeben sich somit zwei unterschiedliche Schwerpunkte des Einsatzes beider Meßsysteme für Rollwiderstandsuntersuchungen:

Prüfstandsversuche:

- Messung des Rollwiderstandes mit schnellem Wechsel der Prüfreifen bei gelegentlichem Fahrbahnwechsel

Messungen auf der Straße:

- Beurteilung von verschiedenen Fahrbahndecken in kurzer Zeit bei gelegentlichem Wechsel des Prüfreifens

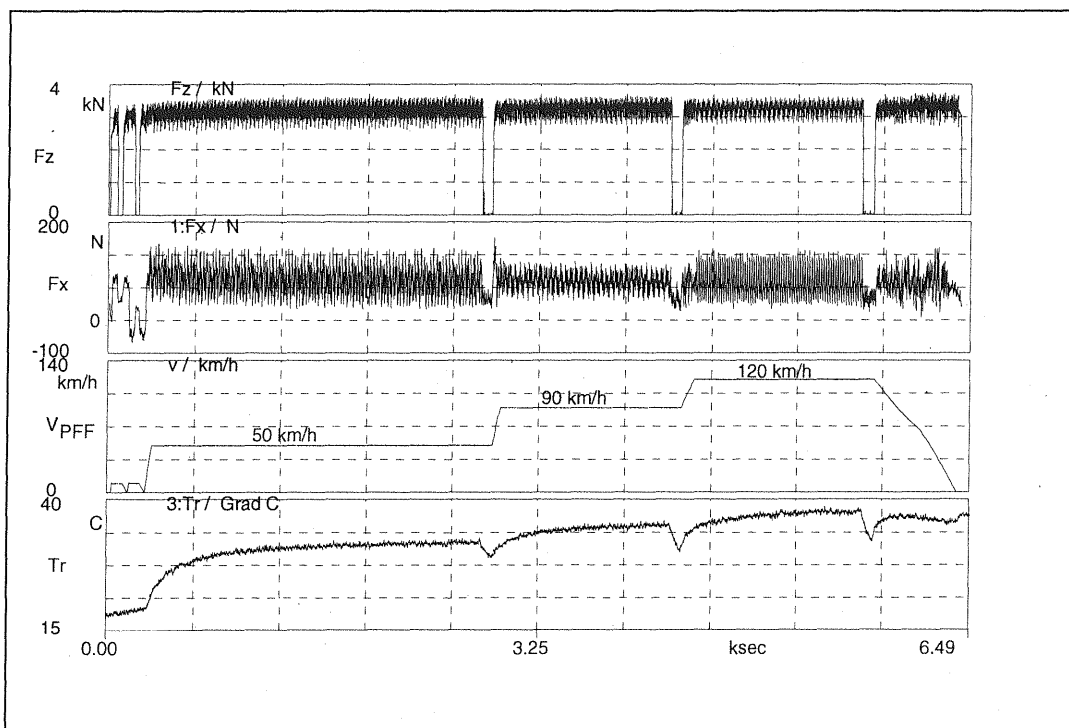


Bild 5.1: Typischer Meßschrieb eines Rollwiderstandsversuches im Prüfstand

Eine wesentliche Einflußgröße bei der Rollwiderstandsmessung stellt - wie bereits oben dargelegt - der allgemeine Begriff der Temperatur dar, der als Lufttemperatur in der Umgebung des Reifens, über die Ableitung von Wärme durch Fahrtwind und als Belagtemperatur der Fahrbahndecke auf die thermischen Eigenschaften des Reifengummis in der Lauffläche des Reifen und im Schulterbereich auf den Rollwiderstand einwirkt.

Zur Verdeutlichung der Wichtigkeit eines thermischen Gleichgewichts am Prüfreifen zeigt Bild 5.1 beispielhaft die bei Versuchen im Prüfstand anzutreffenden Verhältnisse bei der Messung der Längskraft über den gesamten zeitlichen Rollwiderstandsversuch bei drei Geschwindigkeiten. Es sind hier die Radlast F_z im oberen Schrieb, die Längskraft F_x im zweiten Schrieb sowie die Geschwindigkeit (50/90/120 km/h) und die mit einem IR-Strahlungstemperatursensor gemessene Oberflächentemperatur der Lauffläche des Prüfreifens aufgetragen. Den Einfluß der Temperatur auf die Längskraftmessung verdeutlicht die Regressionsgerade zwischen Längskraft und Lauffächentemperatur (Bild 5.2). Eine Korrelationsanalyse der

beteiligten Größen ist aufgrund des hohen Schwingungsanteils in der Längskraft nicht sinnvoll.

Die Ableitung dF_x/dT der Funktion der Längskraft in Abhängigkeit von der Lauffächentemperatur des Prüfreifens - üblicherweise als Temperaturkoeffizient der Längskraft bezeichnet - liegt je nach Reifentyp und -größe zwischen $-0,8 \text{ N/}^\circ\text{C}$ und $-1,5 \text{ N/}^\circ\text{C}$. Die Längskraft nimmt mit steigender Temperatur ab, so daß sich mit zunehmender Laufdauer der Reifen ein stationäres thermisches Gleichgewicht mit einem asymptotischen Endwert der Längskraft einstellt.

So wird durch eine Temperaturabweichung von z.B. $5 \text{ }^\circ\text{C}$ mit einem mittleren Temperaturkoeffizienten von $1 \text{ N/}^\circ\text{C}$ bei einem Rollwiderstand von 40 N bereits ein systematischer Fehler von über 12% erreicht. Bei dem im Prüfstand vorgeschriebenen standardisierten Meßablauf wird dieser Zusammenhang durch entsprechend lange Aufwärmzeiten innerhalb einer Geschwindigkeitsstufe berücksichtigt und der Einfluß minimiert.

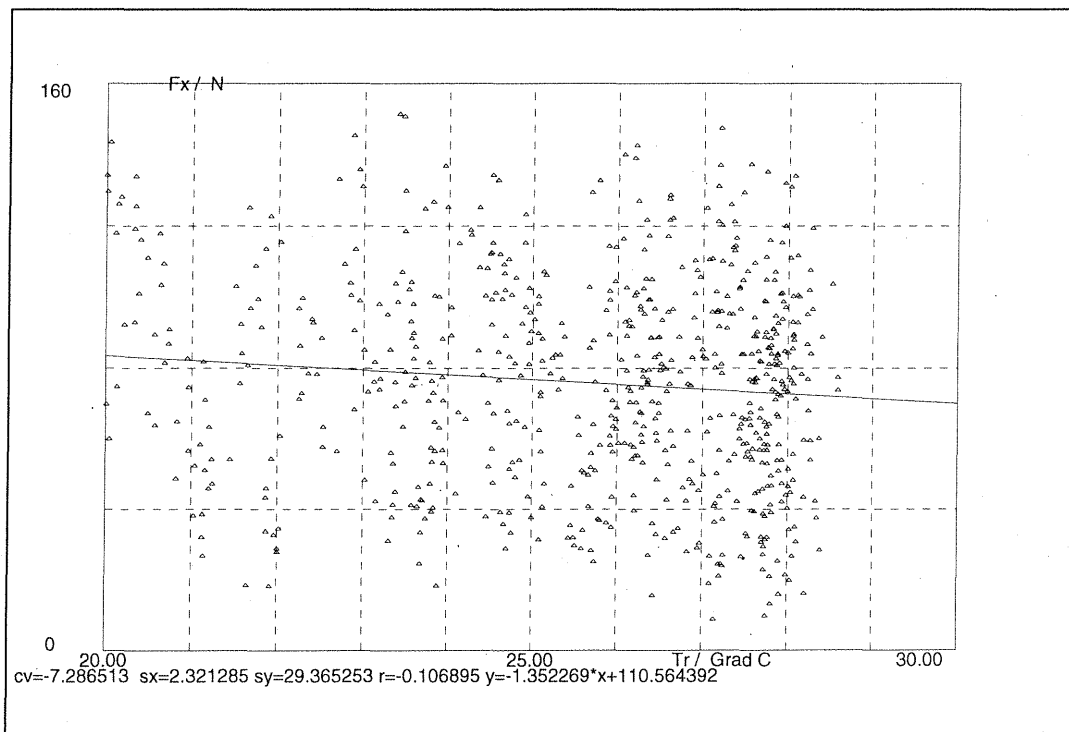


Bild 5.2: Regressionsgerade zwischen Längskraft und Lauffächentemperatur im unteren Temperaturbereich zu Beginn des Versuches mit 50 km/h

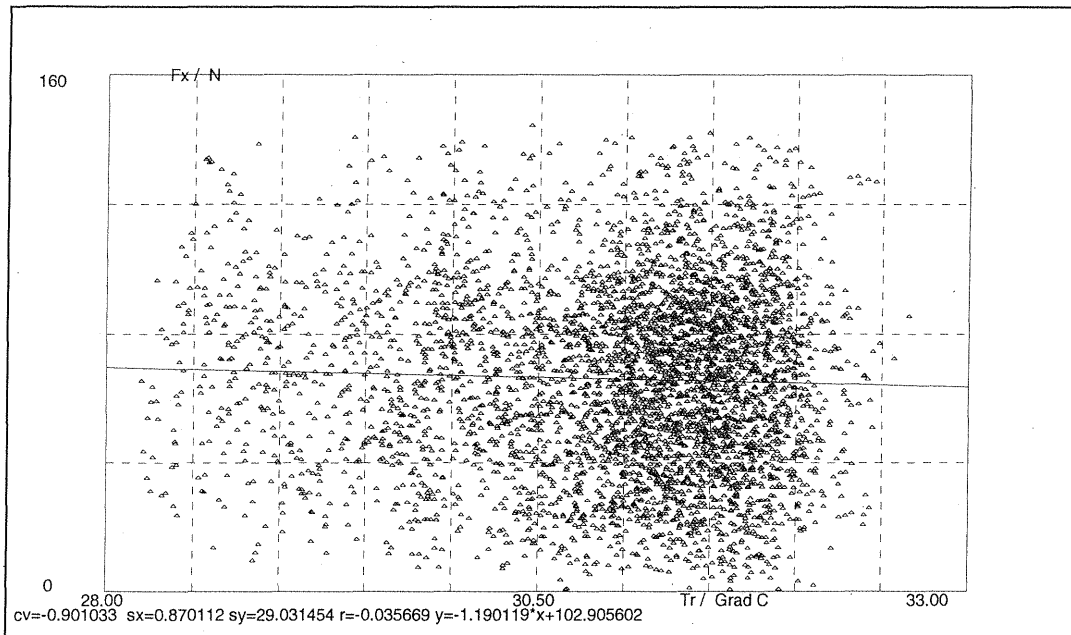


Bild 5.3: Regressionsgerade zwischen Längskraft und Lauffächentemperatur im oberen Temperaturbereich am Ende des Versuches mit 50 km/h

Bei der Messung mit dem Meßanhänger ist die Realisierung konstanter Bedingungen des Prüfreifens nur mit Einschränkung möglich, da wechselnde Fahrbahneigenschaften und thermische Verhältnisse während der Aufwärmung - insbesondere Fahrwind, Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur - in hohem Maße den stationären Wert der Längskraft beeinflussen. Kann eine Aufwärmphase mit der erforderlichen Dauer oder ein weitgehend konstanter Wert nicht realisiert werden, ist eine Bestimmung des Rollwiderstandswertes nicht hinreichend genau möglich, da jede neue Kombination von Reifen, Radlast und Temperatur (Temperaturzustand und Wärmeleitung der Fahrbahn sowie Fahrtwind und Anströmungen) eine Änderung der Längskräfte bewirkt. Die Erfassung sämtlicher Kombinationen mit dem Ziel einer Korrekturrechnung des Temperatureinflusses ist mit hohem Aufwand sowie unter Einbeziehung einfacher Modelle nur im Ansatz durchführbar.

6 Versuchsgestaltung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung besteht, wie bereits in Kap. 2 erläutert, in der Gegenüberstellung von Meßreihen, die im Prüfstand und mit dem Meßanhänger durchgeführt wurden. Als we-

sentliches Element für eine vergleichende Betrachtung der Ergebnisse ist zu fordern, daß die in Kap. 3 aufgezeigten Einflußgrößen für sämtliche Messungen weitgehend konstant bleiben bzw. umfassend genau genug beschrieben werden können. Dies gilt auch in zeitlicher Hinsicht, da insbesondere die Alterung von Prüfreifen einen Vergleich ungünstig beeinflussen. Ferner ist aufgrund der Texturabhängigkeit des Rollwiderstandes eine Vergleichbarkeit verschiedener Messungen zum Rollwiderstand unterschiedlicher Reifen nur dann sinnvoll, wenn diese auf möglichst identischen bzw. vergleichbaren Fahrbahnoberflächen durchgeführt worden sind.¹ Es war daher das bei der BAST bisher erarbeitete und umfangreiche Ergebnismaterial hinsichtlich der geforderten gleichen Bedingungen

¹ In diesem Zusammenhang wurde von der beabsichtigten Verlegung von zwei unterschiedlichen Schmirgelleinenbelägen auf einem wenig befahrenen Straßenstück bzw. in einer 100 m langen Versuchshalle der BAST wieder Abstand genommen. Zum einen ist aufgrund der fehlenden Wasserfestigkeit des Schmirgelleinens die Nutzung im Freien mit erheblichen Risiken der Zerstörung verbunden. Zum anderen mußte die Nutzung einer entsprechenden Bahn in einer Halle wegen fehlender Möglichkeiten zum Aufwärmen des Reifens, aus Gründen der eingeschränkten Höhe der Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitskonstanz bei der Messung zusammen mit Problemen der Spurrhaltung und wegen der nur geringen Länge der verlegten Bahn von 100 m wieder fallengelassen werden.

Hinsichtlich der Beurteilung der qualitativen Meßeigenschaften zum Rollwiderstand werden hierzu nur Messungen herangezogen, die im Jahre 1995 am Prüfstand durchgeführt wurden [3]. Zur Beurteilung der Differenzierung von unterschiedlichen Texturen werden Ergebnisse von Prüfstandsversuchen verwendet, die auf unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen durchgeführt worden waren [5]. Weiterhin wurde das Datenmaterial durch Ergebnisse von Versuchsfahrten mit dem Meßanhänger ergänzt, die eigens für die vorliegende Untersuchung in Ergänzung einer Untersuchung mit dem Meßanhänger im Juli 1995 stattfanden [4]. Darüber hinaus wurden im August/September 1995 auf der Standardstrecke der BASt (BAB A555) mehrere Versuchsreihen mit den im Prüfstand untersuchten Prüfreifen A10-A13 unternommen, deren Ergebnisse zur Beurteilung sowohl des reifenseitigen

Rollwiderstandes als auch der fahrbahnseitigen Differenzierung der Textur verwendet wurden.

6.1 Prüfreifen

Aus der Vielzahl der bislang untersuchten Prüfreifen erfüllen die in [3] eingesetzten Reifenexemplare neuester Bauart eines deutschen Herstellers die geforderten Bedingungen am besten. Diese waren sowohl im Prüfstand als auch mit dem Meßanhänger auf der Standardstrecke A555 für die vorliegende Untersuchung und auf einem Reifenprüfgelände eingesetzt worden. Die einzelnen technischen Daten der Prüfreifen sind zusammen mit den gemessenen Profiltiefen und Shore-Härten in Tabelle 6.1 zusammengestellt.

Hersteller	BASSt-Nr.	Größe	LI	SSY	DOT-Nr.	Profil/mm	Shore-Härte
A	A10a	175/70 R 13	82	T	504	7,1	66
	A11a	175/70 R 13	82	T	045	7,2	69
	A12a	195/65 R 15	91	V	344	8,0	61
	A13a	195/65 R 15	91	V	514	8,1	66

Tab. 6.1: Daten der Prüfreifen (Pufstandversuch und Meßanhänger) - LI=Load Index, SSY=Speed Symbol

BASSt-Bez.	21b	22b	23b	24b
Hersteller	Continental	Pirelli	Goodyear	Michelin
Typ	CH90	P600	Vector	MXT
Größe	195/65R15	205/60R15	175/70R13	155/70R13
DOT-Nr.	311	361	271	510
LI / SSY	91H	91V	82T	75T
Felge	6J15	7J15	5 1/2J13	4 1/2J13
Abrollumfang (mm)	1939	1910	1770	1680

Tab. 6.2: Daten der Prüfreifen im Prüfstandsversuch zur Texturabhängigkeit

In Tabelle 6.2 sind die Daten der Prüfreifen (nach GEstRO-92 [14]) zusammengefaßt, die im Prüfstand im Rahmen der Untersuchung zur Texturabhängigkeit des Rollwiderstandes eingesetzt worden waren und als Bezug für die weiter unten durchgeführte Analyse der Meßeigenschaften im Hinblick auf den Textureinfluß herangezogen werden [5].

6.2 Versuchsfahrbahnen

Im Hinblick auf die Anforderungen an die Fahrbahnen gelten die zuvor festgestellten Aussagen in gleichem Sinne. Für Versuche im Prüfstand zum

Rollwiderstand sind weitgehend reale und praxisnahe Bedingungen einzustellen. Ein wesentliches Element der Prüfung stellt daher die verwendete Fahrbahn dar, deren Oberflächenstruktur und -eigenschaften den unter Verkehr liegenden Straßendecken entsprechen sollte.

Als Fahrbahnbelag im Prüfstand wurde daher ein im Fernstraßenbau eingesetzter Asphaltbeton 0/11S nach ZTV-bit-Stb 84 verwendet. Da fertigungsbedingt die Oberfläche der in den einzelnen Kassetten des Prüfstands gefertigten Belagsabschnitte einen hohen Bindemittelanteil aufweisen, wurden zur Realisierung einer verkehrstypischen Textur die Fahrbahnsegmente unter Zusatz von Sand dampfgestrahlt und der Bindemittelüberschuß an der Oberfläche abgetragen (Bild 6.1).



Bild 6.1: Oberfläche der im Prüfstandsversuch zum Rollwiderstand verwendeten Asphaltbetondecke 0/11s

Diese Fahrbahn wurde als letzter Prüfbelag der Untersuchung nach [5] eingesetzt, Vorangegangen war die Untersuchung mehrerer künstlicher Fahrbahnoberflächen als Dünnschichtbeläge (Schmirgelleinen mit unterschiedlichen Abstreungen), verschiedenener Splittabstreungen in Kunstharz mit enggestaffelter Korngröße und einer weiteren Asphaltdecke (ISO 0/8). Nähere Einzelheiten hierzu sind ausführlich in [5] beschrieben. Die Oberflächeneigenschaften dieser Fahrbahnen sind

in Tabelle 6.3 zusammengefaßt; die zugehörigen Texturkennwerte² enthält Tabelle 6.4.

Während im Prüfstand die Oberfläche der Fahrbahn in einem weiten Bereich den Erfordernissen

² Als Texturkennwert wird der Effektivwert der Amplituden der Profilhöhen innerhalb eines definierten Wellenlängenbereiches der Profilzeitfunktion angegeben. Für die Wellenlängen gilt: Feintextur: 0,3-10 mm, Grobtextur: 10-100 mm, Megatextur: 100-500 mm

angepaßt und eingestellt werden kann, ist dies bei unter Verkehr liegenden Decken nicht möglich.

Die bisher durchgeführten Rollwiderstandsmessungen mit dem Meßanhänger fanden bislang ausschließlich auf der BAB A555 zwischen Bonn und Köln statt. Die günstige Nähe der Versuchsstrecke war einer der Hauptgründe für die Wahl als Standardstrecke. Wesentlicher jedoch war die Tatsache, daß für die gesamte Strecke sowohl Meß-

werte für die Texturen als auch für die Griffigkeiten und Längsebenheiten vorlagen, die innerhalb der Erst-erfassung der BAB 1992 durch die BAST ermittelt worden waren. Auf der gesamten Strecke von 2 mal 20 km wurden 10 Meßstrecken (BAST-Bezeichnung A - K) festgelegt, die hinsichtlich der Längsneigung, Ebenheit und Kurvenfreiheit als optimal anzusehen sind.

Belagsart	Griffigkeit SRT.-Pendel	mittlere Rauhtiefe / mm	
		Sandflächen-M.	Lasermessung
Asphaltbeton			
AB 0/11S, unbeh.			
AB 0/11S, beh.	59,2	1,31	1,1
AB 0/8-ISO, unbeh.	37,3	0,25	0,48
AB 0/8-ISO, beh.	52,9	0,29	0,44
Splitt/Kunsthartz			
8-11 mm - SP8	51,1	6,23	3,8
4-5,6 mm - SP4	51,9	2,1	1,93
2-2,8 mm - SP2	54,4	1,85	1,48
0,7-1,4 mm - KB1	70,3	1,14	1,28
Korund/Kunsthartz			
1,0-1,7 mm - KK1	74,3	1,36	1,01
Korund/Schmirgelleinen			
1,0-1,7 mm - P16	65,5	1,32	1,18
0,7-1,2 mm - P20	75,7	1,26	1,13
0,6-1,0 mm - P24	81,5	1,01	0,98

Tab. 6.3: Zusammenstellung von Griffigkeiten und Rauhtiefewerten der Prüfstandsmessung zur Texturabhängigkeit

Belagsart	Feintextur / mm	Grobtextur / mm	Megatextur / mm
	L = 0,3 - 10 mm	L = 10 - 100 mm	L = 100 - 500 mm
Asphaltbeton			
AB 0/11S, unbeh.			
AB 0/11S, beh.	0,26	0,44	0,45
AB 0/8-ISO, unbeh.	0,10	0,09	0,27
AB 0/8-ISO, beh.	0,11	0,10	0,30
Splitt/Kunsthartz			
8-11 mm - SP8	0,79	1,86	0,86
4-5,6 mm - SP4	0,48	0,70	0,41
2-2,8 mm - SP2	0,37	0,39	0,30
0,7-1,4 mm - KB1	0,29	0,25	0,34
Korund/Kunsthartz			
1,0-1,7 mm - KK1	0,22	0,20	0,36
Korund/Schmirgelleinen			
1,0-1,7 mm - P16	0,33	0,23	0,26
0,7-1,2 mm - P20	0,30	0,20	0,27
0,6-1,0 mm - P24	0,21	0,13	0,28

Tab. 6.4: Texturkennwerte der Fahrbahnen der Prüfstandsmessung zur Texturabhängigkeit

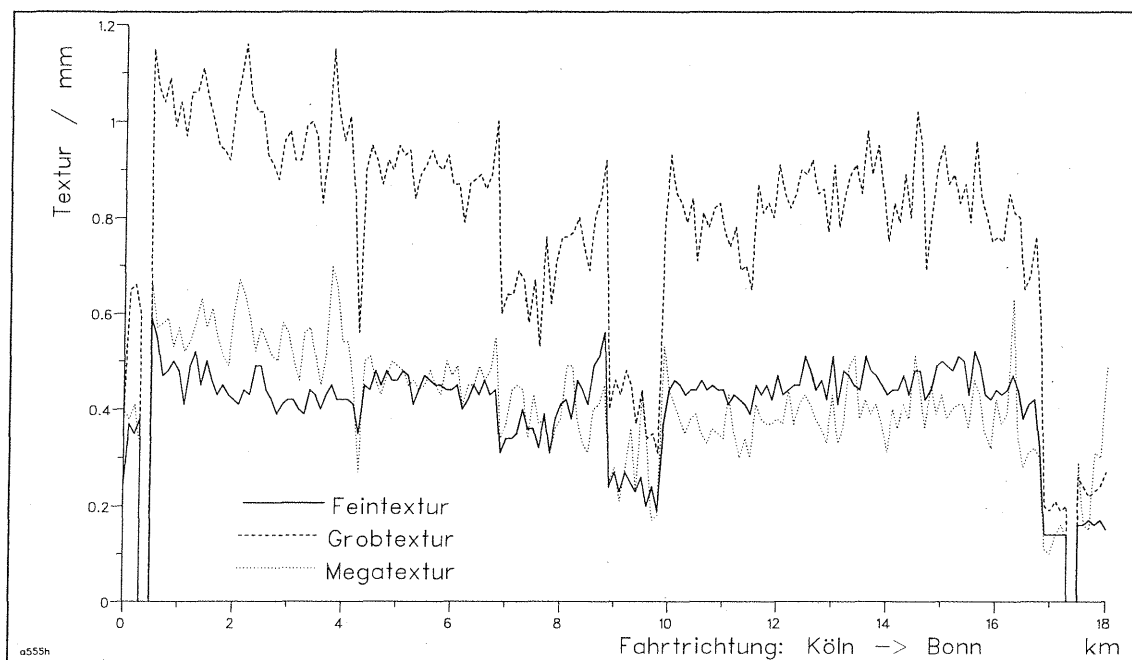


Bild 6.2: Texturkennwerte der A555 - Fahrtrichtung Köln - Bonn

Versuchsfahrbahn	mittl. Rauhtiefe mm	Fein-Textur mm	Grob-T. mm	Mega-T. mm
PFF- AB 0/11s	1,1	0,26	0,44	0,45
A555 - Strecke H	---	0,24	0,36	0,27
Testgelände AB 0/16	---	0,35	0,54	0,23

Tab. 6.5: Mittlere Rauhtiefe und Texturkennwerte der beteiligten Versuchsfahrbahnen

Der Texturverlauf der A555 auf der Richtungsfahrbahn von Köln nach Bonn ist in Bild 6.2 dargestellt. Bei Kilometer 9 ist ein deutlicher Abfall sämtlicher Texturkennwerte zu verzeichnen. An dieser Stelle (Meßstrecke H) geht der Fahrbahnbelag von einem längeren Teilstück mit grober Oberfläche auf einen Abschnitt einer älteren Decke mit relativ glatter Oberfläche über. Die Texturkennwertes dieses Meßabschnittes erreichen vergleichbare Werte wie die Asphaltbetondecken des Prüfstandes und des Testgeländes.

Weiterhin wurden Fahrversuche auf einem nicht unter Verkehr liegenden Reifenprüfgelände durch-

geführt. Neben 6 Fahrbahndecken, die speziell hinsichtlich der Reifenrollgeräusche optimiert waren, und einer Gußasphaltfahrbahn verfügte der Rundkurs über eine ältere Asphaltbetonfahrbahn aus AB 0/16. Wie die gemessenen Texturwerte der AB 0/16-Decke zeigen, werden weitgehend vergleichbare Größen wie auf der Prüfstandsfahrbahn oder auf der Meßstrecke A555/H erzielt, wobei die Megatextur für den Rollwiderstand relativ unmaßgeblich ist (Tab. 6.5). In Bild 6.3 sind die Texturwerte der drei untersuchten Fahrbahnen dargestellt.

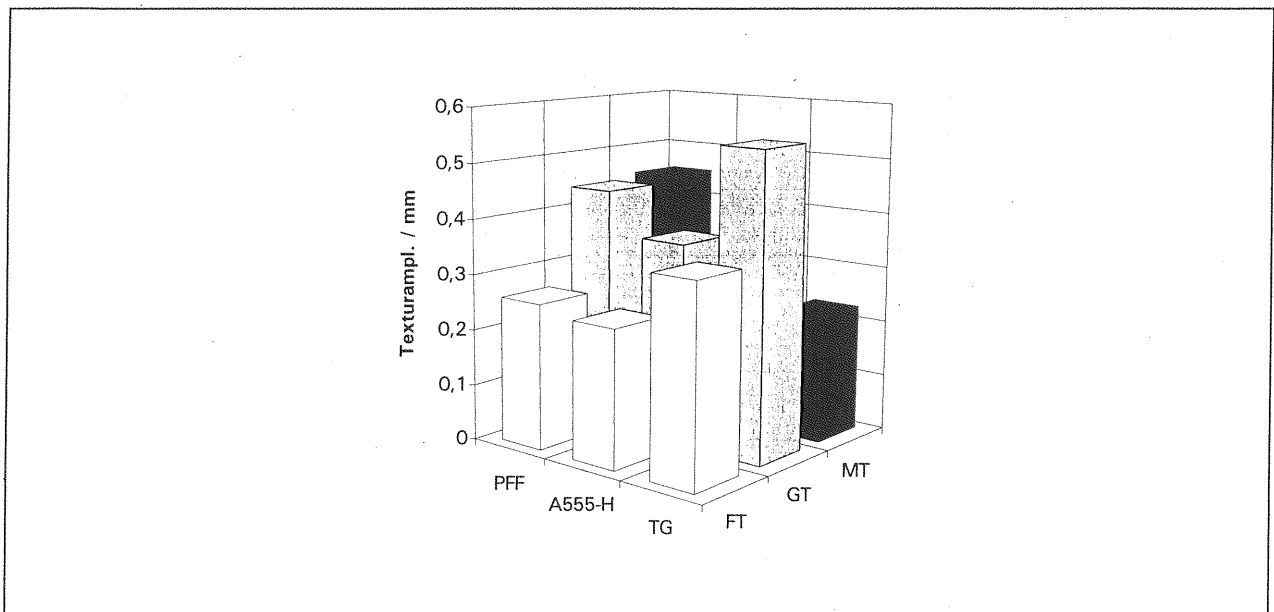


Bild 6.3: Texturkennwerte der beteiligten Versuchsfahrbahnen im Prüfstand (PFF), auf dem Testgelände (TG) und auf der A555 / Meßstrecke H

7 Versuchsdurchführung

In Ergänzung zu den bereits im Prüfstand PFF ermittelten Rollwiderstandswerten der Prüfreifen A10-A13 wurden zusätzlich sowohl auf der Standardstrecke der BAST (A555) als auch auf dem Reifentestgelände Fahrversuche mit dem Meßanhänger durchgeführt. Erstmals waren sogar Fahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (50 km/h, 90 km/h und 120 km/h) möglich, da bislang bei den Messungen im Verkehr auf der A555 nur mit einer Geschwindigkeit von 90 km/h gefahren werden konnte. Andere Geschwindigkeiten sind nur bei einer Sperrung einer Fahrspur möglich. Bislang wurde jedoch aufgrund des damit verbundenen Aufwandes hiervon abgesehen.

7.1 Versuche im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn

Die Messungen waren bereits innerhalb einer anderen Untersuchung zum Rollwiderstand von Pkw-Reifen [3] durchgeführt worden. Die Versuchsparameter nach DIN ISO 8767 [12] für die Prüfreifen A10-A13 waren:

- Prüfung bei 50 km/h, 90 km/h und 120 km/h
- Radlast = 80 % der maximalen Tragfähigkeit (LI)

- Reifenfülldruck entsprechend der Tragfähigkeit und Geschwindigkeitsklasse, im Versuch nicht korrigiert
- Aufwärmdauer bei 50 km/h = 40 min, nach Erhöhung der Geschwindigkeit jeweils 20 min

Die Versuchsreifen wurden vor Beginn der Versuchsreihe in einem sog. Break-In über eine definierte Strecke in einem zweiten, mechanisch gelagerten Innentrommelprüfstand (IPS) der BAST „eingefahren“, um Spannungen abzubauen, die vielfach beim Neureifen nach der Vulkanisation verbleiben. Es wurde somit für alle Reifen eine gleiche Voralterung realisiert und eine annähernd vergleichbare Ausgangssituation geschaffen. Die Bedingungen des Einlaufs waren hierbei:

- Einlaufstrecke: 400 km
- Dauer: 4 h
- Geschwindigkeit: 100 km/h
- Radlast: 3 kN
- Umfangskraft: 0,5 kN bremsend
- Bewässerung: 400 l/h d.h. ca. 0,6 mm Wasserfilm
- Versuchsfahrbahn: Asphaltbeton 0/11S
- Rauhtiefe: 0,7 mm
- Griffigkeit: ca. 56 SRT-Einheiten

Die Einstellungen der in der Untersuchung nach [5] eingesetzten vier GEstRO-92-Reifen (21b-24b) waren:

- Prüfung bei 50 km/h, 90 km/h und 120 km/h
- Radlast = 3,5 kN
- Reifenfülldruck = 2,0 bar, im Versuch nicht korrigiert
- Aufwärmdauer bei 50 km/h = 40 min, nach Erhöhung der Geschwindigkeit jeweils 20 min

7.2 Fahrversuche auf dem Testgelände

Für die Versuche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten stand der gesamte Rundkurs des Testgeländes zur Verfügung; aber lediglich eine Gerade mit einer Länge von ca. 700 m war für die Messungen geeignet. Zusätzliche Probleme bereitete die

Ostkurve als Anlaufstrecke bei 90 km/h und bei 120 km/h, die erst nach mehreren Fahrproben vom Gespann mit 90 km/h gefahren werden konnte. Bei 120 km/h konnte der Beginn der Messung, bedingt durch die zu geringe Anfangsgeschwindigkeit von 90 km/h, erst in der Mitte der Geraden vorgenommen werden. Die restliche Fahrbahnlänge war gerade noch so lang bemessen, um eine Zweipunktmessung mit konstanter Geschwindigkeit durchzuführen und unter höchster Bremsverzögerung sicher durch die West-Kurve, die mit ca. 50 km/h eine wesentlich geringere Geschwindigkeiten als die Ost-Kurve zuließ, zu fahren. Gelegentlich auftretende Variationen in der Geschwindigkeit mußten in den einzelnen Datensätzen nachträglich korrigiert werden. Ferner traten bedingt durch die vorherrschende hohe Sonneneinstrahlung an allen Meßtagen teilweise vermehrt Meßaussetzer bei den beiden Laserabstandsensoren auf, die durch ein Korrekturprogramm beseitigt werden mußten. Bild 7.1 zeigt das Gespann während einer Messung auf der Südgeraden des Rundkurses.



Bild 7.1: Rollwiderstandsmessung auf der Südgeraden des Rundkurses

7.3 Fahrversuche auf der A555

Die Messungen auf der A555 wurden innerhalb von zwei Versuchsreihen mit den vier Prüfreifen A10-A13 auf den festgelegten 10 Streckenabschnitten mit 90 km/h als Prüfgeschwindigkeit durchgeführt. Die Radlast und der Fülldruck der Prüfreifen wurden auf die Werte der Prüfstandsprüfung (s.a. Kap. 7.1) eingestellt. Jede Messung wurde dreimal wiederholt, so daß pro Prüfreifen und Strecke 6 Einzelwerte zur Verfügung standen. Für den Vergleich der Meßsysteme hinsichtlich des Rollwiderstandes wurde nur die Meßstrecke H der A555 herangezogen. Zur Analyse des Einflusses der Textur wurden sämtliche definierten 10 Meßstrecken verwendet. Eine nachträgliche Nachbearbeitung der Meßdaten war nur in den Fällen notwendig, bei denen die aufgezeichneten Daten der beiden Laserabstandsmesser eine zu hohe Aussetzerrate aufgrund einer hohen Rauigkeit der verschiedenen Fahrbahndecken zeigten.

8 Versuchsergebnisse

Nachfolgend sind die jeweiligen Ergebnisse der drei unterschiedlichen Messungen zusammengestellt. Zur Verdeutlichung der maximal aufgetre-

ten Streuung wurde neben dem Mittelwert der innerhalb der Geschwindigkeitsgruppe gemessene Maximal- und Minimalwert dargestellt. Die Einzelwerte der Messungen sind im Anhang zusammengestellt.

8.1 Rollwiderstandsmessungen

8.1.1 Prüfstandsversuche

Aus [3] sind als Bezugsgrößen die im Prüfstand gemessenen Werte für die Prüfreifen A10-A13 in der Reifengröße 175/70 R13 in Bild 8.1, in der Größe 195/65 R15 in Bild 8.2 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen ein weitgehend ausgeglichenes Verhalten des Rollwiderstandsbeiwertes für beide Reifengrößen mit nur gering ausgeprägten Streuungen. Die maximal auftretende Spanne der Abweichung beträgt absolut betrachtet 0,1 % (entsprechend ca. 10 % vom Mittelwert) und umfaßt zusätzlich noch außerdem die Exemplarstreuungen im Rollwiderstand der drei geprüften Exemplare pro Prüfreifentyp. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Versuche im Prüfstand ist im untersuchten Geschwindigkeitsbereich nur gering ausgeprägt und verläuft weitgehend konstant.

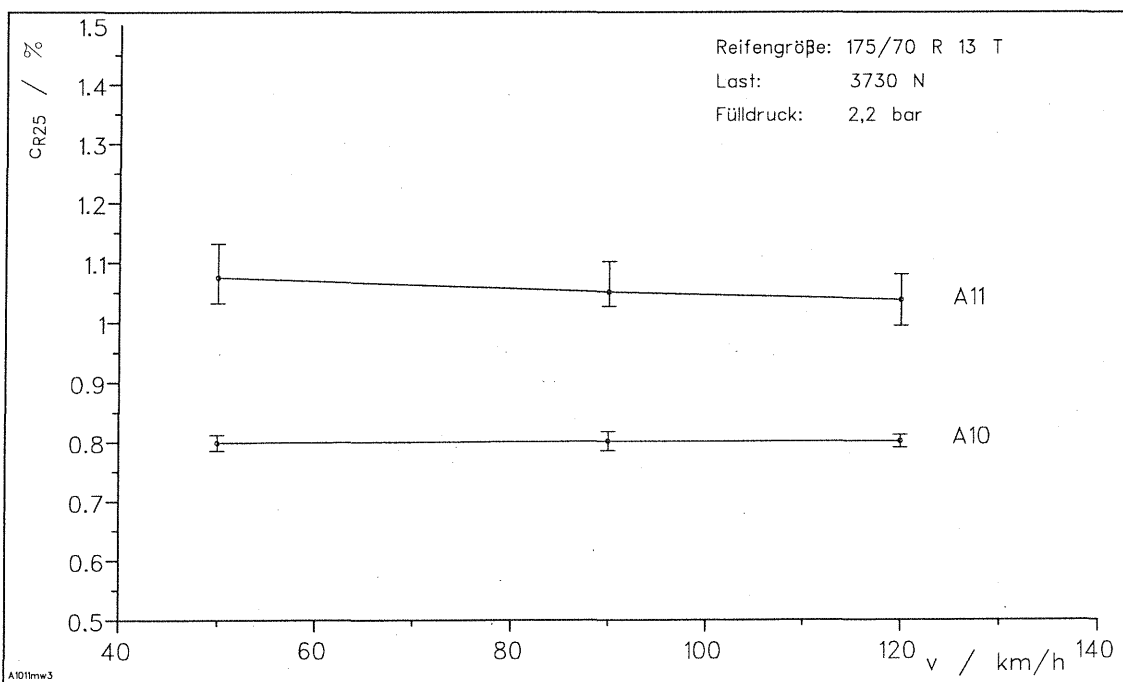


Bild 8.1: Rollwiderstandsbeiwerte der Prüfstandmessung als Mittel-, Maximal- und Minimalwerte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Reifengröße 175/70 R13 T - Fahrbahn AB 0/11s

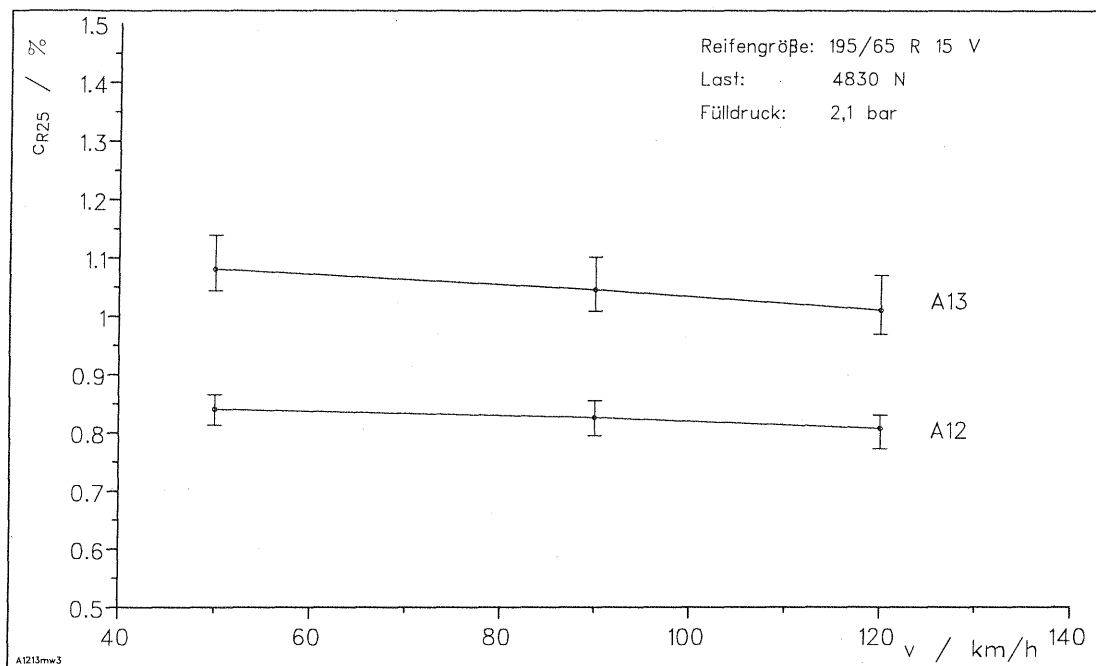


Bild 8.2: Rollwiderstandsbeiwerte der Prüfstandmessung als Mittel-, Maximal- und Minimalwerte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Reifengröße 195/65 R15 V - Fahrbahn AB 0/11s

8.1.2 Fahrversuche auf dem Testgelände

Die Ergebnisse der Fahrten auf dem Testgelände mit drei Geschwindigkeiten zeigen Bild 8.3 für die Reifengröße 175/70 R13 und Bild 8.4 für die Größe 195/65 R15. Bei einem Vergleich mit den im Prüfstand gemessenen Absolutwerten und deren maximalen Werten werden die erläuterten allgemeinen (s.a. Kap. 3) und spezifischen Einflüsse (s.a. Kap. 5) der Randbedingungen auf eine Rollwiderstandsmessung besonders deutlich und zeigen sich vornehmlich bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h in teilweise hohen Ausreißern und Streuungen der Meßwerte. Sie sind zum einen auf Probleme mit der Konstanz der Geschwindigkeit während der Messung und auf allgemeine Stabilitätschwierigkeiten des Gespanns, zum anderen aber auch auf die nur geringe nutzbare Fahrbahnlänge zurückzuführen. Weiterhin neigen die Werte der Prüfreifen A12 und A13 bei 120 km/h zu einem deutlichen Abfall und bestätigen, daß die Ergebnisse bei 120 km/h nur bedingt verwendet werden können. Bei den beiden anderen Prüfgeschwindigkeiten werden jedoch vergleichbare und annähernd gleich gute Ergebnisse wie im Prüfstand erzielt.

Untypisch sind jedoch in beiden Reifengrößen die teilweise ansteigenden oder abfallenden Verläufe des Rollwiderstandsbeiwerte mit Zunahme der

Geschwindigkeit. Dies ist möglicherweise ein Hinweis auf eine nicht ausreichend stabilisierte Aufwärmung der Reifen vor Beginn der Messung oder auf einen anderen Temperatureinfluß aufgrund wechselnder Bedingungen durch Fahrtwind und anderen Anströmungen am Prüfrad. Die Ergebnisse bestätigen somit die in Kap. 3 bereits aufgezeigten Einflüsse durch Temperatur und anderer Randbedingungen während einer Messung.

8.1.3 Fahrversuche auf der A555

Die erzielten Rollwiderstandsbeiwerte, die auf der Meßstrecke H der A555 bei 90 km/h gemessen wurden, sind für beide Reifengrößen in Bild 8.5 dargestellt.

Bei Prüfreifen A11 wird ein hoher Ausreißer deutlich, für dessen Ursache anhand der vorliegenden Einzeldaten keine hinreichende Erklärung möglich ist, da die betreffende Messung ordnungsgemäß durchgeführt wurde. Andererseits zeigt sich anhand dieser unkorrigierten Daten, daß Meßfehler bei Messungen auf der Straße im Vergleich zur Prüfstandmessung, bei der bislang noch kein Fehler in vergleichbarer Größenordnung zu verzeichnen war, systembedingt sind und aufgrund der Vielzahl von zufällig wirkenden Randparametern

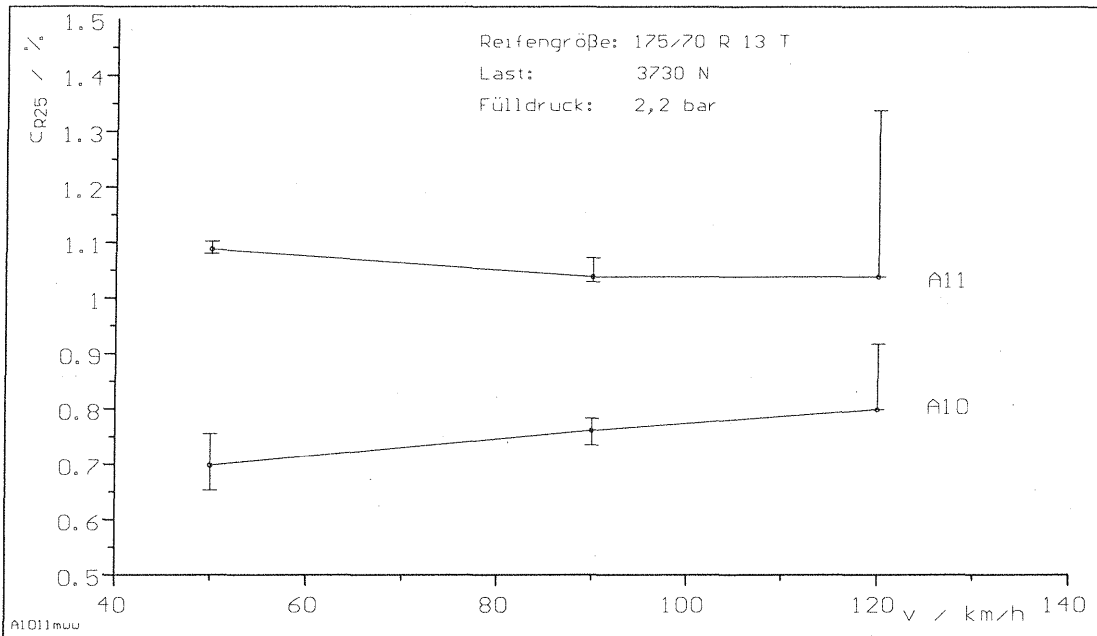


Bild 8.3: Rollwiderstandsbeiwerte der Messung auf dem Testgelände als Mittel-, Maximal- und Minimalwerte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Reifengröße 175/70 R13 T - Fahrbahn Asphaltbeton 0/16

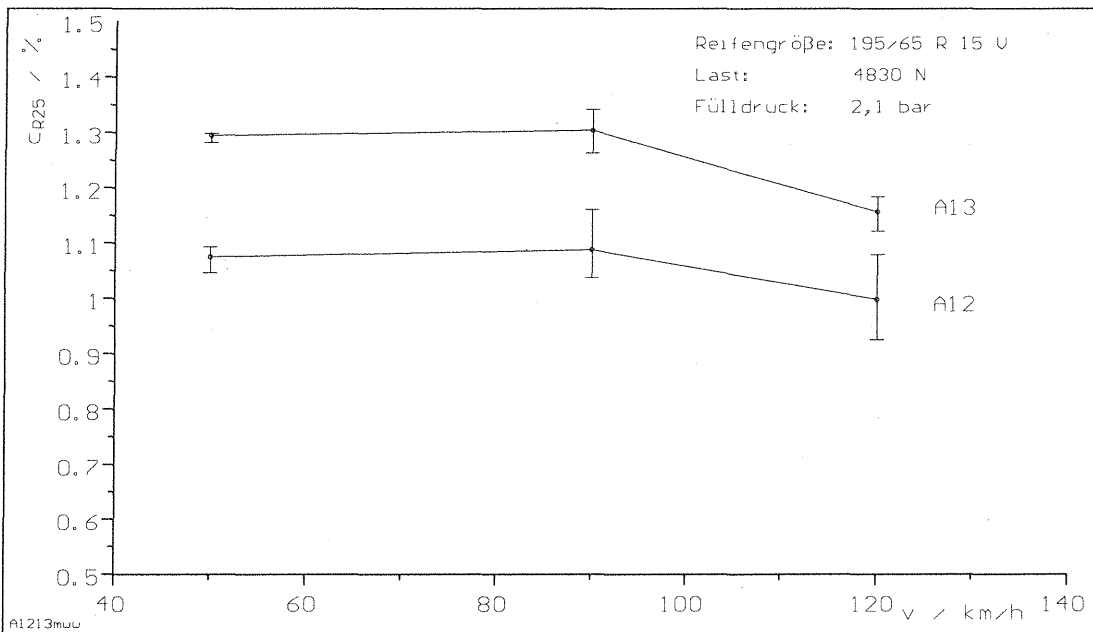


Bild 8.4: Rollwiderstandsbeiwerte der Messung auf dem Testgelände als Mittel-, Maximal- und Minimalwerte in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, Reifengröße 195/65 R15 V - Fahrbahn Asphaltbeton 0/16

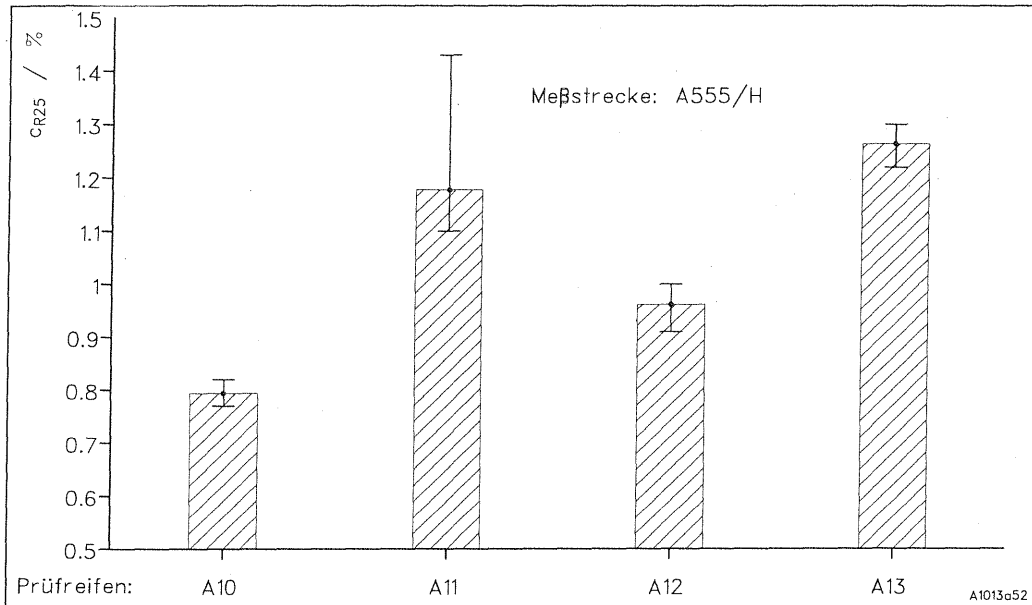


Bild 8.5: Rollwiderstandsbeiwerte der Messung auf der A555/ Meßstrecke H als Mittel-, Maximal- und Minimalwerte Reifengröße 175/70 R13 T u. 195/65 R15 V

häufiger auftreten können. Hierdurch wird die in Kap. 5 angeführte geringe Reproduzierbarkeit - im wesentlichen hervorgerufen durch Änderungen der Rollspur, des Nachlauf- und Sturzwinkels am Prüfrad aufgrund von Eigenbewegungen des Anhängers - und anderer Einflußgrößen bestätigt.

Die Einzelergebnisse der Messungen auf der A555 sind im Anhang zusammengefaßt.

8.2 Zum Einfluß der Textur

8.2.1 Prüfstandsversuche

Im Rahmen der Untersuchung in [5] wurden 11 unterschiedliche Beläge unter anderem auch hinsichtlich des Einflusses der Textureigenschaften auf den Rollwiderstand näher untersucht. Obwohl hier andere Prüfreifen (s.a. Kap. 6.1) eingesetzt wurden, ist eine vergleichende Betrachtung der Eigenschaften zulässig, da sich zwar im Absolutwert des Rollwiderstandes Unterschiede ergeben, hinsichtlich des Textureinflusses sich jedoch unabhängig von Reifentyp oder -größe ein vergleichbares Verhalten in Abhängigkeit von den Textureigenschaften einstellt.

Die Rollwiderstandswerte der vier eingesetzten Prüfreifen zeigt Bild 8.6, die dazugehörigen Texturkennwerte sind in Bild 8.7 dargestellt.

Die linearen Regressionen zwischen den drei Texturkennwerten und dem Rollwiderstand sind für die Feintextur in Bild 8.8, für die Grobtextur in Bild 8.9 und für die Megatextur in Bild 8.10 dargestellt.

8.2.2 Fahrversuche auf der A555

In gleicher Weise wie zuvor wurde für die auf der A555 durchgeführten Messungen der Einfluß der unterschiedlichen Texturen der zehn Meßstrecken untersucht. In Bild 8.11 sind in normierter Form (Bezug = Meßstrecke E) die für eine Meßlänge von 500 m gemittelten Texturkennwerte und der normierte Rollwiderstandsbeiwert (Prüfreifen A10 - A13) gegenübergestellt. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt weiter unten.

In beiden Funktionen zeigen sich zunächst gemeinsame Ähnlichkeiten des Verlaufs in Abhängigkeit von den jeweiligen Meßstrecken. In einer Regressionsanalyse mit linearem Ansatz wurden die zwischen den drei Texturkennwerten und dem Rollwiderstandsbeiwert geltenden Korrelationskoeffizienten (Tab. 8.2) bestimmt. Die Bilder 8.12, 8.13 und 8.14 zeigen die zugehörigen grafischen Darstellungen der Korrelationen.

Die festgestellten Korrelationen zwischen Rollwiderstandsbeiwert und Textur weisen nur eine geringe Abhängigkeit vom Typ der vier Prüfreifen auf, wie Bild 8.15 zeigt.

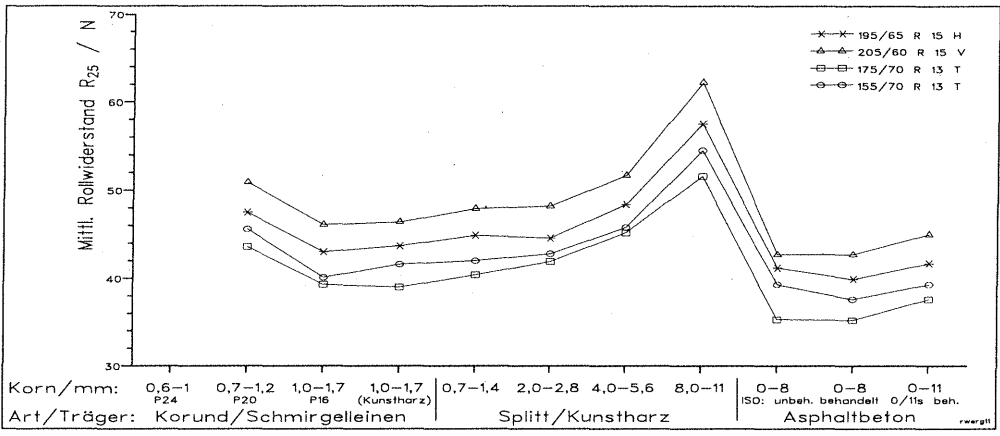


Bild 8.6: Mittlere Rollwiderstände im Prüfstandsversuch - Prüfreifen 21b - 24b

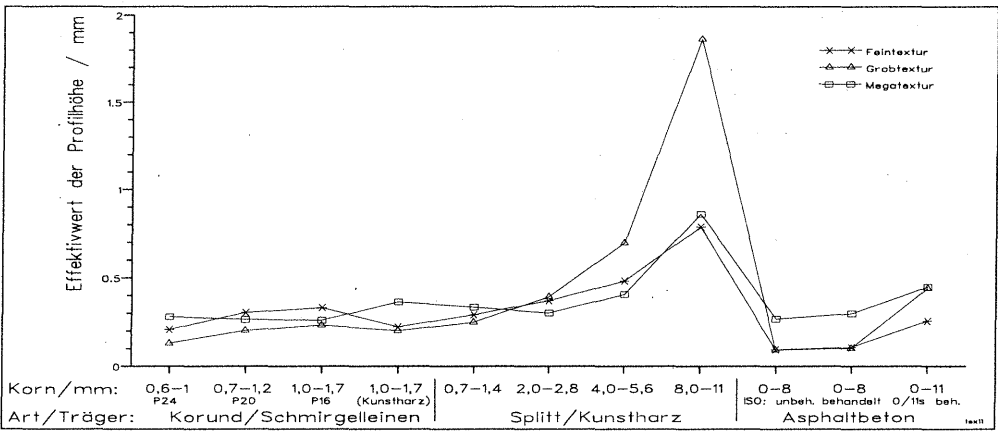


Bild 8.7: Kennwerte für Fein-, Grob- und Megatextur im Prüfstandsversuch zur Texturabhängigkeit

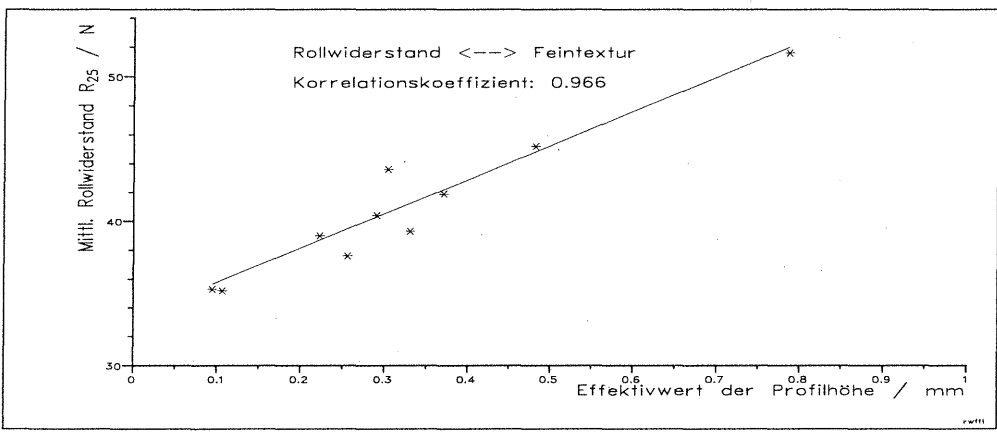


Bild 8.8: Zur Abhängigkeit des Rollwiderstandes von der Feintextur im Prüfstandsversuch

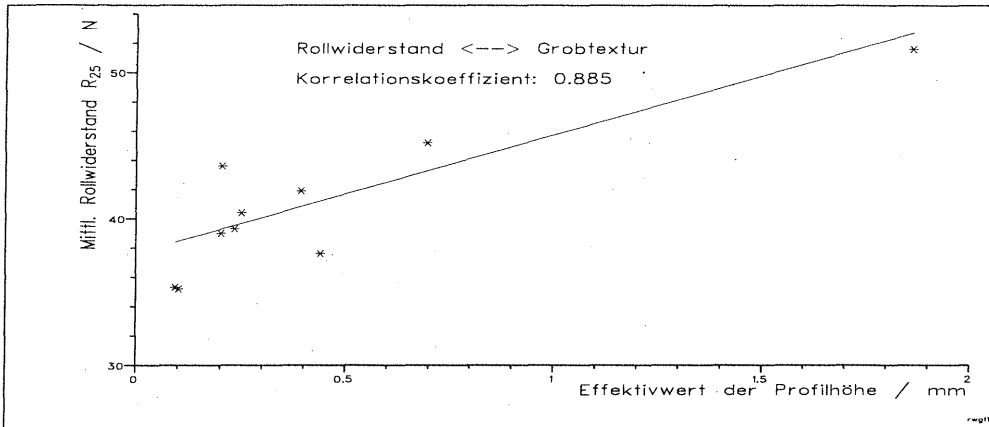


Bild 8.9: Zur Abhängigkeit des Rollwiderstandes von der Grobtextur im Prüfstandsversuch

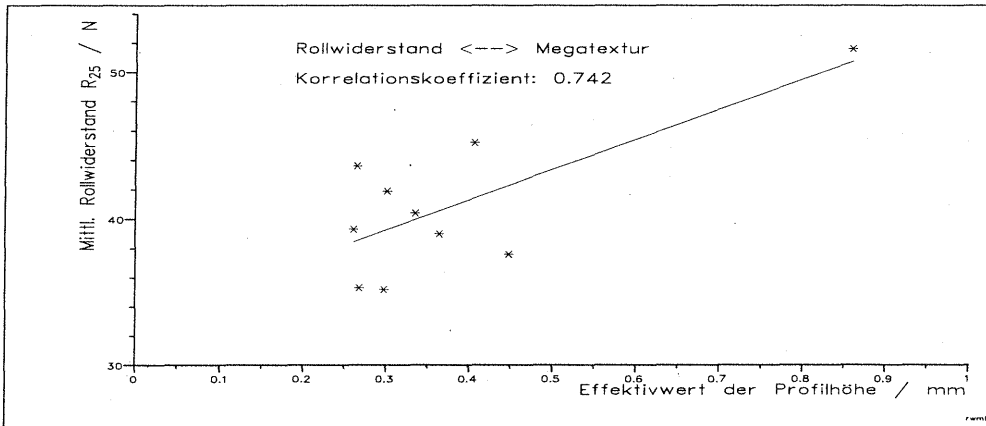


Bild 8.10: Zur Abhängigkeit des Rollwiderstandes von der Megatextur im Prüfstandsversuch

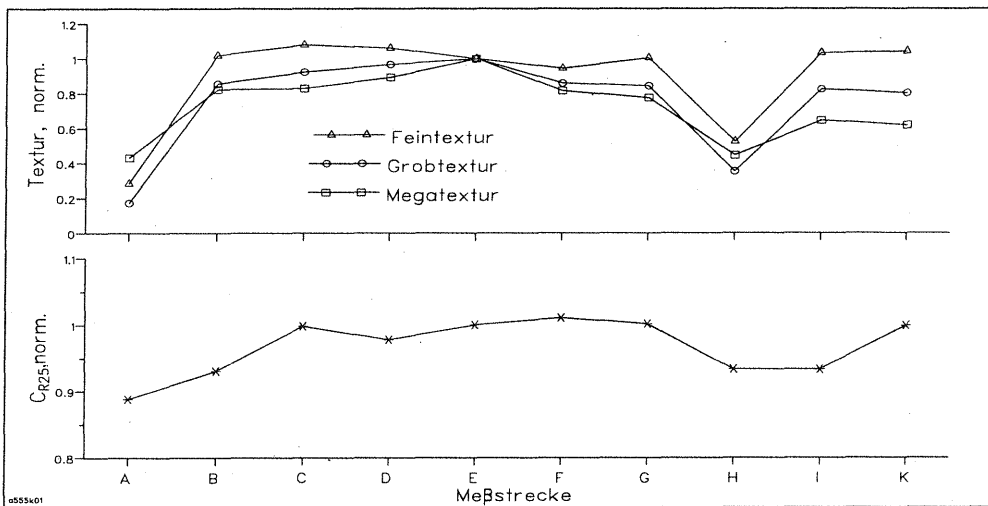


Bild 8.11: Auf Meßstrecke E normierte Texturkennwerte und normierter Rollwiderstandsbeiwert - Messung A555

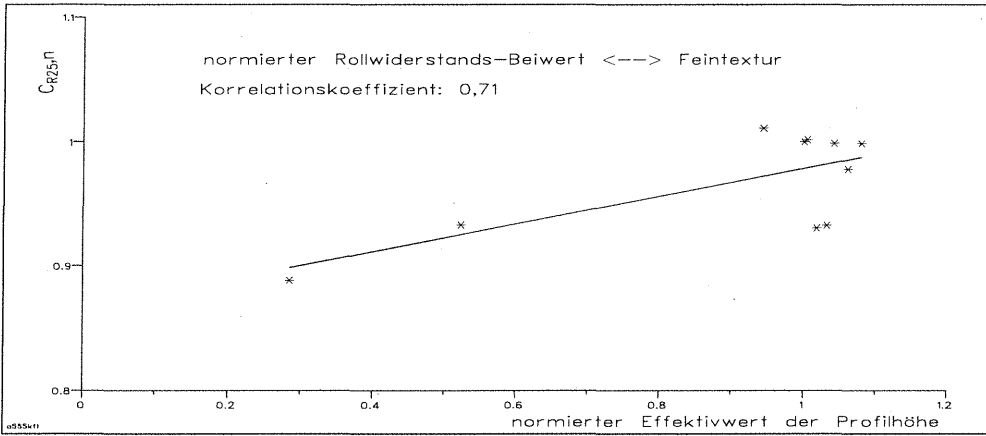


Bild 8.12: Korrelation zwischen Feintextur und Rollwiderstandsbeiwert - Messung A555

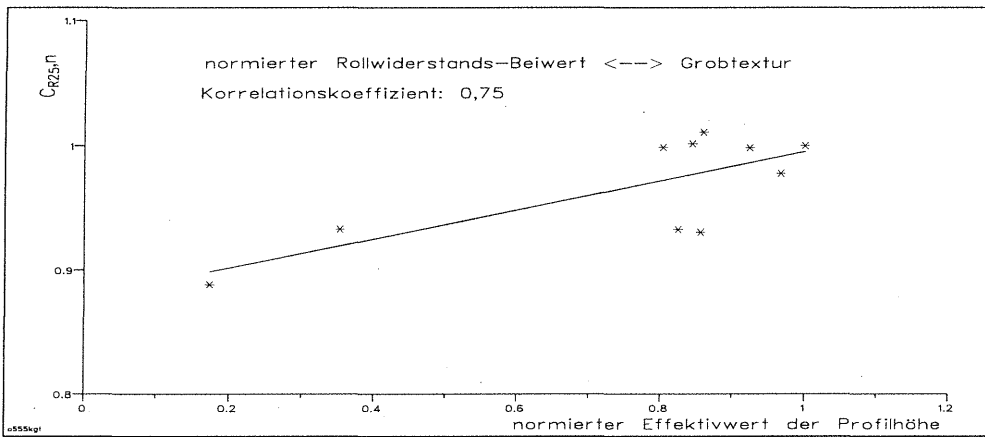


Bild 8.13: Korrelation zwischen Grobtextur und Rollwiderstandsbeiwert - Messung A555

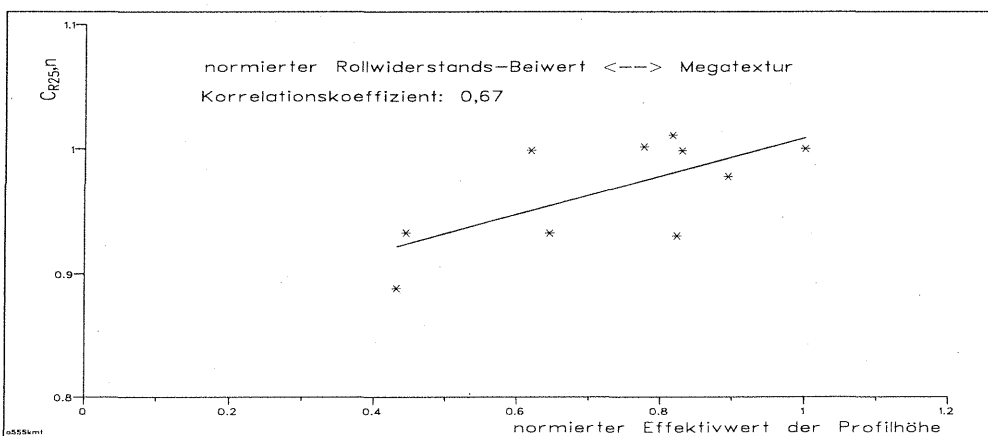


Bild 8.14: Korrelation zwischen Megatextur und Rollwiderstandsbeiwert - Messung A555

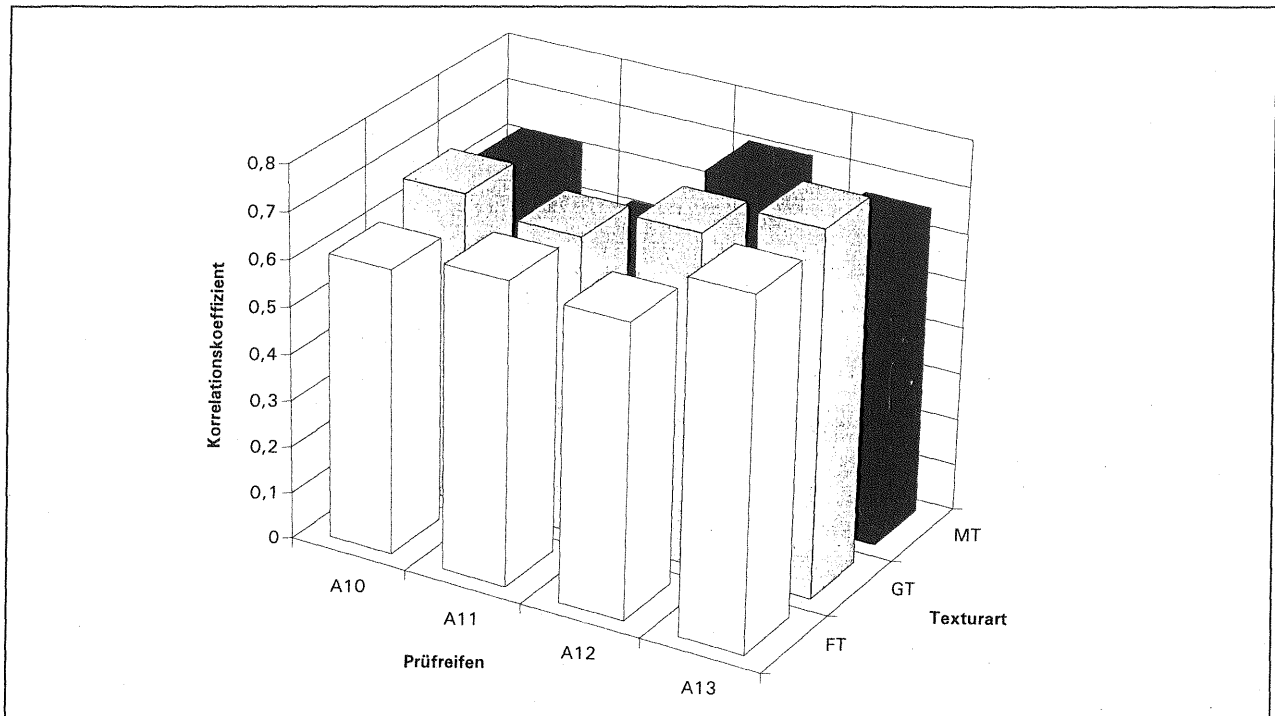


Bild 8.15: Korrelationskoeffizienten zwischen Rollwiderstandsbeiwert und Textur - Messung A555

9 Vergleich und Analyse

9.1 Rollwiderstand

Ein Vergleich der Meßeigenschaften der unterschiedlichen Meßsysteme kann sinnvoll nur für Messungen mit vergleichbaren Versuchsbedingungen durchgeführt werden. Für die Einstellungen des Prüfreifens - Radlast und Fülldruck - und auch hinsichtlich der Fahrbahnoberfläche konnte dies weitgehend gewährleistet werden. Der Einfluß der Prüfgeschwindigkeit auf den Rollwiderstand ist, wie zuvor gezeigt, nur gering ausgeprägt. Dennoch wurden aus den beiden anderen Meßreihen (im Prüfstand und auf dem Testgelände), bei denen bei drei Geschwindigkeiten geprüft wurde, nur die Ergebnisse bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h herangezogen, da die Meßfahrten auf der A555 unter fließendem Verkehr nur bei dieser Geschwindigkeit stattfinden konnten (Tab. 9.1).

Die im Prüfstand ermittelte Reihung der Rollwiderstände wird bei der Messung auf der A555 in Bezug zur Prüfstandsmessung relativ gut bestätigt.

Die Messungen auf dem Testgelände zeigen insgesamt ein weniger gutes Ergebnis. Eine Übereinstimmung wird nur bei Reifen A10 und A11 er-

zielt; die Werte für Reifen A12 und A13 weichen sowohl von der Messung auf der A555 als auch von den Prüfstandsergebnissen erheblich ab. Bild 9.1 zeigt im Überblick sämtliche drei Meßergebnisse der 4 Prüfreifen.

Messung	PFF	A555-H	TG
Prüfreifen			
A10	0,802	0,794	0,76
A11	1,051	1,178	1,038
A12	0,826	0,962	1,088
A13	1,046	1,264	1,304

Tab. 9.1: Mittlere Rollwiderstandsbeiwerte (c_{R25} in %) der Prüfstandsmessung (PFF) und der beiden Messungen auf der Straße (A555/Meßstrecke H und Testgelände TG) - Prüfgeschwindigkeit 90 km/h

Die auftretenden Relationen untereinander werden durch eine Analyse der linearen Regression der beteiligten Meßverfahren verdeutlicht. Die beiden

entsprechenden Korrelationskoeffizienten zeigt Tabelle 9.2.

Fehleranteil vorhanden, so daß kein besseres Resultat erzielt werden kann.

Prüfstand und A555/H :	0,95
Prüfstand und Testgelände :	0,67

Tab. 9.2: Korrelationskoeffizienten zwischen Messungen im Prüfstand und mit dem Meßanhänger

9.2 Einfluß der Textur

In Tabelle 9.3 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den drei Texturkennwerten und dem Rollwiderstand (Prüfreifen A10 - A13) für Messungen im Prüfstand und mit dem Meßanhänger auf der A555 zusammengestellt (s.a. Kap. 8.2 mit der Darstellung der Regressionen).

Es bestätigt sich die relativ gute Übereinstimmung der Messungen im Prüfstand und mit dem Meßanhänger auf der A555/Meßstrecke H. Eine Übereinstimmung zwischen Prüfstandswerten und Messungen auf dem Testgelände ist im statistischen Sinn nur gering ausgeprägt und verdeutlicht Defizite bei der Reproduzierbarkeit und Meßgenauigkeit.

	Prüfstand	Meßanhänger
Feintextur - Rollwiderstand	0,97	0,71
Grobttextur - Rollwiderstand	0,89	0,75
Megatextur - Rollwiderstand	0,74	0,67

Innerhalb der untersuchten Datensätze konnte kein eindeutiger Anhaltspunkt für eine systematische Fehlerursache beim Meßsystem oder bei der Meßmethodik gefunden werden. Möglicherweise ist aufgrund der begrenzten Länge der Versuchsfahrbahn und wegen Problemen bei der Konstanthaltung der Meßgeschwindigkeit ein hoher, zufälliger

Tab. 9.3: Korrelationskoeffizienten der Messung im Prüfstand und mit dem Meßanhänger im Vergleich (Prüfreifen A10 - A13)

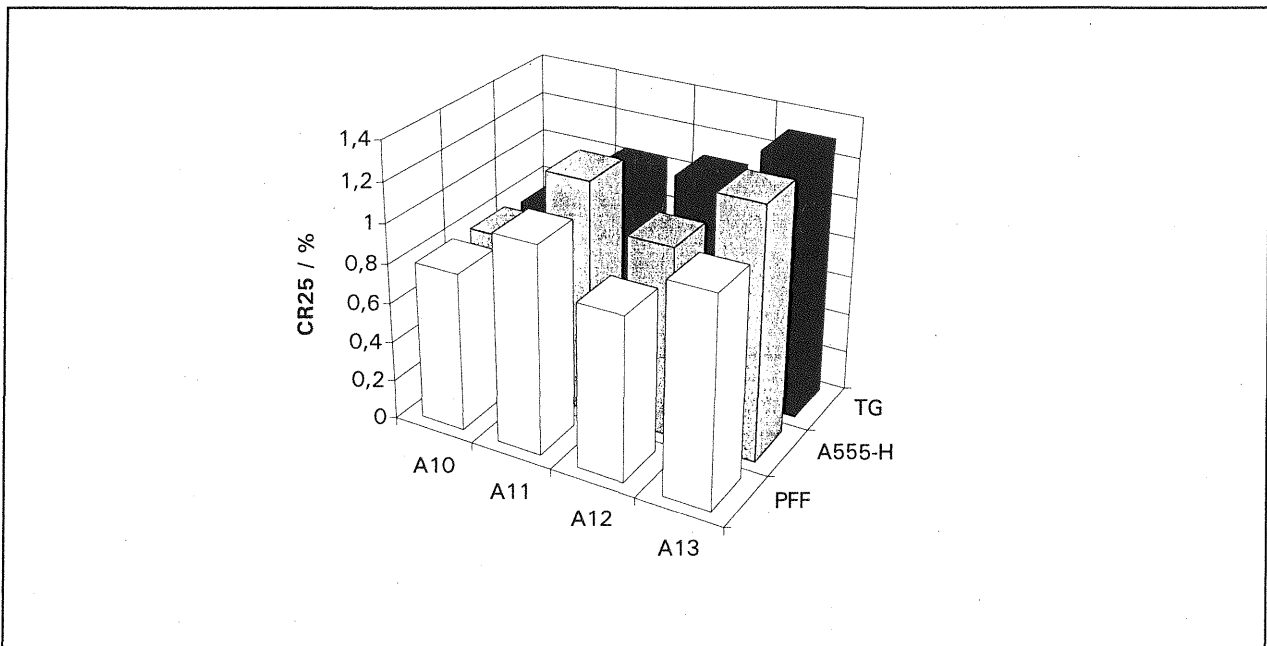


Bild 9.1: Mittlere Rollwiderstandsbeiwerte (CR_{25} in %) der Messungen im Prüfstand (PFF) und auf der Straße (A555/Meßstrecke H und Testgelände TG) - Prüfgeschwindigkeit 90 km/h

Beide Analysen zeigen lediglich hinsichtlich des Einflusses der Megatextur mit den geringsten Koeffizienten eine einheitliche Tendenz. Der hohe Grad an Übereinstimmung bei der Prüfstandsmessung zwischen Feintextur und Rollwiderstand wird durch das Ergebnis der Anhängermessung nicht ganz bestätigt. Hier wird die am Prüfstand erzielte Tendenz zugunsten der Grobtextur geändert. Die Ursachen hierfür könnten in der nicht definierten Reproduzierbarkeit der Rollspur beim Anhänger in Verbindung mit Änderungen der Radlast - bei der Anhängermessung treten wesentliche höhere Radlastschwankungen durch Schwingungsanregung des Anhängerchassis und aufgrund von Änderungen des Sturzes des Prüfrades zusätzliche Seiten- bzw. Längskraftänderungen auf - zu sehen sein.

Als Ergebnis der Analyse ist festzuhalten, daß die vermutete geringere Meßgenauigkeit einer Anhängermessung im Vergleich zur Messung im Prüfstand durch die Messungen bestätigt wird, da sich bei beiden Meßsystemen hinsichtlich der Möglichkeit zur Einflußnahme auf die Randbedingungen (s.a. Kap. 3 bzw. Kap. 5) wesentliche Unterschiede ergeben.

10 Zusammenfassung

Bei der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden Meßsysteme und -verfahren zur Messung des Rollwiderstandes von Pkw-Reifen in einem Innentrommelprüfstand und mit einem Meßanhänger entwickelt, die in mehreren Untersuchungen erfolgreich eingesetzt worden sind. Eine Bewertung und ein Vergleich der jeweiligen Meßeigenschaften konnte bislang nicht durchgeführt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde gezielt der Frage nachgegangen, inwieweit Ergebnisse einer Messung im Prüfstand auf Ergebnisse einer Straßenmessung übertragen werden können und umgekehrt.

Nach einer allgemeinen Diskussion der Einflußgrößen einer Rollwiderstandsmessung werden in einer spezifischen Bewertung der Meßsysteme vorab die Eigenschaften und deren zu erwartende Auswirkung diskutiert. Anhand von Messungen, die im Prüfstand und mit dem Meßanhänger durchgeführt wurden, wird die qualitative Eignung der beiden Verfahren hinsichtlich der Meßeigenschaften des Rollwiderstandes und des Textureinflusses näher untersucht. Eine Analyse der gegenseitigen Korrelationen bestätigt im wesentlichen die erwarteten Eigenschaften.

Als grundsätzliches Ergebnis zeigt sich, daß weniger aufgrund systematischer Fehler als aufgrund zufälliger Fehler die Meßgenauigkeit der Messung mit dem Anhänger im Mittel geringer anzusetzen ist und vermehrt eine größere Streuung der Meßwerte verbunden mit einer höheren Ausreißerrate toleriert werden muß. Überdies wird die Qualität der Messung wesentlich dadurch beeinflusst, ob die entwickelte Standardmeßmethodik (Zweipunktmethodik) verwendet werden kann. Die Qualität von Messungen im Prüfstand, bei denen wichtige Parameter unter Laborbedingungen wesentlich besser konstant gehalten können, wird durch die Anhängermessung somit nicht erreicht.

Die Vielzahl der bei einer Anhängermessung beteiligten Größen - z.B. Temperatur, Rollspur und Radlastschwankungen - erlaubt keine Trennung der anteiligen Größen und führt so zu einer Erhöhung der Streuung der Messungen aufgrund des zufälligen Charakters dieser Störgrößen und Fehlerquellen.

Dennoch weist jedes System mit Blick auf den hauptsächlichlichen Einsatz spezifische Vorteile auf, die als systematische Eigenschaften bei den Anwendungen zu berücksichtigen sind. So steht mit der Rollwiderstandsmessung im Prüfstand ein Verfahren zur Verfügung, bei dem als Schwerpunkt mehr der reifenseitige als der fahrbahnseitige Aspekt des Rollwiderstandes im Vordergrund steht. Hingegen kann mit dem Meßanhänger vornehmlich der Einfluß der Oberflächeneigenschaften von verschiedenartigen Fahrbahnen und weniger der Einfluß des Reifens auf den Rollwiderstand untersucht werden.

Beide Systeme ergänzen sich und können bei Fragestellungen zum Rollwiderstand sowohl von Reifen und als auch von Fahrbahnoberflächen insgesamt einen Beitrag zur Lösung des Konflikts zwischen Mobilität einerseits und Umweltschutz andererseits liefern.

Literatur

- [1] Bernhardt, W.: "Weiterentwicklung bei Otto- und Dieselmotoren, Motoren- Getriebe-Management", in Appel, H. (Hrsg): "Stadttauto - Mobilität, Ökologie, Ökonomie, Sicherheit", Fortschritte der Fahrzeugtechnik, Band 13, S. 167 ff, Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden 1995
- [2] Sander, K.: "Entwicklung und Erprobung von Verfahren zu Rollwiderstandsmessungen von Pkw-Reifen", Schlußbericht zu Projekt 91611 der BASt, Mai 1994
- [3] Sander, K.: "Untersuchung rollwiderstandsarmer Pkw-Reifen", Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 13, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1995
- [4] Sander, K.: "Messung des Rollwiderstandes und der Textur von 6 Fahrbahnbelägen", Schlußbericht zu Projekt 95 533 der BASt, November 1995, (nicht zur allgemeinen Veröffentlichung freigegeben)
- [5] Ullrich, S., Glaeser, K.-P. u. Sander, K.: "Der Einfluß der Textur auf Reifen/Fahrbahngeräusch und Rollwiderstand", Schlußbericht zu Projekt 90618/V6 u. 93530/F3, Juni 1995
- [6] Schuring, D.J.: "The rolling loss of pneumatic tires", Rubber chemistry and technology, Vol. 53, 1980, p. 600-727
- [7] Clark, S.K. u. Schuring, D.J.: "Interlaboratory tests for rolling resistance", SAE-Paper 780636, 1978
- [8] Brunot, C.A. u. Schuring, D.J.: "SAE interlaboratory tests for rolling resistance of passenger car tires Part I", SAE-Paper 831025, 1983
- [9] Krehan, P. u. Körper, W.: "Messung des Rollwiderstandes auf der Straße", ATZ 93 (1991), S. 626-631
- [10] Hörner, H.J. u. Kollmeier, H.: "Untersuchungen zur Verkehrssicherheit von PKW-Reifen - Reifenuntersuchungen auf der Straße, im Innentrommelprüfstand und in Außentrommelprüfständen", 1. Zwischenbericht, BASt, Dezember 1986
- [11] Janssen, M.L. u. Hall, G.L.: "Effect of ambient temperature on radial tire rolling resistance", SAE-Paper 800090, 1980
- [12] DIN ISO 8767, „Verfahren zur Messung des Rollwiderstandes“, Norm-Entwurf v. 23.11.92
- [13] Lukaszewicz, J.: Prüfstand Fahrzeug-Fahrbahn der Bundesanstalt für Straßenwesen, VDI-Berichte Nr. 1088, 1993
- [14] Verfahren zur Messung der Geräuschemissionen von Straßenoberflächen, (GESTrO-92), herausgegeben durch den Bundesminister für Verkehr, ARS Nr.16/1992 vom 16. März 1992

Anlagen

Zum Rollwiderstand:

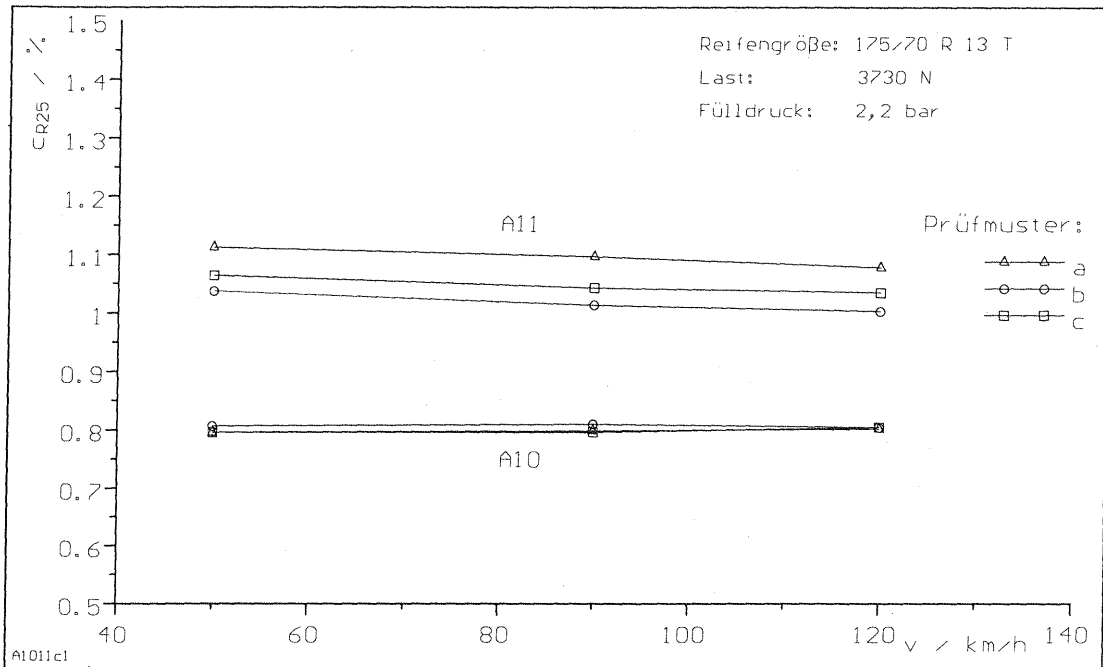
- Messungen im Prüfstand PFF
- Messungen auf dem Testgelände
- Messungen auf der A555

Zur Textur:

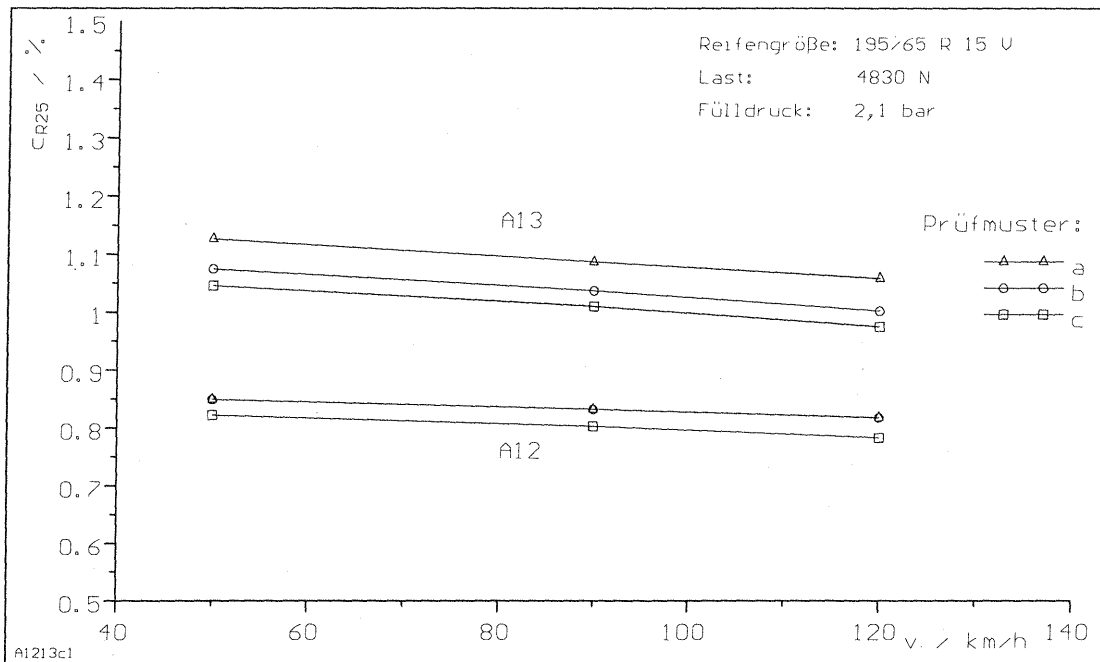
- Fahrbahn im Prüfstand PFF
- Fahrbahn des Testgeländes
- Fahrbahnen der A555
- Koeffizienten der Korrelation zwischen Textur und Rollwiderstandsbeiwert der Messung auf der A555

		50 km/h	90 km/h	120 km/h	R ₂₅ -Mw	C _{R25} -Mw
A10 175/70 R 13 T 3730 N 2,2 bar	a-I	29,8	30,0	30,2	29,8	0,799
	a-II	29,6	29,7	29,5		
	Mw-a	29,7	29,9	29,9		
	b-I	30,3	30,5	30,3	30,0	0,804
	b-II	29,6	29,6	29,7		
	Mw-b	30,0	30,1	30,0		
	c-I	30,1	30,0	29,7	29,8	0,799
	c-II	29,3	29,3	30,2		
	Mw-c	29,7	29,7	30,0		
	Mw	29,8	29,9	29,9	29,9	0,801
C _{R25}	0,799	0,802	0,802			
A11 175/70 R 13 T 3730 N 2,2 bar	a-I	41,8	40,7	40,3	41,0	1,1
	a-II	42,2	41,1	40,1		
	Mw-a	42,0	40,9	40,2		
	b-I	38,8	38,2	37,7	38,0	1,019
	b-II	38,5	37,4	37,1		
	Mw-b	38,7	37,8	37,4		
	c-I	39,7	38,9	38,9	39,1	1,048
	c-II	39,6	38,8	38,3		
	Mw-c	39,7	38,9	38,6		
	Mw	40,1	39,2	38,7	39,4	1,055
C _{R25}	1,075	1,051	1,038			
A12 195/65 R 15 V 4830 N 2,1 bar	a-I	41,8	41,3	40,0	40,6	0,841
	a-II	40,7	40,3	39,2		
	Mw-a	41,3	40,8	39,6		
	b-I	41,4	40,8	40,1	40,2	0,832
	b-II	40,6	39,6	38,8		
	Mw-b	41,0	40,2	39,5		
	c-I	40,0	39,2	38,3	38,8	0,803
	c-II	39,3	38,4	37,3		
	Mw-c	39,7	38,8	37,8		
	Mw	40,6	39,9	39,0	39,9	0,825
C _{R25}	0,841	0,826	0,807			
A13 195/65 R 15 V 4830 N 2,1 bar	a-I	55,0	53,2	51,7	52,7	1,091
	a-II	53,7	51,7	50,5		
	Mw-a	54,4	52,5	51,1		
	b-I	52,1	50,8	48,8	50,1	1,037
	b-II	51,7	49,5	47,9		
	Mw-b	51,9	50,1	48,4		
	c-I	50,6	48,9	47,3	48,8	1,01
	c-II	50,4	48,7	46,8		
	Mw-c	50,5	48,8	47,1		
	Mw	52,2	50,5	48,8	50,5	1,046
C _{R25}	1,081	1,046	1,011			

Rollwiderstandsmessung Prüfstand PFF: Einzelergebnisse und Mittelwerte
Rollwiderstand R₂₅ in N und Beiwert C_{R25} in % - Prüfreifen A10-A13



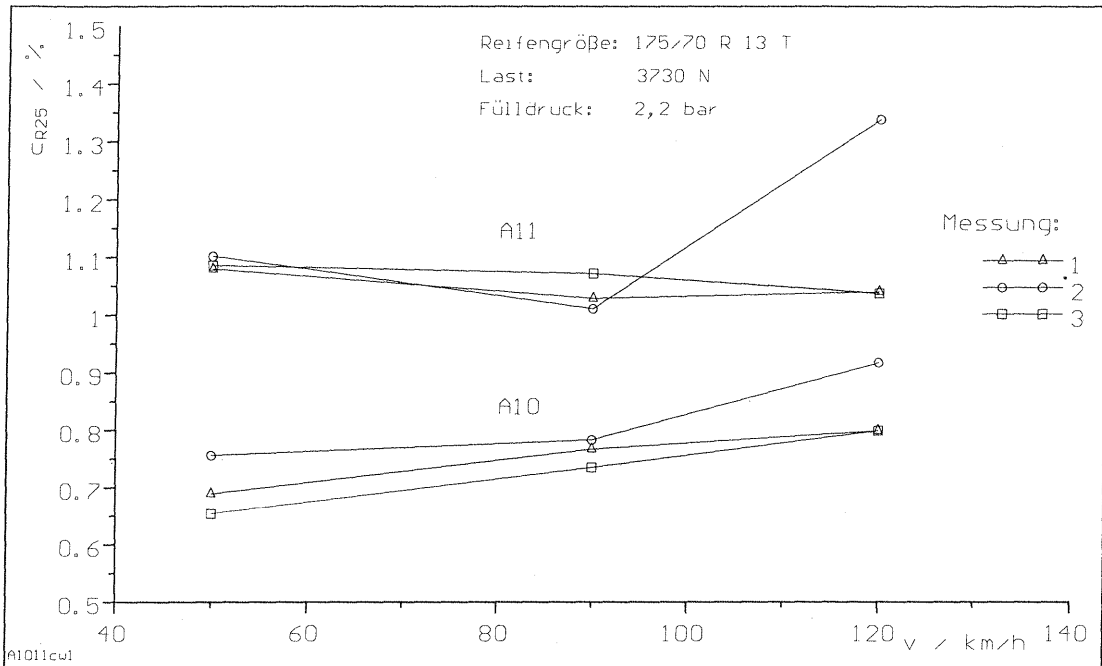
Rollwiderstandsmessung Prüfstand PFF: Prüfreifen A10 und A11 - Belag AB 0/11s



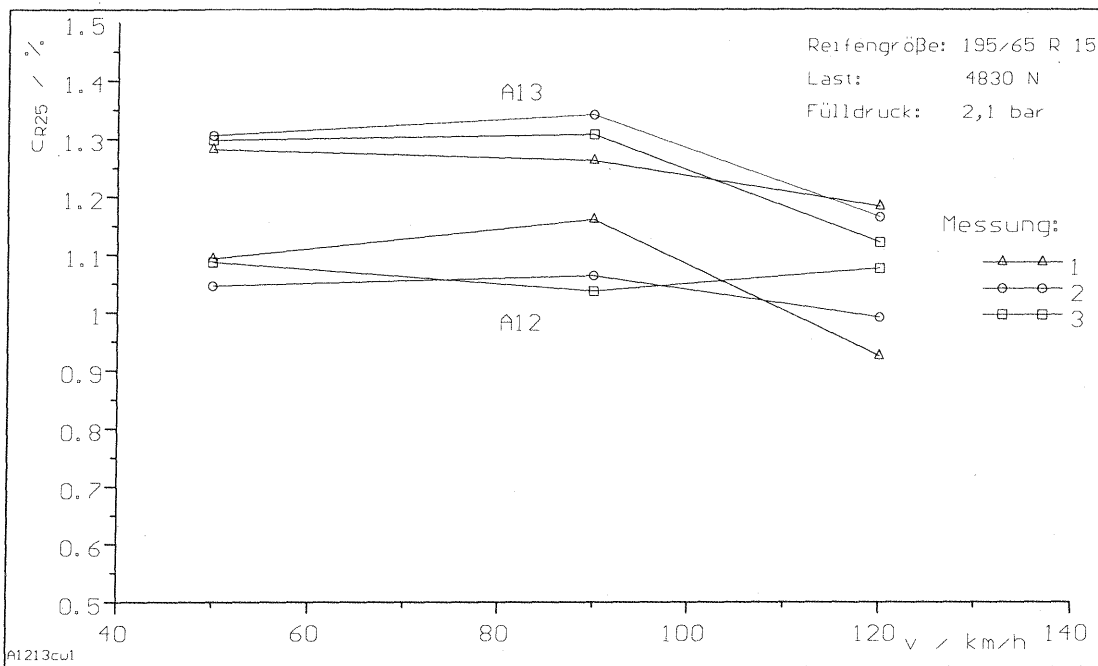
Rollwiderstandsmessung Prüfstand PFF: Prüfreifen A12 und A13 - Belag AB 0/11s

		50 km/h	90 km/h	120 km/h	R ₂₅ -Mw	c _{R25} -Mw
A10 175/70 R 13 T 3730 N 2,2 bar	I	25,7	28,6	29,8	28,1	0,753
	II	28,2	29,2	34,2		
	III	24,4	27,4	29,8		
	Mw-R ₂₅	26,1	28,4	29,8		
	Mw-c _{R25}	0,699	0,761	0,799		
A11 175/70 R 13 T 3730 N 2,2 bar	I	40,3	38,4	38,8	39,4	1,055
	II	41,1	37,7	49,9		
	III	40,5	40,0	38,7		
	Mw-R ₂₅	40,6	38,7	38,8		
	Mw-c _{R25}	1,088	1,038	1,038		
A12 195/65 R 15 V 4830 N 2,1 bar	I	52,8	56,1	44,7	50,9	1,054
	II	50,5	51,4	47,9		
	III	52,5	50,1	52,0		
	Mw-R ₂₅	51,9	52,5	48,2		
	Mw-c _{R25}	1,075	1,088	0,998		
A13 195/65 R 15 V 4830 N 2,1 bar	I	61,9	61,0	57,2	60,5	1,252
	II	63,1	64,8	56,3		
	III	62,7	63,2	54,2		
	Mw-R ₂₅	62,6	63,0	55,9		
	Mw-c _{R25}	1,295	1,304	1,157		

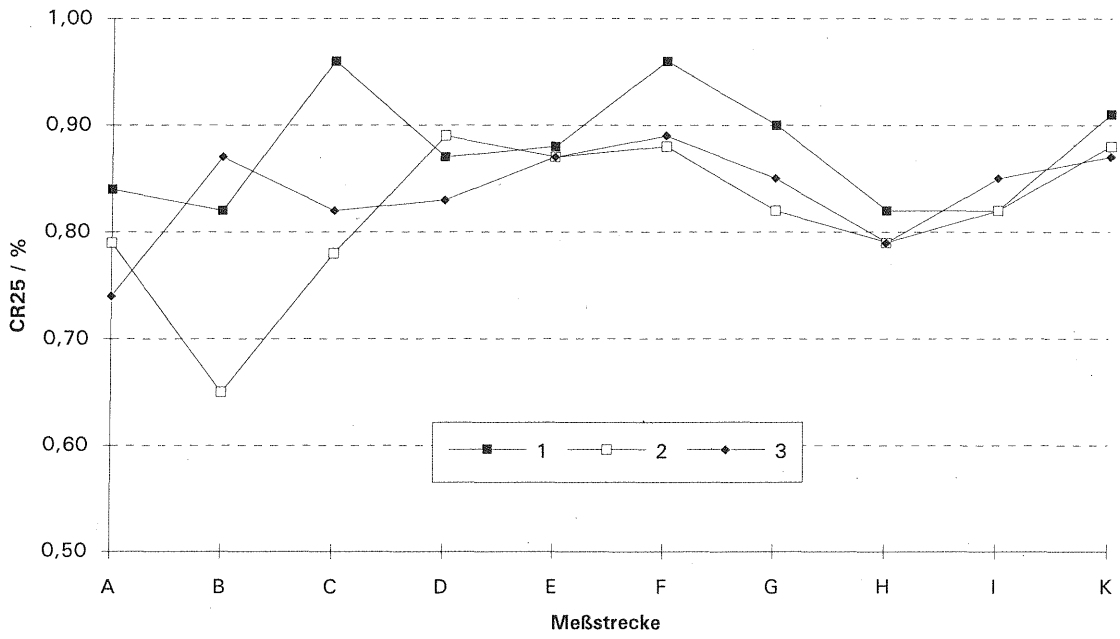
Fahrversuche Testgelände: Einzelergebnisse und Mittelwerte
 Rollwiderstand R₂₅ in N und Beiwert c_{R25} in % - Prüfreifen A10 - A13, Belag AB 0/16



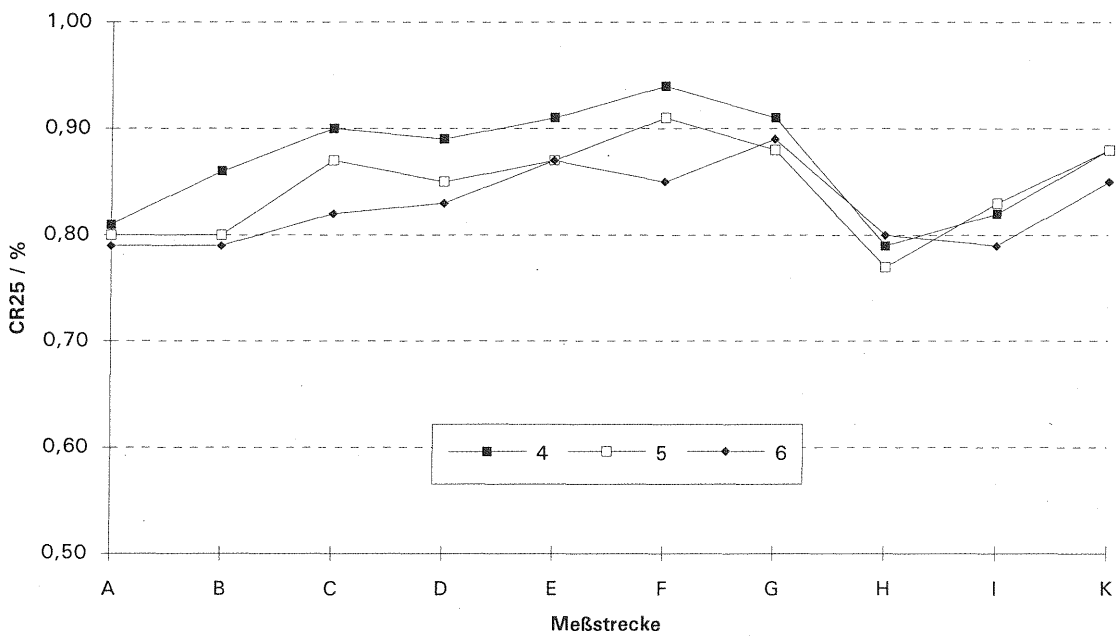
Rollwiderstandsmessung Testgelände: Prüfreifen A10 und A11, Belag AB 0/16



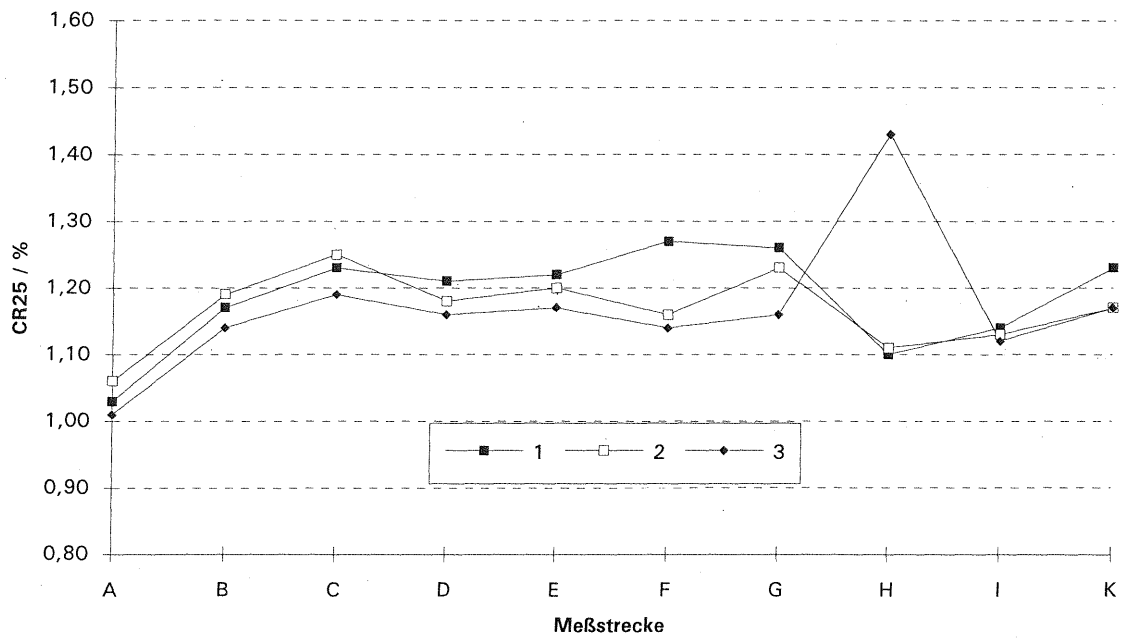
Rollwiderstandsmessung Testgelände: Prüfreifen A12 und A13, Belag AB 0/16



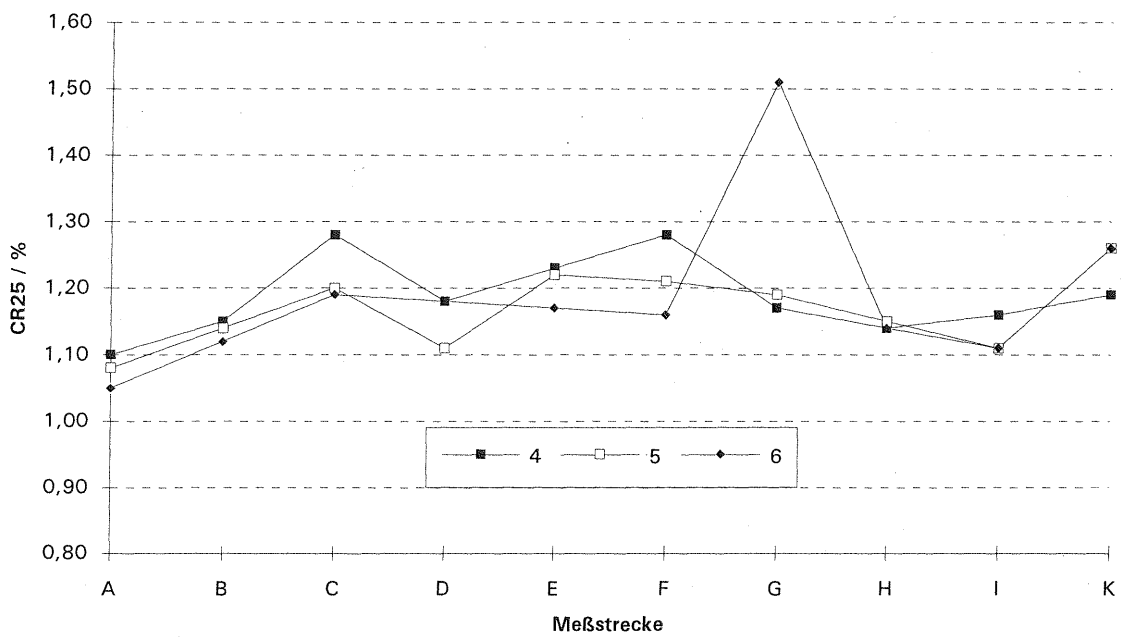
Rollwiderstandsmessung A555: Prüfreifen A10 - Meßreihe 1



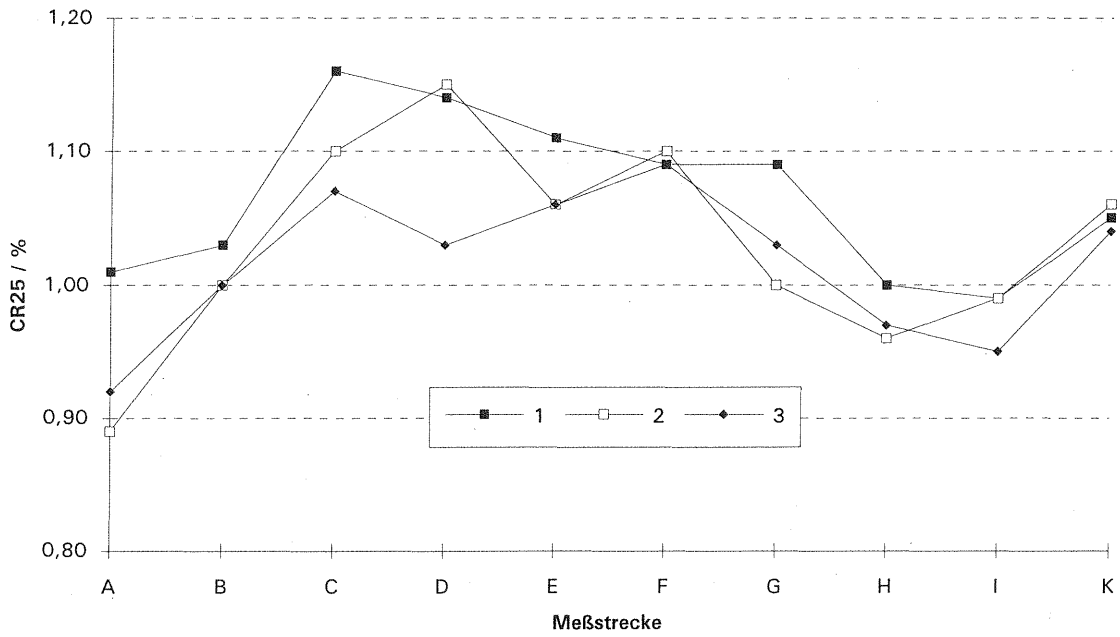
Rollwiderstandsmessung A555: Prüfreifen A10 - Meßreihe 2



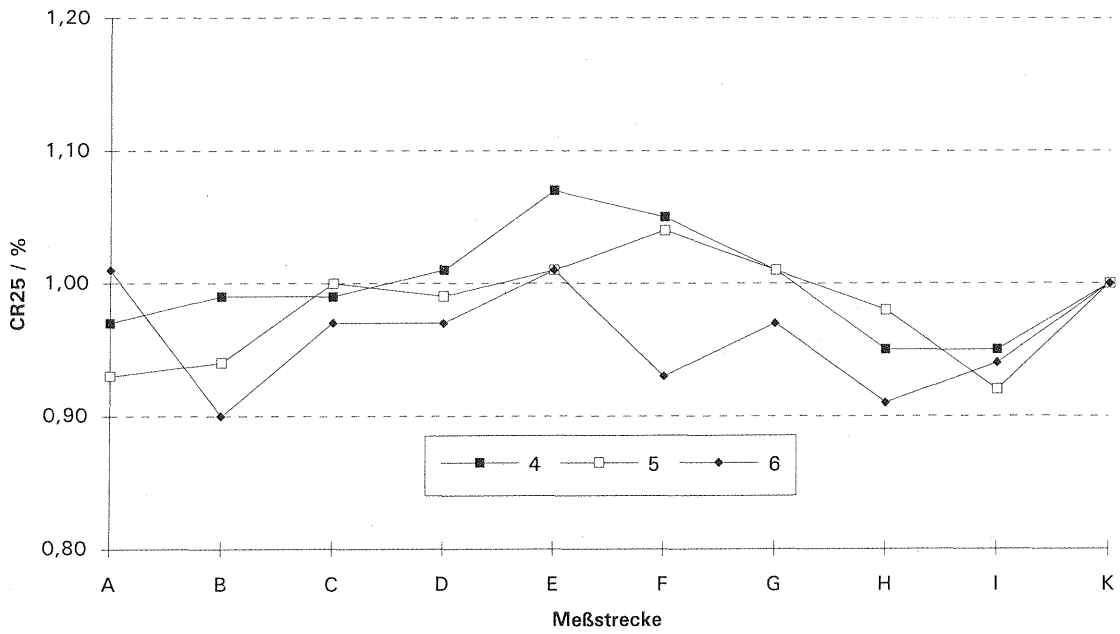
Rollwiderstandsmessung A555: Prüfreifen A11 - Meßreihe 1



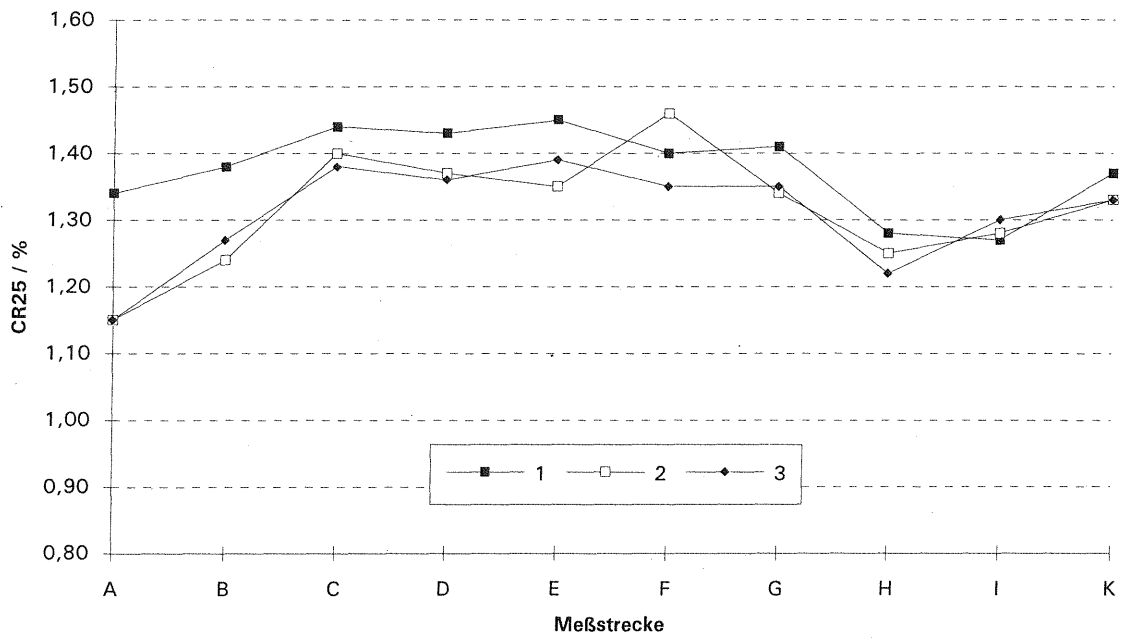
Rollwiderstandsmessung A555: Prüfreifen A11 - Meßreihe 2



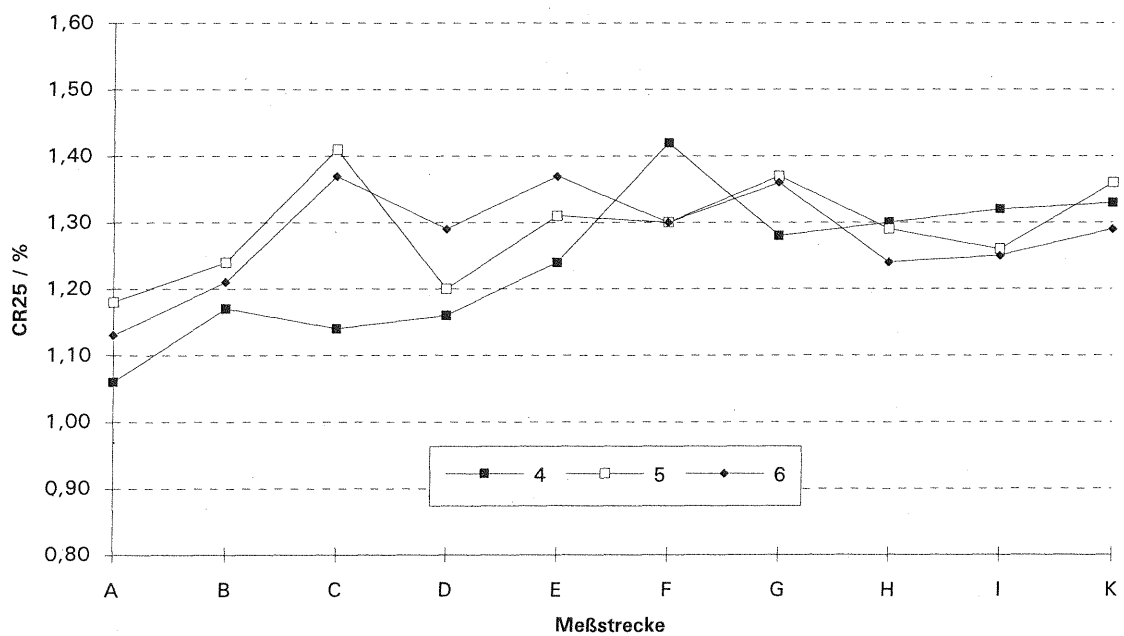
Rollwiderstandsmessung A555: Prüfreifen A12 - Meßreihe 1



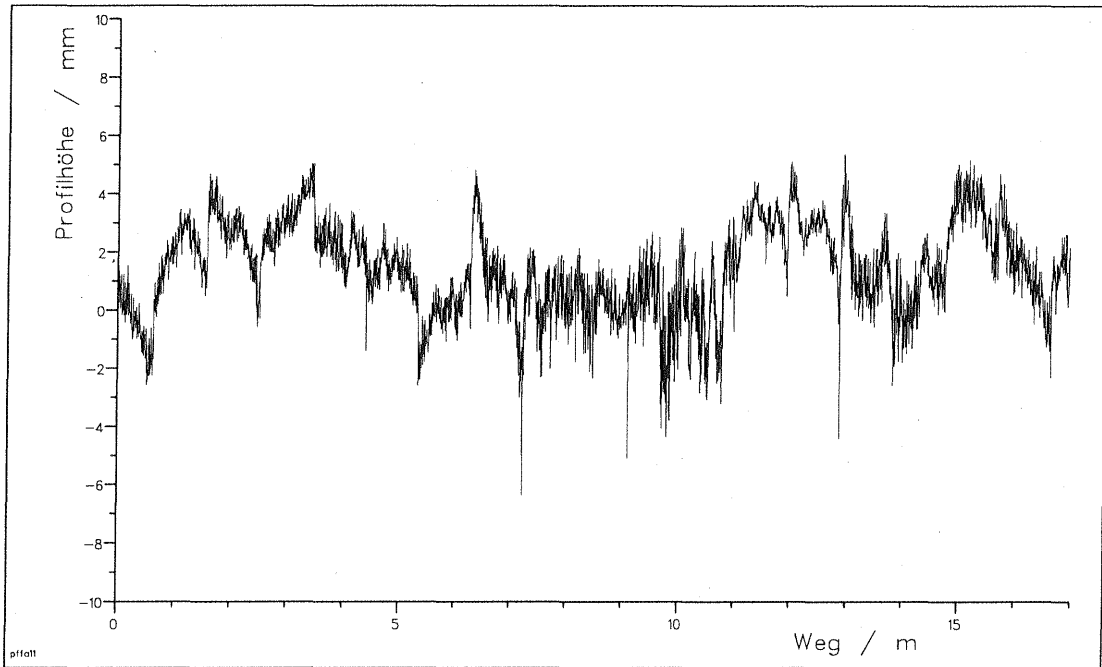
Rollwiderstandsmessung A555: Prüfreifen A12 - Meßreihe 2



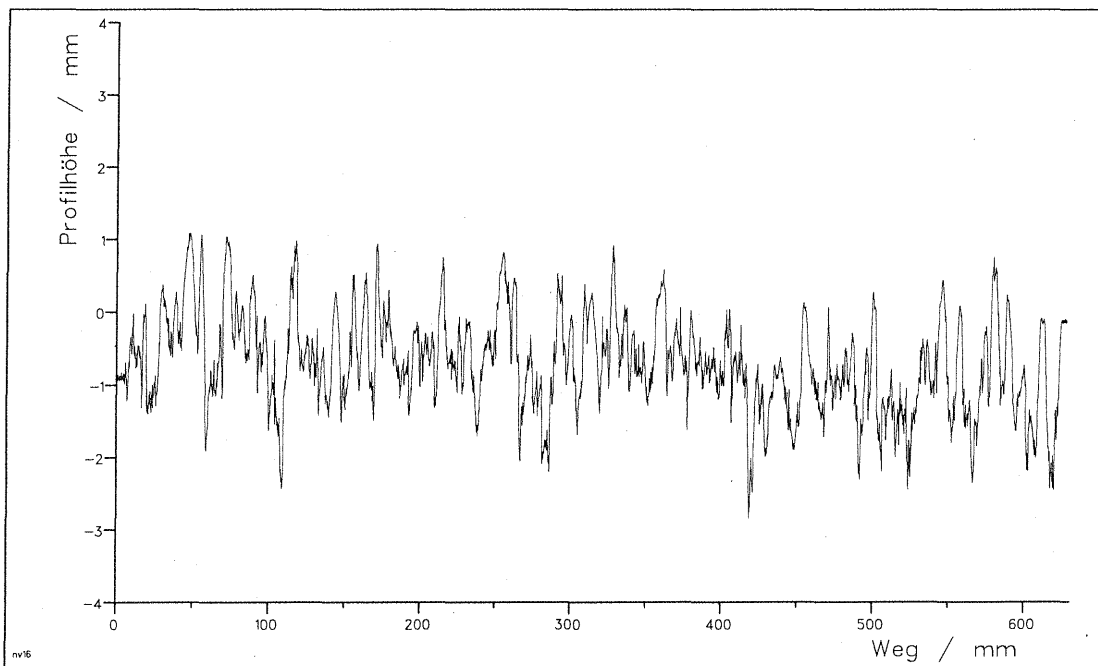
Rollwiderstandsmessung A555: Prüfreifen A13 - Meßreihe 1



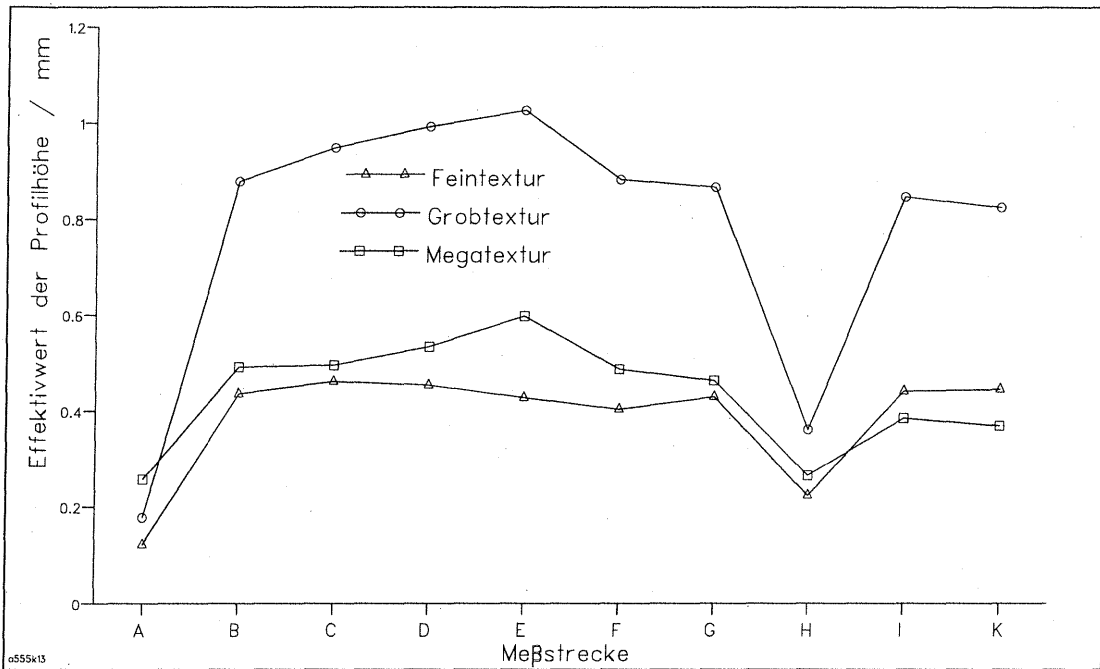
Rollwiderstandsmessung A555: Prüfreifen A13 - Meßreihe 2



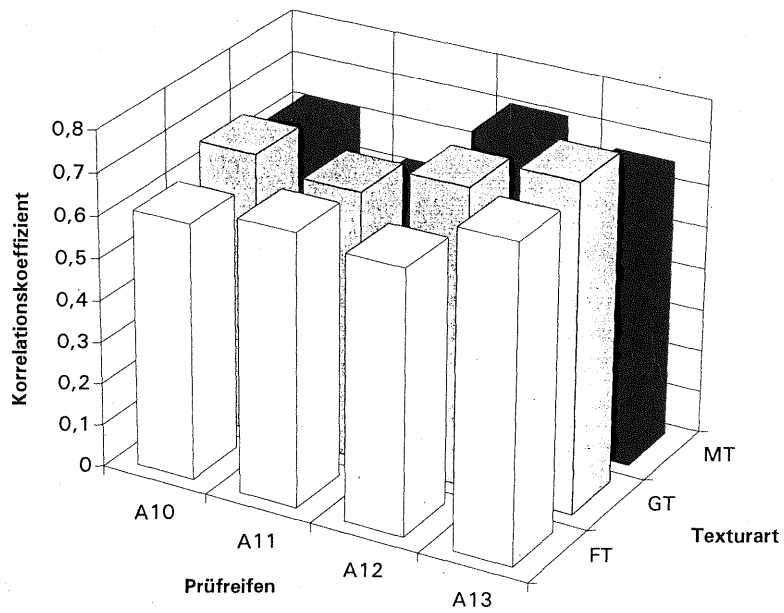
Längsprofil der Fahrbahn im Prüfstand PFF - Asphaltbeton 0/11s



Profil der Fahrbahn des Testgeländes - Asphaltbeton 0/16



Texturkennwerte der Fahrbahnen auf der A555



Koeffizienten der Korrelation zwischen Textur und Rollwiderstandsbeiwert der Messung auf der A555

A555/A10-1	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
Messung	N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
a1	120,6	3763	12,0	118	34,2	288,2	348,3	31,2	0,84
b1	124,0	3782	14,0	120	32,5	290,1	351,1	30,5	0,82
c1	126,6	3788	12,3	120	33,1	289,8	350,4	35,7	0,96
d1	123,4	3770	11,9	120	33,1	291,5	352,8	32,3	0,87
e1	124,0	3772	12,1	120	32,7	290,1	351,2	32,8	0,88
f1	125,5	3751	14,3	117	33,9	291,5	350,4	35,9	0,96
g1	121,8	3768	13,5	124	33,4	291,8	349,4	33,6	0,90
h1	119,1	3794	13,5	117	33,6	289,0	346,0	30,5	0,82
i1	122,4	3756	15,0	117	33,0	288,6	348,1	30,5	0,82
k1	124,0	3768	12,6	116	32,4	289,4	349,2	33,9	0,91
a2	116,4	3755	12,7	114	32,7	290,5	347,6	29,3	0,79
b2	116,4	3789	13,1	120	32,1	291,2	351,2	24,1	0,65
c2	124,5	3785	14,2	118	32,6	288,1	350,5	29,0	0,78
d2	123,3	3781	13,3	121	33,4	290,1	349,1	33,3	0,89
e2	122,5	3769	13,1	120	32,7	290,7	349,9	32,5	0,87
f2	122,2	3765	12,9	115	34,9	290,5	350,0	32,8	0,88
g2	122,5	3760	14,1	119	33,9	291,4	351,8	30,6	0,82
h2	117,1	3814	14,0	121	33,6	289,9	344,9	29,6	0,79
i2	118,1	3774	14,0	113	33,5	290,8	346,9	30,6	0,82
k2	122,4	3769	13,2	117	33,3	289,8	348,7	32,9	0,88
a3	112,8	3733	11,8	118	34,5	292,3	349,2	27,7	0,74
b3	119,3	3784	12,4	115	33,9	291,9	348,8	32,5	0,87
c3	121,6	3777	12,5	118	33,4	289,8	350,2	30,6	0,82
d3	118,5	3762	12,6	121	34,0	293,2	351,1	30,9	0,83
e3	120,6	3762	12,0	118	33,5	290,9	349,9	32,4	0,87
f3	122,3	3782	13,5	118	34,9	292,6	350,9	33,2	0,89
g3	119,7	3759	13,4	120	34,7	292,8	350,7	31,7	0,85
h3	116,7	3801	14,0	119	33,8	290,9	346,1	29,4	0,79
i3	117,7	3760	13,7	117	33,9	290,9	346,6	31,6	0,85
k3	118,0	3791	12,1	119	33,6	291,3	347,1	32,5	0,87

Messung A555 - 1. Meßreihe mit Prüfreifen A10

Anmerkungen:

- X1/X2: Längskraft der Zweipunktmessung in N
Z1/Z2: Vertikalkraft (Radlast) der Zweipunktmessung in N
Tu: Temperatur der Umgebungsluft in Grad C
Hv: vordere Höhe (Abstand zwischen Anhängerrahmen und Fahrbahnoberfläche) in mm
Hh: mittlere hintere Höhe in mm
R25: Rollwiderstand in N, auf 25 °C korrigiert
Cr25: Rollwiderstandsbeiwert in % (Rollwiderstand/Nennradlast)

A555/A10-2	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
Messung	N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
a1	127,6	3754	14,5	132,0	25,2	288,3	351,2	30,4	0,81
b1	132,6	3808	15,0	134,0	24,7	288,9	352,8	31,9	0,86
c1	135,1	3794	16,6	136,0	24,0	287,8	351,3	33,5	0,90
d1	133,5	3801	15,0	132,0	23,3	288,8	352,1	33,3	0,89
e1	134,1	3807	15,0	134,0	24,1	288,3	351,5	34,1	0,91
f1	134,4	3785	14,9	133,0	25,2	288,3	351,9	35,1	0,94
g1	134,3	3799	15,2	134,0	24,5	288,3	352,1	33,8	0,91
h1	129,4	3813	16,0	136,0	24,7	286,1	348,2	29,6	0,79
i1	129,6	3775	15,4	131,0	24,4	287,3	350,1	30,7	0,82
k1	131,8	3790	14,7	131,0	24,3	287,3	350,4	32,8	0,88
a2	127,6	3789	14,7	132,0	25,7	288,5	350,9	29,8	0,80
b2	130,5	3807	15,6	131,0	25,1	289,1	352,4	30,0	0,80
c2	134,4	3805	16,8	133,0	26,0	287,5	351,4	32,4	0,87
d2	130,8	3800	14,9	132,0	24,8	289,0	351,7	31,8	0,85
e2	132,1	3797	15,9	131,0	23,9	288,2	350,5	32,4	0,87
f2	131,1	3787	14,4	130,0	25,3	289,4	351,4	34,0	0,91
g2	130,9	3778	15,5	131,0	25,7	288,5	350,9	32,7	0,88
h2	124,7	3810	14,2	134,0	25,7	288,2	348,7	28,9	0,77
i2	127,4	3790	14,8	130,0	26,1	288,2	349,3	31,0	0,83
k2	128,8	3792	14,0	131,0	25,8	287,9	349,4	32,7	0,88
a3	124,8	3786	14,2	130,0	26,3	290,1	351,1	29,3	0,79
b3	128,3	3810	15,6	131,0	26,0	289,6	351,6	29,4	0,79
c3	132,2	3800	15,6	131,0	25,9	287,8	352,4	30,7	0,82
d3	128,0	3798	13,4	129,0	24,8	289,6	351,9	31,0	0,83
e3	129,3	3798	13,8	131,0	26,3	288,8	351,2	32,3	0,87
f3	128,7	3772	14,2	129,0	26,8	288,7	351,7	31,6	0,85
g3	129,8	3778	14,1	131,0	26,6	288,5	350,9	33,3	0,89
h3	125,7	3806	14,5	133,0	27,3	287,0	347,8	29,8	0,80
i3	126,1	3778	14,9	128,0	27,0	288,0	349,6	29,7	0,79
k3	126,4	3801	13,5	128,0	26,8	288,6	349,4	31,5	0,85

Messung A555 - 2. Meßreihe mit Prüfreifen A10

A555/A11-1	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
Messung	N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
a1	135,0	3766	14	132	28,1	288,2	351,5	38,3	1,03
b1	143,3	3810	14,7	136	27,9	288,7	353,1	43,5	1,17
c1	147,3	3807	15,1	131	29,3	286,2	352,3	46,0	1,23
d1	143,6	3803	14,6	133	28,9	288,0	352,0	45,0	1,21
e1	141,7	3798	13,8	132	29,2	288,8	351,5	45,6	1,22
f1	141,0	3777	14,6	131	29,3	290,1	350,4	47,5	1,27
g1	143,7	3786	16,3	131	29,5	289,6	351,2	46,9	1,26
h1	140,2	3815	16,1	133	29,0	286,1	348,5	41,2	1,10
i1	140,2	3775	15,7	130	28,8	287,4	350,3	42,4	1,14
k1	142,0	3788	14,4	130	29,2	287,8	350,3	45,8	1,23
a2	134,5	3762	14,5	129	29,6	287,5	349,4	39,5	1,06
b2	141,4	3810	14,6	131	28,8	289,6	351,9	44,2	1,19
c2	145,4	3794	14,5	131	28,8	287,1	351,7	46,6	1,25
d2	142,7	3796	14,8	134	29,6	287,8	352,0	44,2	1,18
e2	142,2	3796	14,7	131	29,7	288,6	351,9	44,8	1,20
f2	142,2	3779	15,7	130	30,2	288,7	353,1	43,3	1,16
g2	141,6	3780	15,4	133	30,3	289,7	351,7	45,7	1,23
h2	137,1	3809	15,2	130	29,9	286,7	347,5	41,2	1,11
i2	137,1	3776	15,8	131	30,2	288,5	349,0	42,2	1,13
k2	137,2	3792	14,4	132	30,5	288,8	349,1	43,6	1,17
a3	130,5	3763	13,8	129	30,4	288,3	349,0	37,6	1,01
b3	139,0	3806	13,7	131	29,9	289,2	352,0	42,7	1,14
c3	143,1	3793	14,5	130	30,3	287,3	352,4	44,2	1,19
d3	139,6	3786	14,3	131	30,7	288,8	352,0	43,3	1,16
e3	140,2	3798	14,4	131	30,1	289,0	351,7	43,7	1,17
f3	139,3	3779	14,8	134	31,8	289,0	352,9	42,4	1,14
g3	140,6	3784	16	133	31,4	290,0	353,0	43,2	1,16
h3	134,4	3802	15,2	130	30,2	285,0	333,0	53,3	1,43
i3	135,6	3773	14,3	126	30,2	288,4	349,2	42,0	1,12
k3	137,4	3787	14,2	127	30,5	288,6	349,3	43,7	1,17

Messung A555 - 1. Meßreihe mit Prüfreifen A11

A555/A11-2	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
Messung	N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
a1	131,6	3736	12,8	121	29,6	288,2	348,2	41,2	1,10
b1	137,2	3776	14,5	120	30,0	290,1	351,3	42,7	1,15
c1	140,3	3766	14,6	121	29,3	291,2	350,8	47,8	1,28
d1	137,6	3778	12,8	123	29,7	289,5	351,3	44,1	1,18
e1	137,4	3772	12,3	119	30,3	289,7	350,7	45,8	1,23
f1	136,8	3747	12,3	119	30,5	290,8	350,3	47,9	1,28
g1	136,3	3759	13,3	120	31,0	290,8	352,4	43,6	1,17
h1	131,9	3782	11,9	120	31,1	287,9	346,8	42,7	1,14
i1	134,7	3757	13,2	120	30,6	288,6	349,0	43,3	1,16
k1	134,1	3754	12,1	118	30,5	288,8	348,6	44,6	1,19
a2	128,2	3744	11,4	118	30,6	290,0	349,1	40,1	1,08
b2	134,5	3779	13,5	120	31,1	290,7	350,9	42,4	1,14
c2	137,2	3771	13,9	117	30,8	289,4	349,7	44,9	1,20
d2	135,3	3772	12,8	119	30,5	289,2	351,6	41,5	1,11
e2	137,2	3774	13,4	119	30,8	289,8	349,8	45,7	1,22
f2	135,2	3753	12,3	118	34,3	290,1	351,6	45,2	1,21
g2	134,4	3762	13,0	118	34,0	290,2	350,6	44,4	1,19
h2	131,2	3775	13,0	121	33,8	287,9	346,2	42,7	1,15
i2	130,0	3740	13,6	119	33,5	289,8	348,5	41,4	1,11
k2	134,6	3761	11,9	118	33,5	289,6	349,0	46,8	1,26
a3	127,5	3749	12,4	119	31,9	290,1	348,6	39,3	1,05
b3	133,3	3771	14,3	116	31,4	291,0	350,2	41,7	1,12
c3	136,7	3769	13,6	117	30,3	289,9	350,4	44,3	1,19
d3	133,9	3770	12,6	117	31,6	291,2	350,8	43,9	1,18
e3	133,4	3769	13,0	118	31,2	291,0	350,0	43,5	1,17
f3	133,9	3768	12,7	119	34,6	290,4	351,7	43,1	1,16
g3	93,9	2528	12,7	115	34,9	288,1	340,7	56,4	1,51
h3	128,3	3753	13,1	118	34,6	288,9	345,5	42,5	1,14
i3	130,0	3740	13,6	119	33,5	289,8	348,5	41,4	1,11
k3	134,6	3761	11,9	118	33,5	289,6	349,0	46,8	1,26

Messung A555 - 2. Meßreihe mit Prüfreifen A11

A555/A12-1	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
Messung	N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
a1	188,1	4824	21,4	198	28,0	292,4	358,2	48,0	1,01
b1	193,3	4844	23,7	205	28,2	291,9	358,9	48,6	1,03
c1	199,1	4850	22,8	205	28,0	291,1	358,4	54,8	1,16
d1	195,0	4830	21,8	202	28,5	291,3	357,7	54,0	1,14
e1	192,2	4830	21,3	198	28,1	291,6	357,2	52,5	1,11
f1	193,4	4830	22,1	207	28,2	291,8	358,4	51,6	1,09
g1	194,1	4830	22,9	215	29,1	292,1	358,9	51,7	1,09
h1	188,3	4865	23,2	220	28,8	290,0	354,6	47,1	1,00
i1	189,2	4844	23,3	213	27,9	291,0	356,7	46,6	0,99
k1	190,7	4833	22,3	208	28,2	291,2	357,0	49,6	1,05
a2	181,7	4818	22,7	198	28,7	293,5	358,1	42,2	0,89
b2	189,1	4850	23,0	205	28,3	292,7	358,0	47,3	1,00
c2	193,7	4829	23,7	206	28,6	291,5	357,1	52,0	1,10
d2	195,8	4825	22,0	204	28,3	291,6	358,1	54,6	1,15
e2	190,7	4834	22,6	198	27,8	292,1	357,0	50,4	1,06
f2	189,0	4816	20,3	199	29,9	292,6	357,9	52,1	1,10
g2	185,8	4823	23,8	210	29,3	293,8	357,4	47,2	1,00
h2	181,1	4835	23,0	211	29,3	291,4	353,1	45,5	0,96
i2	185,1	4829	22,6	210	28,7	291,6	355,5	46,7	0,99
k2	187,2	4828	20,8	203	28,8	291,8	356,3	49,9	1,06
a3	181,0	4819	21,4	192	29,2	292,9	357,1	43,6	0,92
b3	182,5	4827	20,7	196	28,7	294,3	357,3	47,3	1,00
c3	189,7	4818	22,7	201	28,8	292,0	356,7	50,6	1,07
d3	186,3	4816	22,2	199	28,5	293,2	357,1	48,7	1,03
e3	187,7	4818	22,5	197	28,6	292,6	356,3	50,1	1,06
f3	187,3	4837	21,8	204	30,5	293,6	356,9	51,3	1,09
g3	185,4	4820	23,3	213	29,0	293,9	356,6	48,7	1,03
h3	181,1	4832	21,6	222	28,9	291,9	354,4	45,8	0,97
i3	184,2	4825	23,9	212	29,4	292,1	355,9	45,0	0,95
k3	185,0	4829	21,6	204	29,6	293,0	356,2	49,1	1,04

Messung A555 - 1. Meßreihe mit Prüfreifen A12

A555/A12-2	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
Messung	N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
a1	184,3	4905	19,6	201	29,0	292,1	356,3	45,7	0,97
b1	188,1	4933	19,3	207	29,1	293,4	359,1	46,7	0,99
c1	190,7	4909	19,6	210	29,0	290,9	358,8	46,6	0,99
d1	187,5	4916	18,5	204	28,8	294,0	359,4	47,9	1,01
e1	186,1	4907	18,1	205	29,9	293,4	357,0	50,5	1,07
f1	187,6	4931	18,9	208	30,4	294,1	358,3	49,6	1,05
g1	186,8	4928	20,7	214	30,4	294,4	358,0	48,0	1,01
h1	180,3	4939	18,2	224	29,7	292,1	354,5	45,0	0,95
i1	179,7	4920	19,8	218	30,4	294,0	355,7	44,8	0,95
k1	184,3	4914	18,6	209	29,3	292,8	356,6	47,3	1,00
a2	180,1	4917	19,0	203	30,2	292,4	355,4	43,9	0,93
b2	183,2	4928	19,1	207	29,1	294,1	358,2	44,5	0,94
c2	187,4	4923	19,3	207	30,3	292,9	358,4	47,2	1,00
d2	184,6	4916	17,5	207	30,5	293,4	358,6	47,0	0,99
e2	184,1	4918	17,3	197	29,6	293,4	357,6	47,7	1,01
f2	186,3	4923	18,3	204	30,9	294,3	358,6	49,2	1,04
g2	185,3	4910	20,3	215	30,9	294,3	357,8	47,9	1,01
h2	182,1	4921	19,7	225	30,0	291,7	354,1	46,2	0,98
i2	183,7	4921	22,3	221	30,0	292,6	356,0	43,5	0,92
k2	182,6	4916	18,5	206	30,6	293,8	356,8	47,3	1,00
a3	181,6	4928	16,9	196	30,9	292,3	355,0	48,0	1,01
b3	177,8	4945	16,9	212	30,0	294,4	357,4	42,6	0,90
c3	185,2	4928	19,2	208	30,6	293,1	357,9	46,0	0,97
d3	182,9	4923	17,9	206	31,0	294,8	359,2	46,0	0,97
e3	182,9	4916	18,1	203	31,1	293,9	357,1	47,9	1,01
f3	180,9	4916	18,6	205	31,7	294,3	358,6	43,8	0,93
g3	182,5	4913	19,3	212	32,1	295,2	359,0	45,9	0,97
h3	176,0	4932	19,8	220	32,1	293,4	354,0	42,8	0,91
i3	177,9	4914	19,2	214	31,5	293,6	355,0	44,6	0,94
k3	179,9	4914	18,4	207	31,2	293,8	355,3	47,2	1,00

Messung A555 - 2. Meßreihe mit Prüfreifen A12

A555/A13-1	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
Messung	N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
a1	212,9	4835	23,9	185	25,6	287,8	355,9	63,2	1,34
b1	216,6	4814	25,0	190	25,1	290,5	359,5	65,1	1,38
c1	222,6	4835	26,1	200	25,0	289,2	358,9	68,2	1,44
d1	219,4	4832	24,5	194	24,9	289,4	358,5	67,5	1,43
e1	218,3	4824	23,5	183	25,1	289,8	358,4	68,5	1,45
f1	217,2	4834	24,8	193	25,6	290,6	359,1	66,2	1,40
g1	218,4	4823	25,7	202	25,2	291,1	359,6	66,9	1,41
h1	209,3	4840	23,7	205	24,8	287,6	354,9	60,5	1,28
i1	210,6	4829	25,1	200	24,9	289,5	357,2	60,2	1,27
k1	215,5	4844	24,7	201	25,6	289,9	357,9	65,0	1,37
a2	204,5	4838	24,0	193	25,4	291,4	359,5	54,3	1,15
b2	211,3	4861	25,9	197	25,1	291,8	359,6	58,7	1,24
c2	218,9	4849	25,7	195	25,1	289,9	358,2	66,4	1,40
d2	214,0	4838	23,3	196	25,1	290,1	358,0	64,9	1,37
e2	213,8	4830	24,0	186	26,0	290,7	359,1	64,0	1,35
f2	216,0	4829	22,9	192	26,1	290,7	358,1	69,1	1,46
g2	214,2	4825	26,1	206	26,7	290,9	359,2	63,3	1,34
h2	205,1	4847	23,4	208	26,4	289,5	355,4	59,3	1,25
i2	209,2	4838	24,2	200	25,7	289,7	356,8	60,7	1,28
k2	211,2	4828	24,0	200	25,3	290,2	357,3	63,1	1,33
a3	200,4	4806	22,6	190	25,7	293,0	360,1	54,5	1,15
b3	209,1	4841	24,7	199	26,1	292,1	359,3	60,0	1,27
c3	217,9	4839	26,5	195	25,5	289,7	358,0	65,2	1,38
d3	210,6	4823	23,1	194	26,6	290,8	358,0	64,3	1,36
e3	211,4	4822	23,1	193	26,1	290,8	357,4	65,7	1,39
f3	211,9	4823	23,9	195	27,0	291,0	358,9	64,0	1,35
g3	212,8	4823	24,6	194	26,8	291,2	359,2	63,9	1,35
h3	205,9	4864	24,5	208	26,5	289,0	355,2	57,9	1,22
i3	208,6	4828	23,9	204	26,1	290,0	356,8	61,6	1,30
k3	208,3	4828	22,3	194	26,4	290,8	357,5	63,1	1,33

Messung A555 - 1. Meßreihe mit Prüfreifen A13

A555/A13-2	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
Messung	N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
a1	162,5	4896	-2,6	199	33,7	294,8	356,4	50,1	1,06
b1	171,4	4926	-1,4	208	33,6	295,3	358,2	55,2	1,17
c1	173,4	4909	-1,9	212	33,4	293,0	358,9	53,7	1,14
d1	172,1	4915	-3,0	205	34,2	294,8	359,9	54,9	1,16
e1	172,1	4897	-3,6	204	33,7	295,2	358,8	58,5	1,24
f1	211,6	4897	19,2	197	34,7	290,9	360,7	67,2	1,42
g1	210,1	4881	21,2	194	34,8	291,4	363,2	60,7	1,28
h1	205,3	4919	18,4	205	34,1	288,6	357,3	61,7	1,30
i1	206,1	4902	20,7	202	34,3	289,5	357,3	62,3	1,32
k1	208,6	4907	19,0	199	33,9	289,7	359,8	62,7	1,33
a2	199,4	4884	18,2	190	34,6	290,1	359,5	55,9	1,18
b2	204,4	4925	17,7	195	35,0	291,6	362,0	58,8	1,24
c2	212,2	4928	18,7	198	35,1	290,4	360,4	66,9	1,41
d2	206,7	4912	18,9	198	35,5	290,9	363,9	56,6	1,20
e2	208,5	4908	18,2	196	35,0	290,2	361,6	61,9	1,31
f2	209,1	4921	18,9	193	36,2	291,5	363,0	61,6	1,30
g2	210,0	4902	19,5	205	35,8	290,9	361,2	64,8	1,37
h2	203,5	4924	18,6	209	35,4	288,9	356,9	61,2	1,29
i2	205,1	4907	20,2	212	35,0	289,9	359,2	59,6	1,26
k2	205,8	4896	17,3	195	35,8	290,4	359,7	64,3	1,36
a3	195,9	4874	17,9	192	36,4	291,4	361,0	53,3	1,13
b3	206,7	4896	23,7	188	35,5	291,6	361,4	57,1	1,21
c3	209,2	4893	18,2	197	34,2	290,6	360,9	64,7	1,37
d3	205,6	4913	16,8	194	36,2	290,9	362,1	60,9	1,29
e3	207,2	4907	17,4	190	34,8	290,8	360,1	64,6	1,37
f3	206,2	4916	16,7	189	37,0	291,6	363,1	61,5	1,30
g3	207,1	4911	19,0	194	36,3	292,1	360,8	64,5	1,36
h3	201,2	4931	19,5	205	35,7	289,4	356,6	58,8	1,24
i3	202,6	4901	20,0	215	35,2	290,4	358,6	59,3	1,25
k3	203,3	4924	18,9	194	35,1	290,9	358,5	60,9	1,29

Messung A555 - 2. Meßreihe mit Prüfreifen A13

	v	i	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
	km/h		N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
	50	1	95,0	3623	7,9	115	35,2	296,5	345,2	25,7	0,69
	50	2	98,8	3652	7,5	117	34,9	293,9	343,8	28,2	0,76
	50	3	96,0	3647	8,7	117	34,6	296,4	345,7	24,4	0,65
	90	1	104,0	3641	13,8	121	35,2	296,5	345,4	28,6	0,77
A10	90	2	106,3	3682	13,6	114	35,9	296,8	346,6	29,2	0,78
	90	3	103,9	3657	13,2	113	35,8	296,6	346,6	27,4	0,73
	120	1	108,2	3689	18,5	130	37,2	295,4	342,2	29,8	0,80
	120	2	104,5	3661	14,5	128	37,8	297,5	342,0	34,2	0,92
	120	3	103,7	3650	16,0	127	37,6	297,9	343,9	29,8	0,80

	v	i	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
	km/h		N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
	50	1	107,5	3655	6,4	121	35,4	297,3	345,3	40,3	1,08
	50	2	108,1	3657	6,4	128	35,8	296,0	344,1	41,1	1,10
	50	3	107,3	3652	5,8	127	36,0	297,1	345,7	40,5	1,08
	90	1	113,4	3635	4,2	132	35,6	297,5	346,0	38,4	1,03
A11	90	2	111,2	3647	4,0	125	35,8	297,9	344,7	37,7	1,01
	90	3	115,6	3648	4,7	133	36,8	296,5	345,3	40,0	1,07
	120	1	111,0	3678	5,6	138	37,2	297,2	341,0	38,8	1,04
	120	2	128,6	3686	7,4	140	38,2	295,1	345,2	49,9	1,34
	120	3	111,8	3718	5,0	147	37,9	298,7	343,1	38,7	1,04

	v	i	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
	km/h		N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
	50	1	160,3	4675	8,6	179	36,3	294,7	353,7	52,8	1,09
	50	2	155,4	4652	7,4	175	35,9	296,6	354,8	50,5	1,05
	50	3	154,5	4649	5,8	172	35,7	296,9	354,4	52,5	1,09
	90	1	167,6	4695	5,9	204	36,2	295,3	352,0	56,1	1,16
A12	90	2	165,8	4665	7,3	215	36,3	296,8	354,9	51,4	1,06
	90	3	162,3	4663	5,0	202	35,7	297,2	355,0	50,1	1,04
	120	1	159,4	4703	1,9	241	37,7	299,2	353,0	44,7	0,93
	120	2	167,8	4709	4,1	233	38,7	297,2	353,6	47,9	0,99
	120	3	181,8	4676	1,3	233	39,2	296,2	356,0	52,0	1,08

	v	i	X1	Z1	X2	Z2	Tu	Hv	Hh	R25	Cr25
	km/h		N	N	N	N	Grad C	mm	mm	N	%
	50	1	158,8	4633	2,9	176	34,3	298,5	353,9	61,9	1,28
	50	2	159,3	4654	1,6	178	34,5	298,3	353,8	63,1	1,31
	50	3	159,0	4646	2,5	175	34,0	298,1	353,0	62,7	1,30
	90	1	167,3	4650	3,6	196	35,8	299,0	353,6	61,0	1,26
A13	90	2	168,4	4676	2,2	190	36,5	296,7	350,4	64,8	1,34
	90	3	170,0	4712	3,0	200	36,4	297,0	351,3	63,2	1,31
	120	1	165,1	4677	7,8	216	38,8	299,9	352,6	57,2	1,18
	120	2	160,4	4704	6,3	229	38,7	299,7	350,1	56,3	1,17
	120	3	161,6	4692	8,0	245	38,1	299,9	351,4	54,2	1,12

Schriftenreihe

**Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen**

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

- F 1: Einfluß der Korrosion auf die passive Sicherheit von Pkw**
von E. Faerber und G.-D. Wobben
88 Seiten, 1993 DM 23,50
- F 2: Kriterien für die Prüfung von Motorradhelmen**
von W. König, H. Werner, E. Schuller, G. Beier und W. Spann
80 Seiten, 1993 DM 25,50
- F 3: Sicherheit von Motorradhelmen**
von H. Zellmer
52 Seiten, 1993 DM 21,00
- F 4: Weiterentwicklung der Abgassonderuntersuchung**
Teil 1: Vergleich der Ergebnisse aus Abgasuntersuchung und Typprüfverfahren
von A. Richter und G. Michelmann
Teil 2: Praxiserprobung des vorgesehenen Prüfverfahrens für Fahrzeuge mit Katalysator
von Chr. Albus
80 Seiten, 1993 DM 26,00
- F 5: Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz**
von R. Bamberg und H. Zellmer
56 Seiten, 1994 DM 21,00
- F 6: Sicherheit von Fahrradanhängern zum Personentransport**
von D. Wobben und H. Zahn
64 Seiten, 1994 DM 24,00
- F 7: Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlicher Lichttransmission von Pkw-Scheiben**
Teil 1: Kontrastwahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe
von P. Junge
Teil 2: Kontrastwahrnehmung in der Dämmerung bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe
von M. Chmielarz und B. Siegl
Teil 3: Wirkung abgedunkelter Heckscheiben – Vergleichsstudie –
von H. Derkum
88 Seiten, 1994 DM 27,00
- F 8: Anforderungen an den Kinnschutz von Integralhelmen**
von D. Otte, G. Schroeder, J. Eidam und B. Kraemer
32 Seiten, 1994 DM 20,00
- F 9: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen unter Straßenbedingungen**
von M. Schmieder, D. Bley, M. Spickermann und V. von Zettelmann
40 Seiten, 1994 DM 21,00
- F 10: Einsatz der Gasentladungslampe in Kfz-Scheinwerfern**
von J. Damasky
52 Seiten, 1995 DM 24,00
- F 11: Informationsdarstellung im Fahrzeug mit Hilfe eines Head-Up-Displays**
von H. Mutschler
124 Seiten, 1995 DM 32,00
- F 12: Gefährdung durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen**
Teil 1: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern
von H. Zellmer und M. Schmid
Teil 2: Quantifizierung der Gefährdung von Fußgängern
von H. Zellmer
44 Seiten, 1995 DM 23,00
- F 13: Untersuchung rollwiderstandsarmer Pkw-Reifen**
von K. Sander
40 Seiten, 1995 DM 22,50
- F 14: Der Aufprall des Kopfes auf die Fronthau-
be von Pkw beim Fußgängerunfall**
Entwicklung eines Prüfverfahrens
von K.-P. Glaeser
100 Seiten, 1996 DM 30,00
- F 15: Verkehrssicherheit von Fahrrädern**
Teil 1: Möglichkeiten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit von Fahrrädern
von C. Heinrich und E. von der Osten-Sacken
Teil 2: Ergebnisse aus einem Expertengespräch
„Verkehrssicherheit von Fahrrädern“
von F. Nicklisch
220 Seiten, 1996 DM 43,50
- F 16: Messung der tatsächlichen Achslasten von Nutzfahrzeugen**
von R. Sagerer, K. Wartenberg und D. Schmidt
52 Seiten, 1996 DM 24,00