

Die Radlast wurde im Unterschied zu früheren Untersuchungen auf einen Wert von 2500 N reduziert, um zum einen auf LINUS hohe Reibwertausnutzungen trotz der Begrenzung der Meßplattform auf Längs- und Querkräfte von 2500 N zu erreichen. Zum anderen konnte dadurch die Belastung des Reifens und damit der Verschleiß unter den harten Bedingungen der Versuche im Innentrommelprüfstand auf ein vertretbares Maß reduziert werden. Aus dem gleichen Grund wurden die Versuche unter Kraftschlußbeanspruchung im IPS mit wenigen Ausnahmen auf nasser Fahrbahn durchgeführt. Im trockenen Fahrbahnzustand ist die für die Auswertung der Fahrbahnsensorsignale erforderliche Anzahl von Überrollungen mit einer zu hohen Beanspruchung des Versuchsreifens verbunden.



**Bild 29:** Versuchsreifen Pirelli P700 Z mit eingezeichnete Aufstandsfläche bei einer Radlast von 2500 N

**Bild 29** zeigt das Profilbild des Versuchsreifens durch die Fahrbahn des Prüfstands LINUS hindurch fotografiert. Zur Verdeutlichung ist die Zone des Fahrbahnkontaktes, der Reifenlatsch, in seiner Form unter den Standardbedingungen mit einer gestrichelten Linie umrandet.

Die Position des Reifensensors ist standardmäßig in der Mitte des Laufstreifens, in der geschlossenen Mittelrippe des Reifens angeordnet.

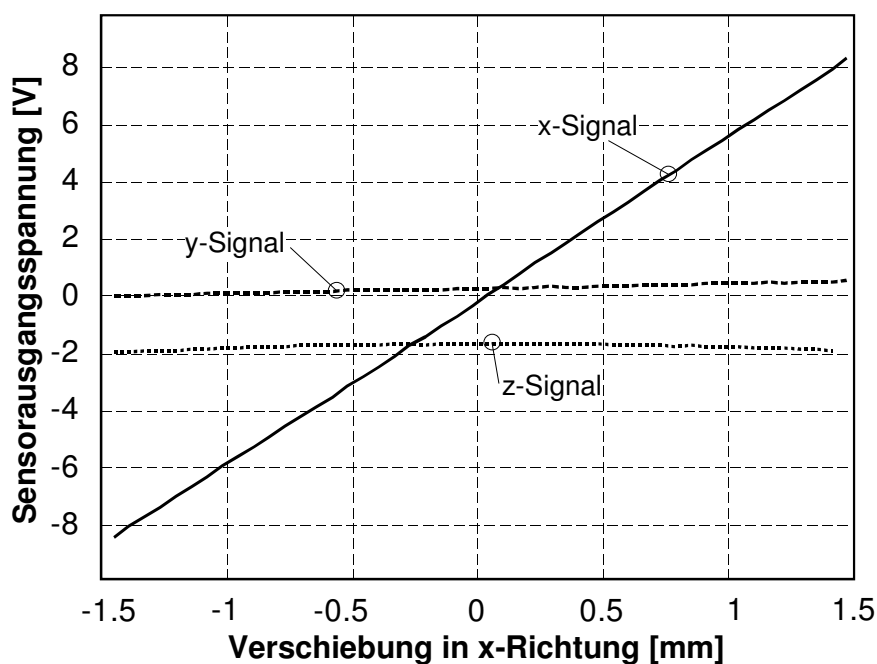
Man erkennt in der Darstellung einen Profilstollen links der Mittelrippe, der nachträglich mit einem Magneten ausgestattet wurde, um auch an dieser Stelle Messungen vornehmen zu können.

## 2.5 Kalibrierung

Eine Auswertung und Interpretation der Sensorsignale in den verschiedenen Anordnungen kann nur nach einer geeigneten Kalibrierung der Sensoren und ihres Zusammenwirkens bei der Berechnung der lokalen Gleitvorgänge erfolgen. Die Kalibrierung der Sensoren, d.h. die Zuordnung von Sensorsignalspannungen zu Verschiebungen des Magneten, wurde von Supke entwickelt. Das Verfahren ist zusammen mit einer ausführlichen Beschreibung der elektrischen Eigenschaften der Sensoren in seiner Dissertation ausführlich dokumentiert [115]. In diesen Ausführungen ist auch eine Berech-

nung der Magentfeldstärkenverteilung des Magneten enthalten und eine genaue Berechnung der daraus resultierenden Hallgeneratorspannungen an den Sensoren.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Kalibrierung zweckmäßigerweise an einem speziell dafür angefertigten Prüfstand erfolgt, der mit einem in drei Achsen verfahrbaren Positionsantrieb den Magneten relativ zur Sensorplatte verschiebt, während die dabei auftretenden Sensorspannungen aufgezeichnet werden. Das Ergebnis einer solchen Kalibrierung ist in **Bild 30** dargestellt. Aufgetragen sind die Signale des Reifensensors in allen drei Koordinatenrichtungen, während der Mag-



**Bild 30:** Sensorsignale bei einer Kalibrierung in x-Richtung mit Übersprechen in y- und z-Richtung

net in x-Richtung verfahren wird. Man erkennt die Abhängigkeit zwischen Sensor x-Signal und Verschiebung, die einen nahezu linearen Zusammenhang zeigt. Daneben ist auch das Übersprechen in die beiden anderen Koordinatenrichtungen erkennbar. In der hier erkennbaren Größenordnung muß dieses nur beim z-Signal wegen dessen sehr niedrigem Nutzsinalhub

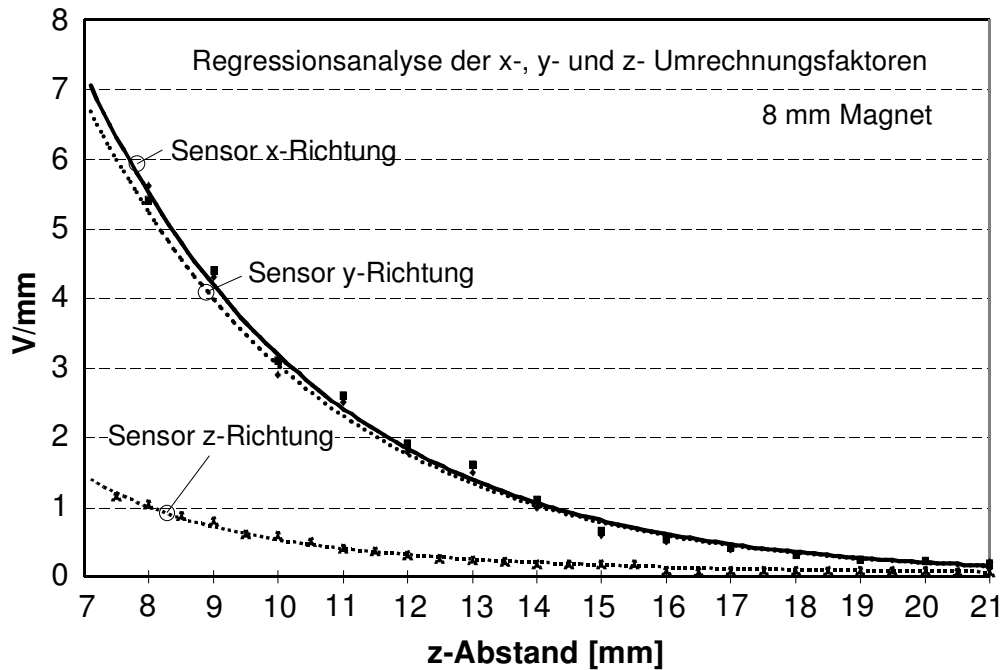
berücksichtigt werden. Aus der Zuordnung der Sensorsignale zu den Verschiebungen wird der Kalibrierfaktor ermittelt.

Der Abstand des Magneten von der Platine in z-Richtung, der sog. Grundabstand der Sensoranordnung, war während der obigen Kalibrierung konstant (2V Offsetspannung nur zur besseren Darstellung gewählt). Er hat auf die Empfindlichkeit des Sensors, also auf das Verhältnis von Signalspannung zu Verschiebung, einen großen Einfluß. Deshalb muß er für jede Sensoranordnung möglichst genau bestimmt werden. Dies geschieht, indem der Sensor in den Reifen eingebaut und die Signale auf den im Reifen befindlichen Magneten abgeglichen werden. Danach wird der Sensor wieder entnommen und auf dem Kalibriertisch montiert. Der Abstand in z-Richtung kann dann durch Verschieben eines identischen Magneten auf dem Kalibriertisch, bis die abgeglichenen Signalhöhen erreicht sind, bestimmt werden. Im Idealfall erfolgt direkt im Anschluß mit dem gefun-

denen Grundabstand die Kalibrierung der übrigen Koordinatenrichtungen. Für den Fahrbahnsensor gestaltet sich die Kalibrierung identisch.

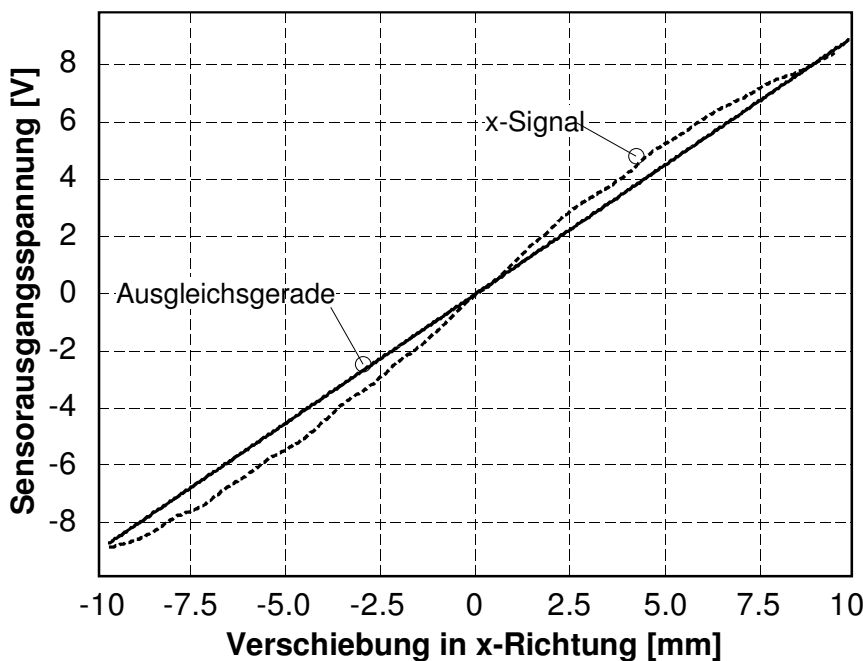
Die Abhängigkeit der Kalibrierfaktoren vom Grundabstand Sensor - Platine ist in **Bild 31** dargestellt. Die Kalibrierfaktoren in den Koordinatenrichtungen zeigen einen mit zunehmenden z-

Abstand degressiven Abfall, der die Schwächung des Magnetfeldes in Abhängigkeit von der Entfernung widerspiegelt. Dies entspricht den von Supke [115] angestellten theoretischen Berechnungen.



**Bild 31:** Abhängigkeit der Kalibrierfaktoren von dem Grundabstand zum Sensor  $z_0$

Für den Fahrbahnsensor bedeutet



**Bild 32:** Kalibrierung des Fahrbahnsensors mit einem Grundabstand von  $z_0 = 37.8$  mm

dieser Zusammenhang, daß vor allem bei der im Prüfstand IPS vorgesehenen Anordnung mit einem sehr großen Abstand in z-Richtung die Empfindlichkeit des Sensors bei Verwendung des normalen  $\varnothing 8$  mm Magneten nicht ausreicht. Daher wurden auf der Innenseite  $\varnothing 10$  mm Magneten mit einer Dicke von 6 mm verwendet, die eine viermal so hohe Ener-

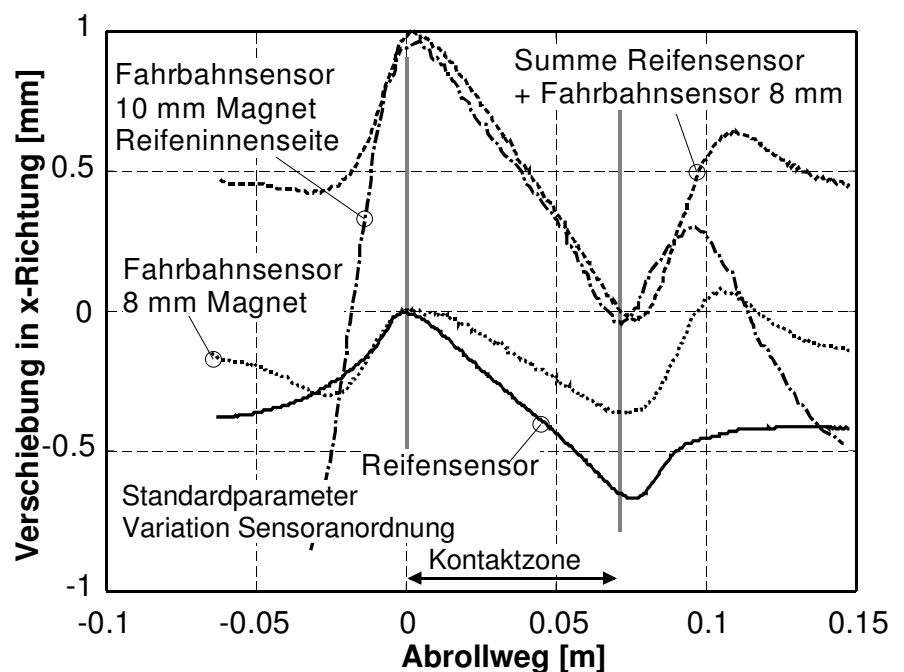
giedichte aufweisen. Die Kalibrierung des Fahrbahnsensors mit einem solchen Magneten für den

Abstand, der im IPS vorgelegen hat, ist in **Bild 32** aufgetragen. Der Meßbereich, innerhalb dessen der Sensor akzeptabel linear arbeitet ist mit  $\pm 10$  mm definiert.

Verschiebungen in dieser Größenordnung, die bei hohen Schlupfwerten erreicht werden können, sind gerade noch meßbar, setzen aber ein genaues Treffen des Fahrbahnsensors voraus.

Zur Berechnung der lokalen Gleitvorgänge und Bestimmung der Deformationsanteile aus den Signalen von Reifen- und Fahrbahnsensorik sind noch weitergehende Versuche notwendig. Zunächst erfolgt die Bestimmung der elastischen Deformation des Laufstreifens aus den Signalen der verschiedenen Sensoren. **Bild 33** stellt die Signale der verschiedenen Sensoranordnungen beim Überrollen auf dem Prüfstand LINUS unter Standardbedingungen in x-Richtung dar. Das Reifensensor-

signal zeigt die dem Bors-tenmodell des Reifens entsprechenden Verformungen in treibender und bremsender Richtung (vgl. Kapitel. 1.2.2). Das Signal „Fahrbahnsensor 8mm“ entspricht der Verschiebung des gleichen Magneten im Profilelement relativ zur Fahrbahn. Es enthält bei Standardbedin-



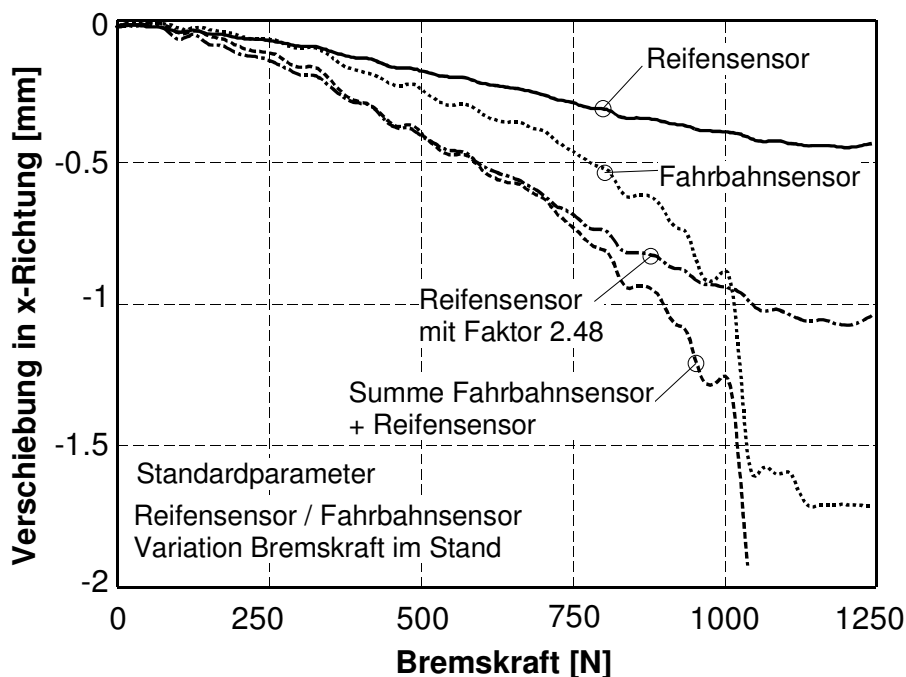
**Bild 33:** Signale der verschiedenen Sensoranordnungen zur Erfassung lokaler Gleitbewegungen, freies Rollen auf LINUS

was u. a. optisch kontrol-

liert werden kann, nur die Deformationsanteile des Reifengummis zwischen dem Magnet im Profilelement und der Fahrbahnoberfläche. Im oberen Teil des Bildes, zur besseren Darstellung um den Ordinatenwert 1 mm versetzt, ist der Verlauf der Summe der beiden Signale aus Fahrbahnsensor und Reifensensor dargestellt. Dies entspricht der elastischen Gesamtverformung des Laufstreifens vom Gürtel bis zur Fahrbahnoberfläche. Daneben ist das Signal des Fahrbahnsensors aufgetragen, der die Bewegungen eines  $\varnothing 10$  mm Magneten erfasst, der auf der Reifeninnenseite befestigt ist. Dies entspricht dem Sensoraufbau im Prüfstand IPS und muß definitionsgemäß der Gesamtdeformation des Gummis zwischen Reifengürtel und Fahrbahnoberfläche entsprechen. Wie der Darstellung entnommen werden kann, liefern beide Verfahren der Bestimmung der elastischen Gesamtde-

formation identische Ergebnisse. Damit kann das Verfahren der Extrapolation der Reifensensorsignale auf die Gesamtdeformation des Laufstreifengummis für den freirollenden Zustand als zulässig gelten (siehe unten). Für das Verhältnis von Gesamtdeformation und Reifensensorsignal ergibt sich ein Wert von 1.55. Dieses Verfahren entspricht in seiner Aussage in etwa der von Roth [101] in seiner Arbeit angewendeten Kalibrierung. Er benutzte einen Stiftsensor, den Reifensensor der 1. Generation, und kalibrierte dessen Signale auf die Verschiebungen, die er an der Außenseite des Reifens abgreifen konnte. Die in seiner Arbeit gezeigten Ergebnisse zur Profilelementverformungen beziehen sich daher im Gegensatz zu den späteren Arbeiten von Supke [115], Ludwig [82] und Bachmann [6] auf die Gesamtdeformation des Laufstreifens und nicht auf die Verschiebungen eines Magneten im Reifenprofil, die nur einen Teil davon wiedergeben können.

Die oben gezeigten Zusammenhänge für den freirollenden Reifen müssen noch um Untersuchungen für den gebremsten Reifen ergänzt werden. Um den Deformationsanteil vom Gleitanteil für Mes-



sungen am gebremsten Rad trennen zu können, wurden eine Vielzahl von Grundlagenversuchen, wie die in **Bild 34** dargestellten Messungen, durchgeführt.

Ein stillstehendes Rad, das einen Reifensensor trägt, dessen Magnet exakt zum Fahrbahnsensor ausgerichtet ist, wird mit einem ansteigenden Bremsmoment beauf-

**Bild 34:** Vergleich der verschiedenen Sensoranordnungen bei Aufbringen eines Bremsmomentes im Stillstand

schlagt. Der Reifensensor zeigt analog dazu ansteigende Verformungen in x-Richtung. Dieser Verschiebung entsprechende Verformungen werden auch vom Fahrbahnsensor für das Gummi zwischen Magnet und Fahrbahnoberfläche detektiert. Ab einem bestimmten Wert der Bremskraft, der im gegebenen Fall bei ca. 750 N liegt, zeigt das Fahrbahnsensorsignal stark ansteigende Verschiebungen, die vom Reifensensor nicht registriert werden. Es tritt lokales Gleiten auf. Deutlich wird dies beim Vergleich des Summensignals aus Fahrbahn- und Reifensensor, das der elastischen Gesamtverformung zzgl. lokalem Gleiten entspricht, mit dem Reifensensorsignal, das mit einem ge-

eigneten Umrechnungsfaktor zwar extrapoliert werden kann, aber nur die elastische Verformung wiedergibt. Der Betrag des lokalen Gleitens kann in dieser Darstellung als Differenz zwischen extrapoliertem Reifenensorsignal und Fahrbahnsensorsignal direkt abgelesen werden. Man erkennt auch, daß entsprechend der Theorie der Gummireibung, die in Kapitel 1.2.1 besprochen wurde, trotz des Auftretens von lokalem Gleiten, also dem Überschreiten der Haftreibungsgrenze, noch ein Zuwachs an elastischer Deformation und Bremskraft am Reifen möglich ist. Die Ursache für diesen Effekt wird später an Hand von Messungen im Innentrommelprüfstand IPS und auf LINUS vertieft diskutiert (Kapitel 3.1.4).

Die Extrapolation des Reifensensorsignals auf die Gesamtverformung durch Einführung eines linearen Skalierungsfaktors liefert für diesen Versuch einen Wert von 2.48. Das bedeutet, daß die Verschiebung zwischen der Sensorplatine auf der Innenseite des Reifens und dem Magnet im Laufstreifengummi kleiner ist als die Verschiebung dieses Magneten relativ zur Platine in der Fahrbahn. Das Verhältnis der beiden Werte zueinander verhält sich in etwa wie der geometrische Abstand des Magneten zum jeweiligen Sensor. Da der Magnet im Laufstreifen näher an der Platine auf der Reifeninnenseite liegt, sind auch die dort entstehenden Verformungen kleiner. Zunächst ist diese auf den Deformationsschlupf unter Bremsmoment bezogene Erkenntnis plausibel. Im freirollenden Zustand, vgl. **Bild 33**, zeigt sich jedoch ein anderes Verhalten. Hier sind die Verformungen, die mit dem Reifensensor gemessen werden, deutlich größer als die mit dem Fahrbahnsensor relativ zum gleichen Magneten gemessenen. Dieser Unterschied ergibt sich aus den speziellen Eigenschaften des Sensors der 2. Generation. Wie bereits aus anderen Untersuchungen bekannt ist, erfaßt der Sensor neben den Deformationen, die durch lokale Schubspannungen in der Aufstandsfläche verursacht werden, auch Verformungen, die nur aus der Abplattung des ursprünglich runden Reifenkörpers herrühren. Auch ohne das Auftreten von Schubspannungen in der Fahrbahn würde der Sensor ein Verformungssignal anzeigen, das im wesentlichen aus der inneren Verzwängung des Reifengummis beim Wechsel der Außenkontur resultiert. Daher kann auch keine Kalibrierung des Reifensensorsignals auf die herrschenden lokalen Schubspannungen gelingen. Die aus diesen Spannungen resultierenden Verformungen sind beim Sensor der 2. Generation immer von den rein abplattungsbedingten Verformungen überlagert. Für die Extrapolation der Anteile des Reifensensorsignals, die tatsächlich von den lokalen Schubspannungen z.B. auf Grund eines Bremsmoments verursacht werden, muß ein spezielles Verfahren angewendet werden. Es ist erforderlich, zunächst den Deformationsanteil des Reifensensorsignals zu bestimmen. Dieser Deformationsanteil für die Strecke zwischen der Platine auf der Innenseite des Reifens und Magnet kann dann auf den Deformationsanteil für die Gesamtstrecke vom Gürtel bis zur Profilaußenkontur extrapoliert werden. Dafür er-

gibt sich ein Faktor von 2.48, wie aus **Bild 34** entnommen werden kann. Das bedeutet, daß die Biegelinie eines Profilelements im freirollenden Zustand einen anderen Verlauf hat, als im angetriebenen oder gebremsten Fall.

Für andere als die oben untersuchten Standardbedingungen gelten auch veränderte Abhängigkeiten zwischen Reifensensor- und Fahrbahnsensorsignal. Speziell der Reifeninnendruck hat einen großen Einfluß auf die Eigenschaften des Laufstreifens, so daß für geänderte Betriebsparameter immer eigene Kalibrierversuche erforderlich sind. Zudem sind sensorbedingte Erscheinungen zu berücksichtigen. So führt eine Annäherung des Magneten an die Sensorplatine bei Flächenpressungsänderungen z.B. durch ein Bremsmoment zu einer Veränderung der Sensorkalibrierung. Dieser Effekt ist durch die geringe Verformbarkeit des Reifengummi in z-Richtung jedoch sehr klein und wird bei der Kalibrierung am Prüfstand im Vergleich von Reifensensor- und Fahrbahnsensorsignal mit erfaßt.

Der Vollständigkeit halber sei noch angemerkt, daß neben dem Einbau der Magneten im Laufstreifengummi oder auf der Reifeninnenseite auch der Einbau am Rand des Laufstreifengummi, in direktem Kontakt mit der Fahrbahn möglich ist. Wie bereits oben beschrieben, kann mit dieser Anordnung das lokale Gleiten direkt ohne elastische Deformationsanteile gemessen werden. Die Kalibrierung erfolgt analog zu den übrigen Anordnungen mit dem entsprechenden z-Abstand. Um den Fahrbahnkontakt des Gummi nicht zu beeinflussen, sind bei diesen Messungen möglichst kleine Magneten mit einem Durchmesser von einem oder zwei Millimetern erforderlich. Messungen dieser Art werden in Kapitel 3.1 diskutiert.

## 2.6 Fazit

Die Untersuchung der lokalen Effekte der Reibung im Laufstreifen von Pkw- Reifen erfordert eine Vielzahl von komplexen Sensoren und Prüfständen. Neben den in Darmstadt entwickelten Reifensensoren wurde ein zusätzlicher Sensor in die Fahrbahn integriert, der zusammen mit einer geeigneten Kalibrierung sowohl die elastischen Deformationen am abrollenden Pkw-Reifen als auch die Gleitbewegungen der Profilelemente auf der Straße erfassen kann.

Der Sensor besteht aus einem dem Reifensensor entsprechenden Aufbau unter der Fahrbahnoberfläche. Die Sensorik wurde im Rahmen dieser Arbeit auf einem Flachbahnprüfstand für quasistationäre Untersuchungen bei niedriger Geschwindigkeit auf einer Acrylglasfahrbahn eingesetzt. Die-

ser Prüfstand wurde vor allem für Kalibrierversuche und grundlegende Variationen der wichtigsten Betriebsparameter verwendet.

Darüber hinaus wurde die Sensorik zusammen mit einer berührungslosen Datenübertragung für den Einsatz in der Fahrbahn eines Innentrommelgroßprüfstands zur Messung lokaler Gleitbewegungen unter dynamischen Bedingungen speziell angepaßt. Damit konnten die Voraussetzungen geschaffen werden, lokale Gleitvorgänge und die korrespondierenden elastischen Profilelementdeformationen auf nahezu realistischen Fahrbahnoberflächen zu untersuchen.

Wesentlich für die hinreichend genau Messung von Gleitvorgängen und elastischen Deformationen im Laufstreifen von Pkw- Reifen ist eine geeignete Kalibrierung der Sensoren. Für die Trennung von Deformations- und Gleitanteil der mit den verschiedenen Sensoren gemessenen Signale ist in vorangegangenen Grundlagenversuchen ein Verfahren entwickelt worden. Für die verschiedenen Betriebszustände und Umgebungsparametern gelten zum Teil unterschiedliche Kalibrierverfahren bzw. Kalibrierfaktoren. Für die geplanten Untersuchungen müssen daher Kalibrierungen unter Berücksichtigung der gewünschten Versuchsbedingungen durchgeführt werden.

Das Verfahren der Kalibrierung besteht im wesentlichen aus Messungen der Profilelementverformungen und der lokalen Gleitvorgänge auf dem Prüfstand LINUS mit Hilfe der in dieser Arbeit vorgestellten Sensoren. Aus dem Vergleich der Signale der unterschiedlichen Sensoren können mathematische Faktoren abgeleitet werden, die im Anschluß die Ermittlung von Deformations- und Gleitbewegungen auf anderen Prüfständen ermöglichen. Zusammen mit diesem Verfahren sind die Voraussetzungen gegeben, mit Hilfe der Sensoren in verschiedenen Konfigurationen Gleitvorgänge auf den vorgestellten Prüfständen zu messen.

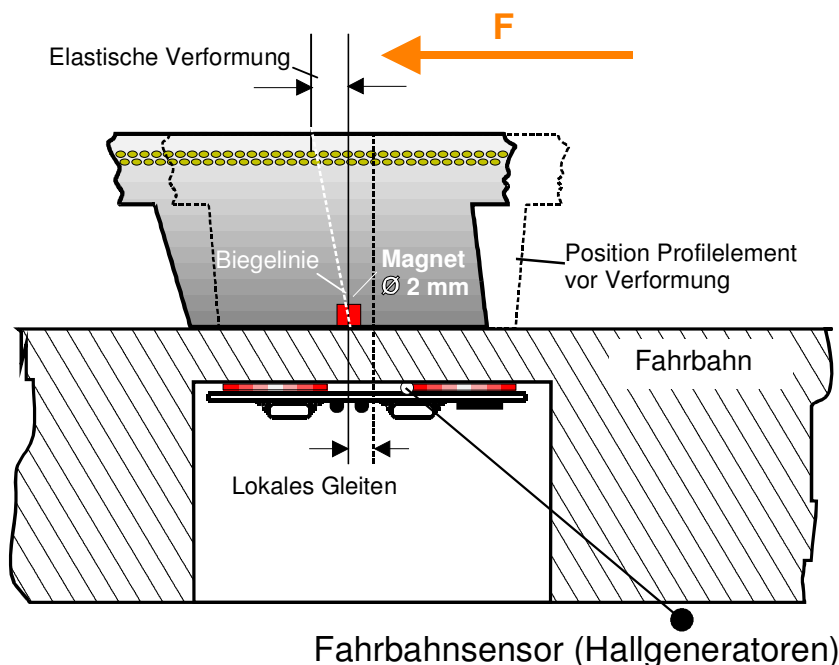


## 3 Ergebnisse zur lokalen Kraftübertragung

### 3.1 Quasistationäre Untersuchungen

Die quasistationären Untersuchungen wurden am Prüfstand LINUS (vgl. Kapitel 2.1) durchgeführt. Sie dienen zur Darstellung und Diskussion lokaler Gleiterscheinungen am abrollenden Reifen mit maximal möglicher Auflösung und Genauigkeit. Im Gegensatz zu den folgenden Messungen auf dem Prüfstand IPS verfügt der Prüfstand LINUS über eine polierte Plexiglasfahrbahn. Hier können Gleiterscheinungen in der Größenordnung von wenigen Zehntel Millimetern beobachtet werden, die auf einer realen Asphaltfahrbahn mit einer mittleren Rauhtiefe im Bereich eines halben Millimeters naturgemäß nicht auflösbar sind.

Für den Prüfstand LINUS wurde zu diesem Zweck eine spezielle Meßanordnung gewählt, die in **Bild 35** dargestellt ist. Der Fahrbahnsensor erfäßt die Bewegungen eines Magneten mit einem



Durchmesser von 2 mm, der sehr dicht an der Fahrbahn im Reifengummi eingebracht ist.

Die elastischen Verformungen des Gummis zwischen Gürtel und Fahrbahnoberfläche

werden nicht detektiert werden, so daß

die Gleitbewegungen zwischen

**Bild 35:** Vorrichtung zur direkten Messung lokaler Gleitbewegungen am Prüfstand LINUS, Schnittbild der durchlaufenden Mittelrippe des Reifens

Gummi und Fahrbahn umso genauer meßbar sind.

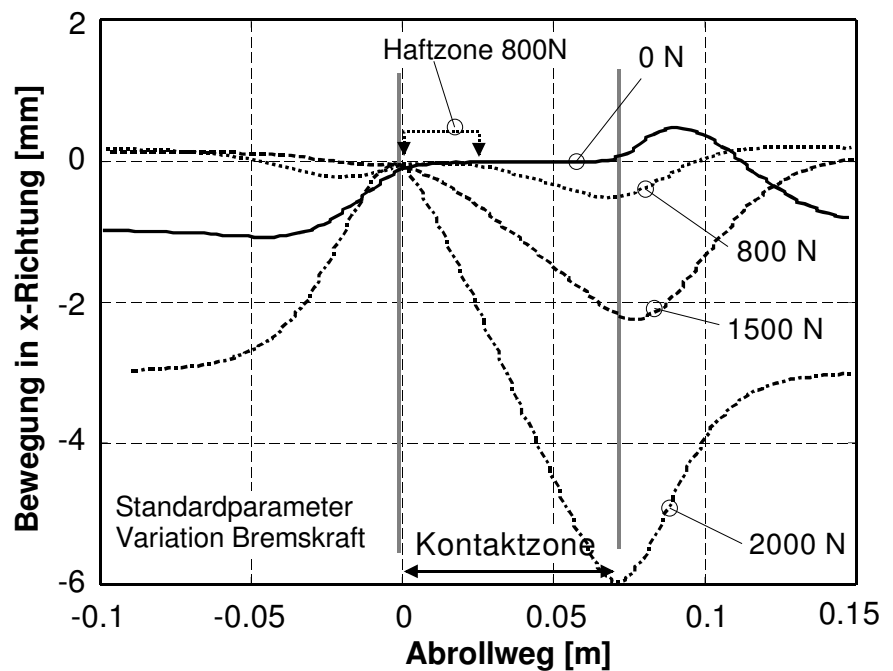
### 3.1.1 Längskraft

Entsprechend der in Kapitel 1.2 vorgestellten Theorie der Gummireibung führen Kräfte, die vom Reifen übertragen werden, zu Deformations- und Gleitbewegungen in der Aufstandsfläche des Reifens. Die Kräfte können nach ihrer Wirkrichtung in Längs- und Querkräfte eingeteilt werden. Die vertikalen Kräfte, die statische bzw. dynamische Radlast, können nur im Zusammenwirken mit den abplattungsbedingten Schubspannungen im Reifenlatsch, die wiederum in Längs- oder Querrichtung wirken, zu Gleitbewegungen führen. So führen Bremskräfte zu Bremsschlupf, woraus der charakteristische Zusammenhang der Reibwert-Schlupf-Kurve (vgl. Kapitel 1.2.2) abgeleitet werden kann. Diese am Rad meßbaren Effekte resultieren aus den in der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn, dem Reifenlatsch, stattfindenden lokalen Vorgängen. **Bild 36** zeigt die lokalen Gleitbewegungen eines unter Bremskräften abrollenden Reifens auf Prüfstand LINUS. Die Kurve mit der Bezeichnung „0N“ stellt den freirollenden Zustand dar. Das Signal des Fahrbahnsensors, der wie in **Bild 35** angeordnet ist, zeigt

vor und nach der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn nichtlineare Signalformen, die aus der Annäherung des Magneten an den Fahrbahnsensor bei gleichzeitigem Verdrehen in die spätere Position innerhalb der Kontaktzone resultieren.

Diese Effekte des „Hineindrehens“ in den Reifenlatsch hängen davon ab, wie genau der Fahrbahnsensor getroffen

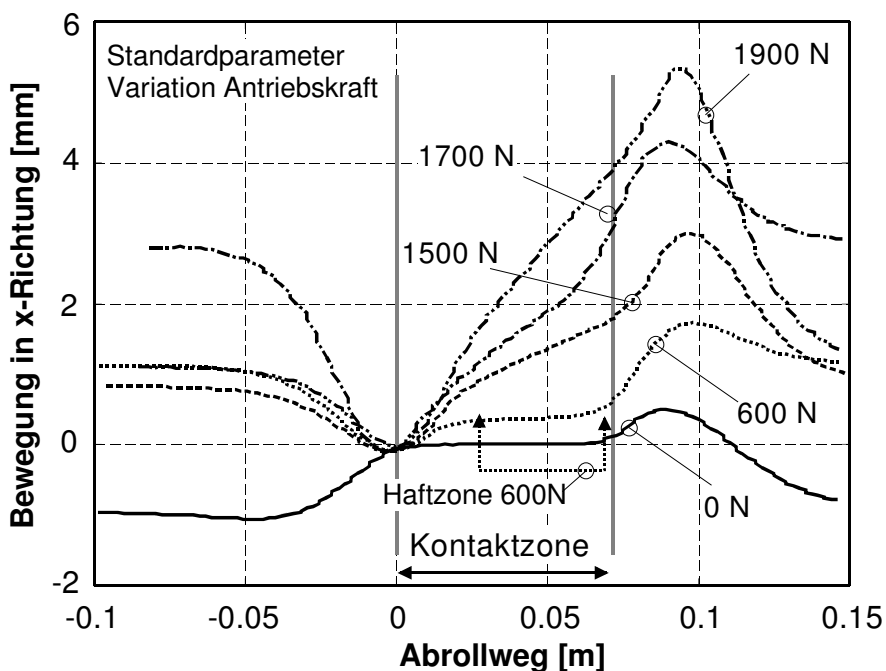
wird und werden auch von der Vorspannung des Laufstreifengummis durch äußere Kräfte beeinflusst. Befindet sich der Magnet in der Kontaktzone, so kann er auf Grund seiner geometrischen Abmessungen und des geringen Abstands zur Fahrbahnoberfläche ( $< 0.1$  mm) keine Kippbewegungen ausführen. Ein Aussage über Gleitbewegungen ist nur innerhalb dieser Kontaktzone möglich. Außerhalb des Reifenlatschs können definitionsgemäß allerdings auch keine Gleitbewegungen auftreten. Das vom Fahrbahnsensor gemessene Signal verläuft für den freirollenden Zustand horizon-



**Bild 36:** Lokale Gleitbewegungen in Längsrichtung am Prüfstand LINUS bei Variation der Bremskraft

tal. Die Position des Magneten relativ zum Fahrbahnsensor verändert sich nicht, es tritt kein lokales Gleiten auf. Wird eine Bremskraft in das Rad eingeleitet, so können bereits bei niedrigen Bremskräften Gleitbewegungen beobachtet werden. Dabei treten diese Vorgänge zunächst in der zweiten Hälfte des Reifenlatschs auf. Wie bei der Kurve für 800 N Bremskraft setzen nach einer Zone des Haftens Gleitbewegungen ein, die in der Darstellung als vertikale Abweichung von der Nulllinie abgelesen werden können. Je höher die Bremskraft ist, um so früher setzen die Gleitbewegungen ein, und um so höher ist der Gesamtbetrag der zurückgelegten Gleitstrecke. Für eine Bremskraft von 2000 N können ca. 6 mm Gleitweg abgelesen werden. Nach dem Einsetzen von lokalem Gleiten dauern die Gleitbewegungen immer bis zum Ende des Reifenlatschs an. Wird ein Pkw-Rad mit einer Antriebskraft beaufschlagt, kommt es ebenso zu lokalem Gleiten. Es bilden sich allerdings einige Unterschiede heraus.

**Bild 37** zeigt das Fahrbahnsensorsignal in einem zur obigen Darstellung analogen Meßaufbau. In diesem Fall überträgt der Reifen Antriebskräfte. Besonders deutliche Unterschiede zur Bremskraft zeigen sich bei den Kurven für niedrige Antriebskräfte. Man erkennt, daß Gleitvorgänge bei 600 N Antriebskraft zunächst im Einlaufbereich des Reifens stattfinden. In der zweiten Latschhälfte



kommen die Gleitbewegungen zum Stillstand. Das Meßsignal bewegt sich horizontal zur Nulllinie.

Höhere Antriebskräfte führen dazu, daß sich die Gleitbewegungen weiter in den Reifenlatsch ausdehnen. Dabei sind in der zweiten Hälfte zunächst noch niedrigere Geschwindigkeiten (flacherer Kurvenverlauf) zu beobachten. Bei 1900 N Antriebskraft verlaufen die Gleitvorgänge über den gesamten

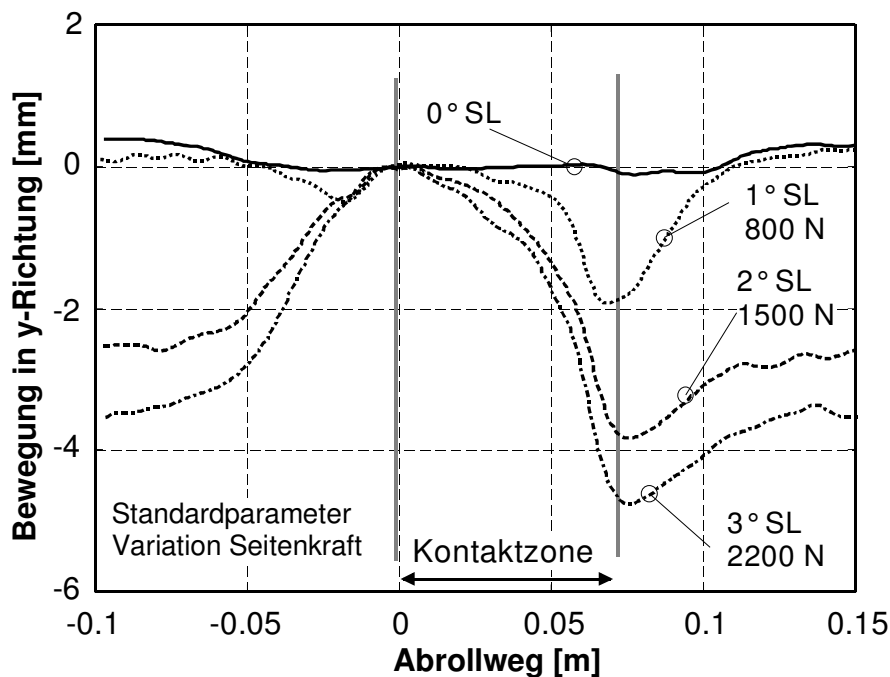
**Bild 37:** Lokale Gleitbewegungen in Längsrichtung am Prüfstand LINUS bei Variation der Antriebskraft

Reifenlatsch mit annähernd gleicher Geschwindigkeit bis zu einer Gesamtstrecke von ca. 4 mm. Die Ursache für die Unterschiede zwischen Antriebs- und Bremskräften kann aus der Überlagerung mit den abplattungsbedingten Schubspannungen abgeleitet werden und wird in Kapitel 3.1.4

näher erläutert. Insgesamt kann für niedrige und mittlere Kraftschlußbeanspruchungen immer das Auftreten von gleitenden und haftenden Zonen in der Kontaktzone beobachtet werden. Dies entspricht den von Gerresheim [48] durchgeführten Untersuchungen, in denen er Haft- und Gleitbereiche innerhalb des Reifenlatschs unterscheiden konnte.

### 3.1.2 Querkraft

Die Übertragung von Querkraften am Reifen führt wie bei Längskräften zu Deformationen des Laufstreifens und zu Gleitbewegungen. Die Bewegungen erfolgen entsprechend der Wirkrichtung der Kräfte in Querrichtung des Reifens. **Bild 38** zeigt die Signale des Fahrbahnsensors bei Messung lokaler Gleitbewegungen in y-Richtung unter Variation des Schräglaufwinkels. Der Schräglaufwinkel ist die dem Reifenschlupf entsprechende Größe, die maßgeblich die Höhe der entstehenden Sei-



**Bild 38:** Lokale Gleitbewegungen in Querrichtung am Prüfstand LINUS bei Variation des Schräglaufwinkel

tenkraft bestimmt. Die Meßstelle in der Mitte des Reifens ist für den freirollenden Zustand frei von Gleitbewegungen. Ein Schräglaufwinkel von einem Grad führt zu einer globalen Seitenkraft von 800 N und lokal zum Einsetzen von Gleitbewegungen. Ähnlich wie unter Bremskräften setzen die Gleitbewegungen erst nach einer kurzen Strecke des Haftens im Anfangsbereich

des Reifenlatschs ein. Die Ursache dafür liegt in der Geometrie der Profilelemente. Für das Überschreiten des lokalen Reibwertmaximums ist es zunächst erforderlich, den Laufstreifen maximal elastisch vorzuspannen. Da in Querrichtung in der Mitte des Laufstreifens nur geringe abplattungsbedingte Schubspannungen vorherrschen, muß diese Vorspannung, anders als in Längsrichtung, von den wirkenden lokalen Schubspannungen, die aus dem Schräglaufwinkel resultieren, aufgebracht werden. Dazu ist neben der wirkenden Kraft auch eine gewisse Einlaufstrecke erforderlich, da die einzelnen Profilelemente eine bestimmte geometrische Höhe aufweisen. Nachdem das Pro-

filelement maximal elastisch vorgespannt ist, kann es lokale Kräfte übertragen, die bei Überschreiten des lokalen Reibwertmaximums zu Gleitbewegungen führen. Mit wachsenden Schräglaufwinkeln steigen die Seitenkräfte und die während des Fahrbahnkontaktes zurückgelegten Gleitstrecken. Die Größenordnung der auftretenden Bewegungen entspricht in etwa den Verhältnissen bei der Übertragung von Brems- oder Antriebskräften. Eine Seitenkraft von 2200 N führt zu lokalem Gleiten von ca. 5 mm in Querrichtung. Für höhere Schräglaufwinkel verkleinert sich die Haftzone innerhalb des Reifenlatschs, da höhere lokale Schubspannungen zu einem schnelleren Erreichen der elastischen Deformation führen und dementsprechend Gleiten früher einsetzt. Für alle Bedingungen gilt, daß die auftretenden Gleitbewegungen analog zu den Beobachtungen unter Bremskräften immer bis zum Ende des Reifenlatschs andauern. Gleiterscheinungen im Anfangsbereich des Reifenlatschs, die später wieder zurückgehen, können nur bei Antriebskräften beobachtet werden.

### 3.1.3 Innendruckvariation

In den vorangegangenen Kapiteln konnte gezeigt werden, daß Gleitbewegungen im Reifenlatsch unter der Wirkung von äußeren Kräften auftreten. Der Ort des Auftretens und die Richtung der Gleitbewegung richtet sich nach der Art der übertragenen Kraft.

Neben äußeren Kräften führt jedoch auch die Abplattung des Reifens zu Schubspannungen im Reifenlatsch (vgl. Kapitel 1.2.2). Diese inneren Kräfte beanspruchen den lokalen Reibwert in ähnlicher Weise wie äußere Kräfte. Unter normalen Bedingungen führen diese abplattungsbedingten Schubspannungen nicht zum Auftreten von Gleitbewegungen. Unter bestimmten Umständen kann es jedoch auch durch diese Effekte zum lokalen Gleiten kommen. Dazu müssen entweder die Schubspannungen sehr hoch werden, wie bei hohen Radlasten oder niedrigem Reifeninnendruck, oder das lokale Reibwertmaximum muß sehr niedrig sein, z.B. verursacht durch eine Zwischenmedium auf der Fahrbahn. Letzterer Effekt wird für die Reibwerterkennung mit dem Darmstädter Reifensensor ausgenutzt (vgl. Kapitel 4). Besonders zu niedriger Reifeninnendruck führt durch die stärkere Abplattung des Reifens und die dadurch verursachten geometrischen und kinematischen Verzwängungen im Reifenlatsch zu erheblich gesteigerten lokalen Schubspannungen. Erschwerend kommt hinzu, daß der Reifeninnendruck maßgeblich die Flächenpressung in der Aufstandsfläche bestimmt. Das führt zum gemeinsamen Auftreten von hohen Schubspannungen in horizontaler Richtung und niedrigen Kräften in vertikaler Richtung. Die Haftgrenze der einzelnen Profilelemente wird dadurch schnell erreicht und lokale Gleitbewegungen setzen ein.

**Bild 39** zeigt das Ergebnis einer Messung der lokalen Gleitbewegungen am freirollenden Reifen in

Längsrichtung bei Variati-

on des Reifeninnendruck.

Für den Standarddruck von

2.5 bar sind entsprechend

den vorangegangenen Dar-

stellungen keine Gleitbe-

wegungen erkennbar. Die

Absenkung des Innen-

drucks auf 1.5 bar führt

gemäß den oben beschrie-

benen Zusammenhängen

zum Einsetzen von leichten

Gleitbewegungen, die sich

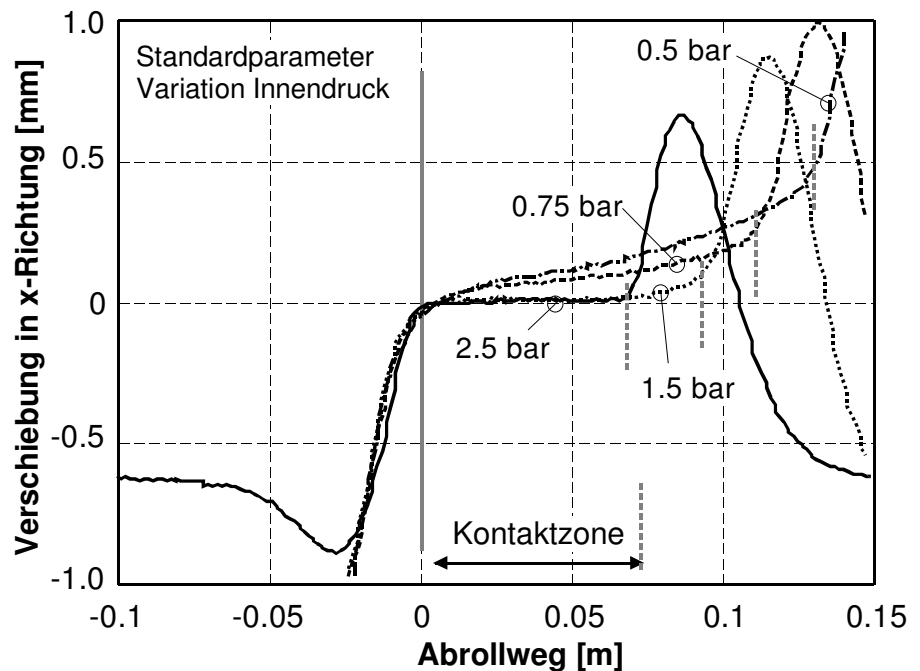
bei einer Absenkung auf

0.5 bar bis zu einer Größen-

ordnung von ca. 0.4 mm steigern.

Man erkennt gleichzeitig die Verlän-

gerung der Reifenaufstandsfläche durch die stärkere Einfederung des Reifens bei abgesenktem Innen-



**Bild 39:** Lokale Gleitbewegungen an einem freirollenden Reifen in Längsrichtung am Prüfstand LINUS bei Variation des Reifeninnendrucks

0.5 bar bis zu einer Größenordnung von ca. 0.4 mm steigern. Man erkennt gleichzeitig die Verlän-

gerung der Reifenaufstandsfläche durch die stärkere Einfederung des Reifens bei abgesenktem Innen-

druck. Dieser Darstellung nur schwer zu entnehmen ist die optisch beobachtbare Tatsache, daß die Gleitbewegungen in Richtung der Latschmitte verlaufen. Das bedeutet, daß der Reifen bedingt

durch den Verlust der Haftung in der Kontaktzone versucht, sich „zusammenzuziehen“.

### 3.1.4 Reibkraftaufbau am Pkw- Reifen

Aus den oben erläuterten Messungen lokaler Gleitbewegungen lassen sich in Zusammenhang mit

bereits früher veröffentlichten Erkenntnissen zur Verteilung der lokalen Schubspannungen und der

lokalen Verformungen in der Aufstandsfläche von Pkw-Reifen (vgl. Roth [101], Supke [115], Ger-

resheim [47] u.a.) Rückschlüsse allgemeiner Art auf den Reibkraftaufbau am Pkw-Reifen ziehen.

Während die lokalen Verformungen und Gleitbewegungen für einen unter Schräglaufwinkel abrol-

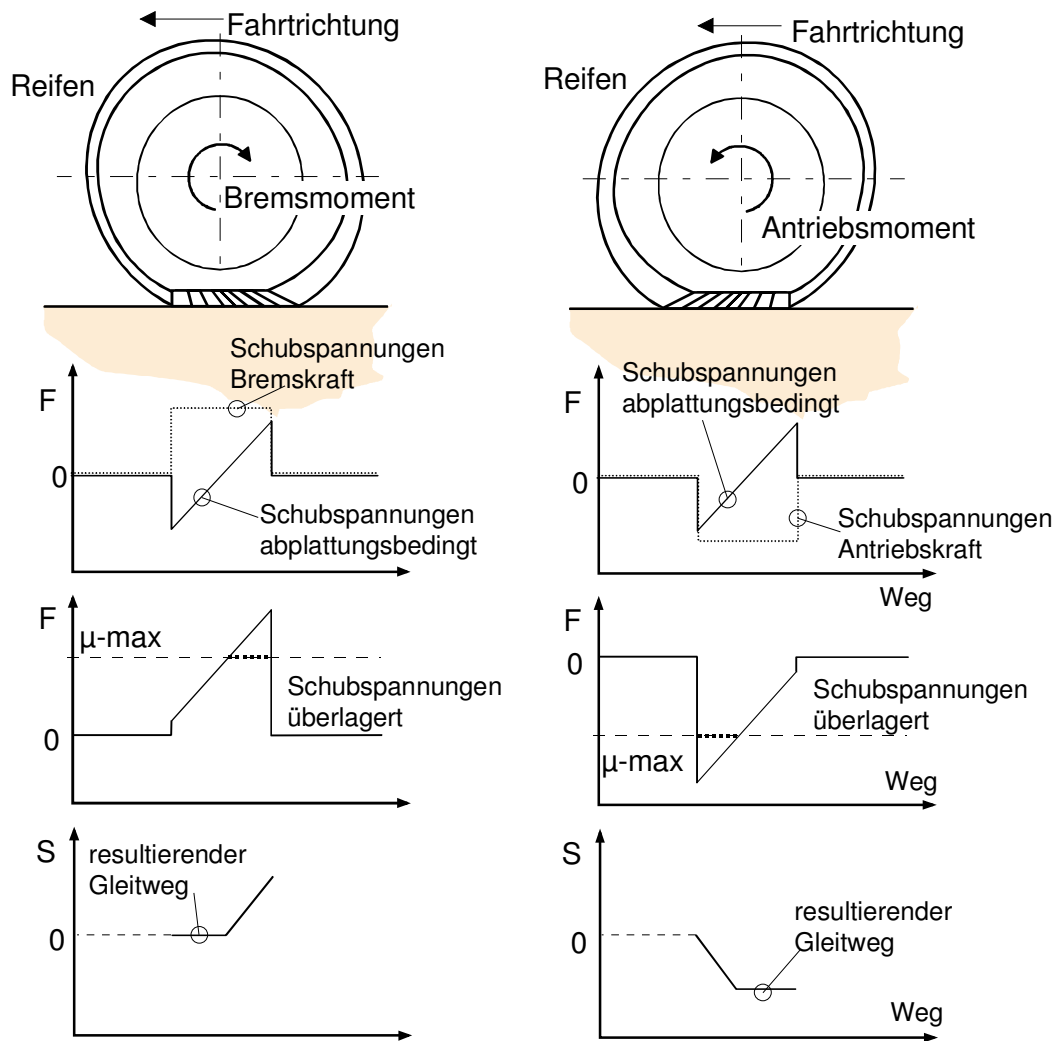
lenden Reifen relativ einfach erklärt werden können, sind die Verhältnisse am angetriebenen oder

gebremsten Rad erheblich komplexer. Die Überlagerung von abplattungsbedingten Schubspannungen mit der durch Längskräfte verursachten lokalen Reibwertbeanspruchung führt zu unterschiedlichen

Reaktionen im Fall des Antriebs oder Bremsens.

Der Kraft- und Verformungszustand der Profilelemente eines Reifens für die beiden Fälle kann

schematisch **Bild 40** entnommen werden.



**Bild 40:** Schematische vereinfachte Darstellung der Überlagerung von Schubspannungen und Entstehung von Gleitbewegungen am Pkw-Reifen

In der Darstellung wird zwischen Antriebs- und Bremsfall unterschieden. Im oberen Abschnitt ist der Reifen mit den durch die jeweiligen Kräfte hervorgerufenen Verformungen der Reifenborsten modellhaft skizziert. Darunter sind die abplattungsbedingten zusammen mit den kraftverursachten Schubspannungen aufgetragen. Die abplattungsbedingten lokalen Kräfte entsprechen den gemäß dem Borstenmodell zu erwartenden treibenden und bremsenden Effekten innerhalb des Reifenlatschs (vgl. Kapitel 1.2.2, **Bild 7**). Diese Modellvorstellung kann sowohl mit der Reifensensorik als auch mit einer fahrbahnseitigen lokalen Kraftmessung experimentell bestätigt werden. Die äußeren Kräfte rufen zusätzliche lokale Kräfte hervor, die hier stark vereinfacht als Rechteckfunktion über den Reifenlatsch eingetragen sind. In Realität muß im Einlaufbereich des Reifens von einer ansteigenden lokalen Kraft ausgegangen werden, da die Profilelemente eine gewisse Strecke benötigen, um eine gleichmäßig hohe Kraft aufzubauen.

In den Diagrammen darunter sind die überlagerten lokalen Schubspannungen für die beiden Belastungsfälle aufgetragen. Man erkennt, daß die Superposition der beiden lokalen Kraftzustände für Teile des Reifenlatschs zur Überschreitung des lokalen Reibwertmaximums führen kann. Die Höhe dieses Maximums wird vom Reibwert zwischen Reifen und Straße und von der vorherrschenden lokalen Flächenpressung bestimmt.

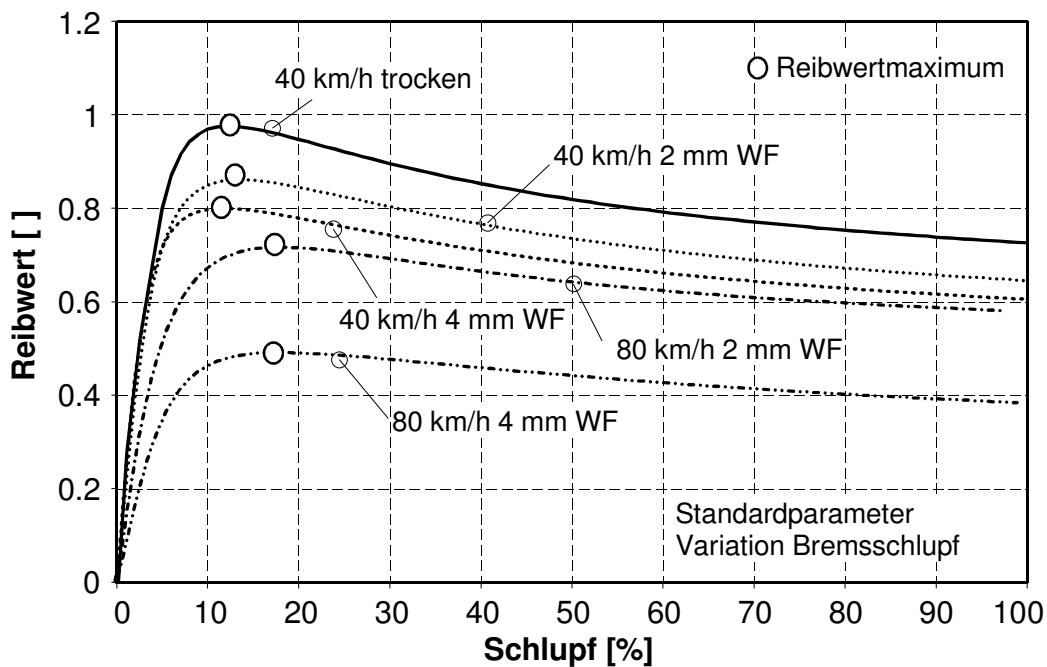
Für den Fall mittlerer Antriebs- oder Bremskräfte kommt es nur für einen Teil des Reifenlatschs zum Überschreiten des lokalen Reibwertmaximums. Die Stelle, an der dadurch verursacht lokales Gleiten einsetzt, hängt vom Belastungsfall des Reifens ab. Bremskräfte rufen in der Überlagerung mit den Abplattungsspannungen im Auslaufbereich des Reifenlatschs die höchsten lokalen Schubspannungen hervor, während Antriebskräfte im Einlaufbereich die höchste Kraftschlußbeanspruchung bewirken. Dementsprechend resultieren aus den unterschiedlichen Belastungszuständen am Rad Gleitvorgänge in unterschiedlichen Koordinatenrichtungen, die zudem an jeweils anderen Stellen des Reifenlatschs auftreten. Wie auch experimentell bestätigt werden konnte, setzen Gleitbewegungen am Reifen unter Bremskräften gegen Ende des Reifenlatschs ein, während bei Antriebskräften zu Beginn des Reifenlatschs Gleiten auftritt. Höhere Kraftschlußbeanspruchungen können zu Gleitbewegungen führen, die sich über die gesamte Aufstandsfläche ausbreiten. Unter diesen Umständen können keine Zonen des Haftens und des Gleitens unterschieden werden. Die Unterschiede zwischen den beiden möglichen Koordinatenrichtungen der Längskräfte beschränken sich dann auf die Koordinatenrichtung der Gleitbewegung.

## 3.2 Dynamische Untersuchungen

Die dynamischen Untersuchungen bei höheren Geschwindigkeiten wurden auf dem Innentrommelprüfstand der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt, der in Kapitel 2.2 beschrieben ist. Im Vordergrund standen dabei Parametervariationen, die auf dem Prüfstand LINUS nicht untersucht werden können. Prinzipbedingt sind Auflösung und Genauigkeit auf LINUS größer, die unrealistische Fahrbahnoberfläche und die niedrige Geschwindigkeit, die unter anderem aus Gründen der Meßauflösung und Genauigkeit eine exakte Berechnung des Schlupfs verhindert, stellen allerdings gravierende Nachteile dar.



Darüber hinaus sollten die Untersuchungen Aufschluß über Phänomene geben, die bisher nicht gemessen werden konnten und in der Literatur deshalb nicht vertreten sind. Dazu zählen Messungen lokaler Gleitbewegungen und Profilelementverformungen unter Variation der Reibwertbedingungen auf nassen Oberflächen. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fahrbahnzustände und die dazugehörigen Reibwert-Schlupf-Kurven sind in **Bild 41** aufgetragen.



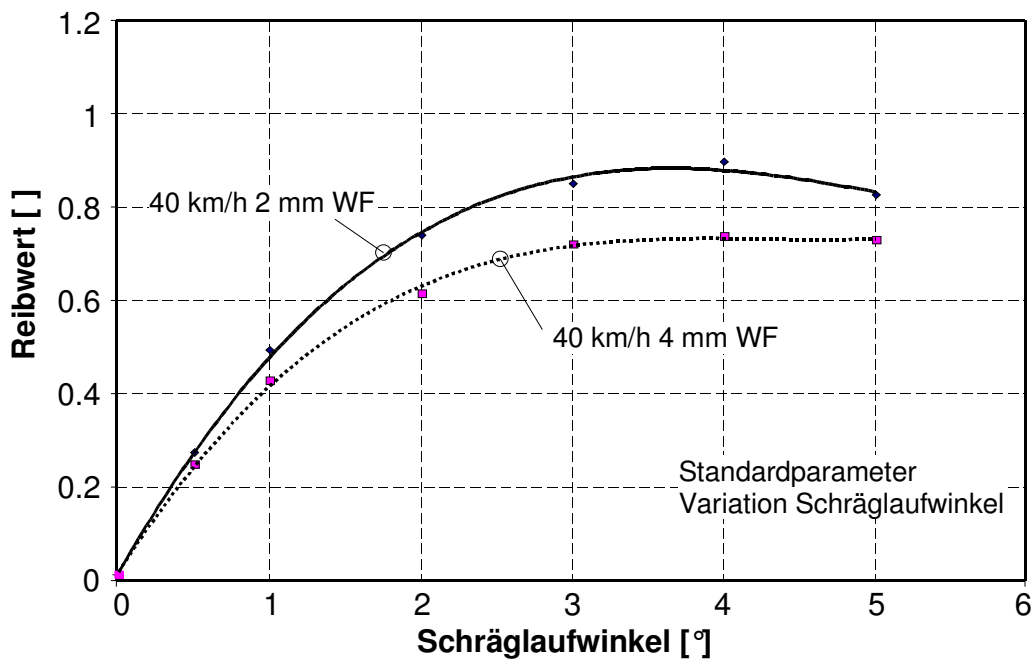
**Bild 41:** Reibwert-Schlupf-Kurven der variierten Meßbedingungen im Innentrommelprüfstand IPS der Bundesanstalt für Straßenwesen

Die Variation verschiedener Reibwertzustände wurde durch die Kombination verschiedener Wasserfilmhöhen mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten erreicht. Ausgehend vom trockenen Fahrbahnzustand, der einen Maximalreibwert von  $\mu=0.95$  liefert, wurden Wasserfilm und Fahrgeschwindigkeit erhöht, bis für 80 km/h und 4 mm Wasserfilm ein Reibwert von  $\mu=0.48$  erreicht wurde. Es wurden darüber hinaus Messungen bei 120 km/h durchgeführt, die allerdings aufgrund eines Sensordefekts keine verwertbaren Ergebnisse geliefert haben und deswegen hier nicht diskutiert werden. Entsprechend den in Kapitel 1.2.2, **Bild 9** vorgestellten Kenngrößen der Reibwert-Schlupf-Kurve kann für die vorliegenden Ergebnisse beobachtet werden, daß die Anfangssteigung der Kurven zunächst nicht von der Höhe des Reibwertmaximums beeinflusst wird, wie z.B. von Bachmann [4] beschrieben. Erst die Kurven für 80 km/h, bei 2mm und 4mm Wasserfilm zeigen eine flachere Anfangssteigung durch die verschlechterten Reibbedingungen, wie von Dieckmann [27] beobachtet. Diese Erscheinung wird im Anschluß vertieft diskutiert. Ähnlich verhält es sich

mit der Lage der Maxima der Reibwert-Schlupf-Kurven, die nur für die Bedingungen mit den beiden niedrigsten Reibwertmaxima zu höheren Schlupfwerten hin verschoben sind.

Nach dem aus der Gummireibungstheorie zu erwartenden Zusammenhang zwischen Gleitgeschwindigkeit und Reibwertmaximum müßten eigentlich bei höheren Fahrgeschwindigkeiten und damit einher gehenden höheren Gleitgeschwindigkeiten niedrigere Schlupfwerte für das Reibwertmaximum auftreten. Dies kann auch für gewöhnlich beobachtet werden. Unter den hier gegebenen Bedingungen führt aber die gesteigerte Fahrgeschwindigkeit zusammen mit dem Wasserfilm zu einer starken Reduzierung des Reibwertniveaus und zu Aquaplaningeffekten. Diese Vorgänge überlagern den Einfluß der Gleitgeschwindigkeit und resultieren in einer Verlagerung des Reibwertmaximums in Richtung höherer Schlupfwerte.

Die Untersuchungen in Längsrichtung wurden für ausgewählte Reibwertbedingungen mit Messungen unter Variation des Schräglaufwinkels ergänzt. In **Bild 42** sind die dabei aufgenommenen



**Bild 42:** Schräglaufwinkel-Seitenkraftbeiwert-Kurven der variierten Meßbedingungen im Innentrommelprüfstand IPS der Bundesanstalt für Straßenwesen

Schräglaufwinkel-Reibwert Charakteristika aufgetragen.

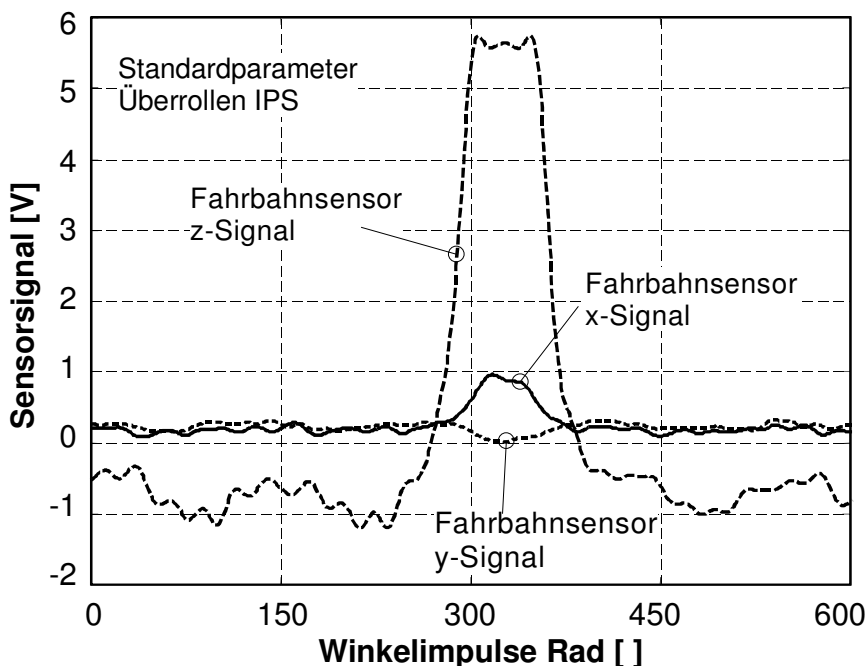
Es werden in etwa die gleichen Maximalreibwerte wie bei den Bremsversuchen mit einer leichten Tendenz zu niedrigeren Reibwerten erreicht.

Die Ursache dafür kann im inneren Aufbau und der Profilgestaltung des Reifens liegen. Es ist aber zu berücksichtigen, daß ein gebremster Reifen durch den Bremschlupf etwas an Geschwindigkeit

verliert. Dadurch könnten sich die Reibbedingungen gegenüber einem Rad verbessern, das unter Schräglaufwinkel mit nahezu konstanter Geschwindigkeit weiter rotiert.

Die Messung der lokalen Gleitvorgänge erfolgte im Innentrommelprüfstand mit der in Abschnitt 2.3 vorgestellten Sensoranordnung. Da im Unterschied zum Prüfstand LINUS nicht mehr bei jeder Überrollung mit einem Treffen des in der Fahrbahn angeordneten Sensors gerechnet werden kann, muß ein statistisches Verfahren die gewünschte Anzahl von Treffern liefern. Dazu werden so lange Messungen unter konstanten Versuchsbedingungen durchgeführt, bis eine so große Zahl an Überrollungen stattgefunden hat, daß mit großer Sicherheit eine genügende Anzahl an Treffern erreicht ist. In der verwendeten Anordnung waren ca. 80 Trommelumdrehungen nötig, bis diese Bedingung erfüllt war. Aus den ermittelten Daten können die Treffer anhand der Signale des Fahrbahnsensors in den drei Koordinatenrichtungen aussortiert werden.

**Bild 43** zeigt einen Ausschnitt aus den Rohsignalen des Fahrbahnsensors während einer Meßreihe.



**Bild 43:** Signale des Fahrbahnsensors im Innentrommelprüfstand IPS der Bundesanstalt für Straßenwesen, freirollender Reifen

Die obige Messung zeigt die stärksten Ausschläge in z-Richtung des Sensors, hervorgerufen durch die Annäherung des Magneten auf der Reifeninnenseite an den Fahrbahnsensor.

Innerhalb des vom z-Signal vorgegebenen Rahmens können die x- und y-Signale des Sensors zur Erkennung von Gleitbewegungen ausgewertet werden. Die Güte des Treffers ergibt sich aus dem

Aufgetragen sind die Signale des Fahrbahnsensors in den drei Koordinatenrichtungen über dem Verdrehwinkel des Rades. Für die Versuche wurde die von Bachmann [6] beschriebene Meßdatenerfassung auf Basis einer winkeldiskreten Abtastung der Reifensensorsignale mit 540 Impulsen pro Radumdrehung verwendet. Die Fahrbahnsensorsignale sind daher unabhängig von der Rotationsgeschwindigkeit der Trommel auf den Verdrehwinkel des Rades bezogen.

Signalabweichung der beiden horizontalen Komponenten vom Idealwert Null nach erfolgter Annäherung des Magneten. Für bestimmte Umstände, z.B. Messungen bei großen Schlupfwerten, kann ein von Null verschiedenes Offset durchaus wünschenswert sein, wenn dadurch der Meßbereich des Sensors besser ausgenutzt werden kann. Aus der für die jeweiligen Versuchsbedingungen erfaßten Menge an Treffern werden über das Kriterium Offset in den horizontalen Koordinaten die besten Treffer ausgewählt und wenn möglich für die spätere Auswertung gemittelt. Wie bei der Vorstellung des Meßprinzips bereits erwähnt, muß in der späteren Diskussion berücksichtigt werden, daß die Fahrbahnsensorsignale nicht zeit- und ortsgleich mit den dazugehörigen Reifensensorsignalen erfaßt werden können. Daraus und aus den Textureigenschaften der Fahrbahn ergibt sich eine Unschärfe in den aus den Messungen abzuleitenden Ergebnissen für das lokale Gleiten. Die Auflösungs-grenze liegt bei dem verwandten Verfahren bei ca. 0.3 mm. Dies ist im Vergleich zum Prüfstand LINUS deutlich ungenauer. Der Vorteil realistischer Fahrbahnbedingungen und Geschwindigkeiten dominiert jedoch für die in dieser Arbeit angestrebten Aussagen zur Reifenreibung und Reibwerterkennung.

### **3.2.1 Bremsschlupf, Antriebsschlupf**

Für die Aktive Sicherheit eines Kraftfahrzeugs ist die Übertragung der Bremskräfte am Reifen von besonderer Bedeutung. Die Bremskraft-Schlupf-Charakteristik, die sich dabei ausbildet, ist wesentlich für die Funktion von ABS und Fahrdynamikregelsystemen [26], die durch Aufbringen von Bremskräften auch querdynamische Stabilisierungen ermöglichen.

Die Regelgüte dieser Systeme kann durch ein verbessertes Verständnis der Reibwert-Schlupf-Charakteristik optimiert werden, indem die Abbildung des Reifenverhaltens in echtzeitfähigen Modellen präziser erfolgt [116]. Die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen mit der Reifen- und der Fahrbahnsensorik vermitteln einen vertieften Einblick in die Vorgänge innerhalb der Profilelemente eines Reifenlatschs und können zu ihrem besseren Verständnis beitragen.

Die verschiedenen Fahrbahnzustände, die sich in unterschiedlich hohen Reibwertniveaus äußern, führen zu Veränderungen der lokalen Effekte in der Aufstandsfläche. Diese werden im folgenden schwerpunktmäßig am Beispiel des Bremsschlupfes diskutiert und exemplarisch auf Antriebsschlupf und Seitenkraft übertragen.

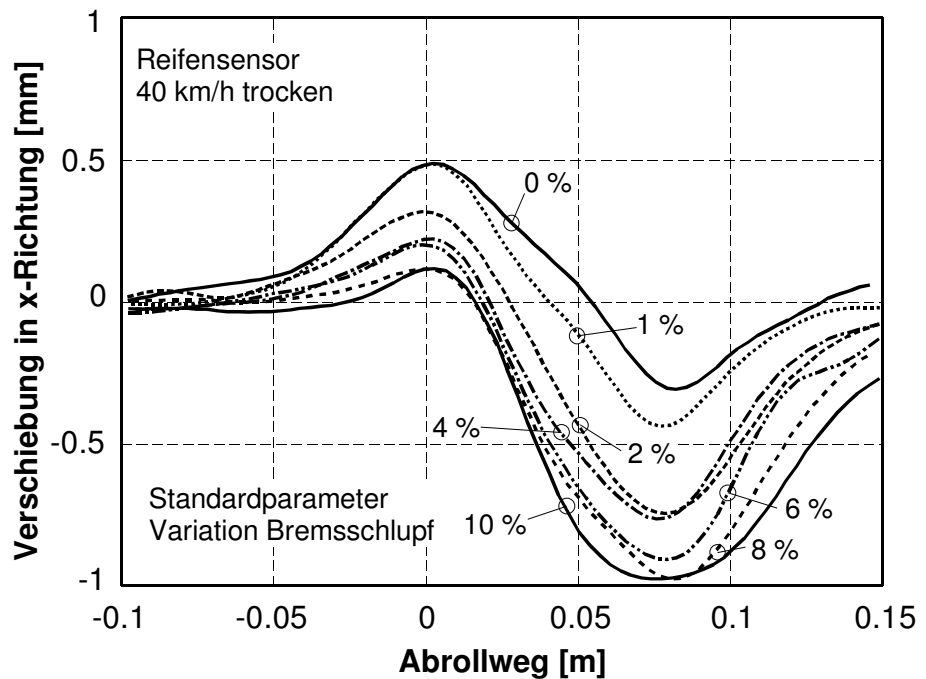
Der griffigste Fahrbahnzustand der durchgeführten Parametervariationen findet sich für die trockene Asphaltoberfläche (vgl. **Bild 41**). Der Reibwert erreicht einen maximalen Wert von ca.  $\mu=0.95$ . Die Variation des Bremsschlupfs führt zu Deformationen der Profilelemente, entsprechend der Darstellung in **Bild 44**. Mit zunehmendem Schlupf steigen die übertragenen Kräfte. Die Reifensensorsignale reagieren gemäß dem Borstenmodell mit einer Verschiebung des im freirollenden Zustand symmetrischen Verformungsniveaus in Richtung Reifenauslauf. Die

„Borsten“ weichen der aufgetragenen Kraft aus. Für kleine Schlupfwerte steigt das Verformungsniveau der Profilelemente, das sich in der korrespondierenden Verschiebung des Magneten im Laufstreifen äußert, zunächst relativ schnell an. Bereits

ab einem Schlupf von ca. 4 % wächst das Deforma-

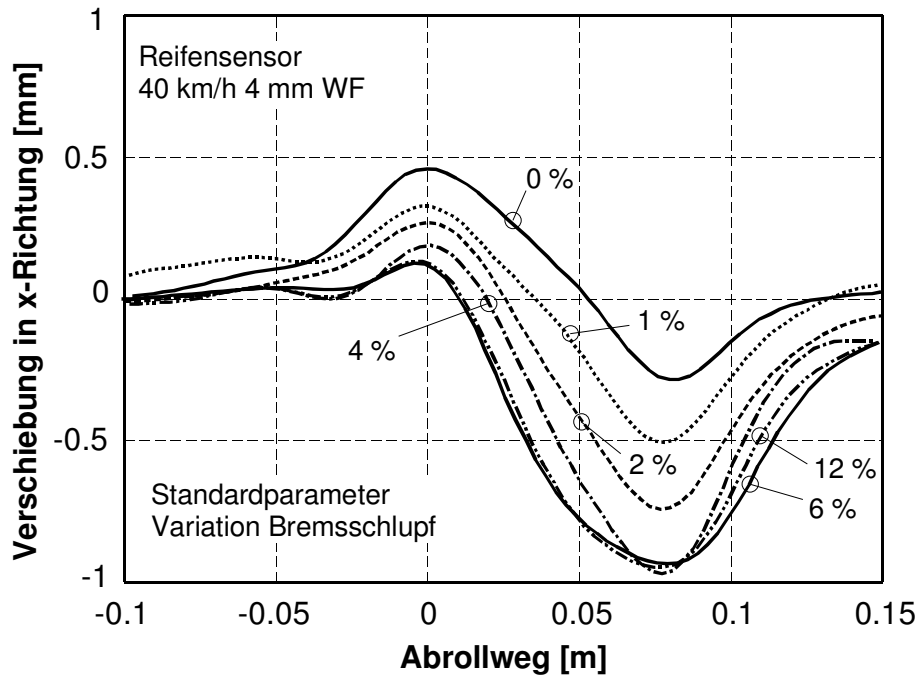
tionsniveau nur noch sehr verhalten weiter. An dieser Stelle verläßt die Reibwert-Schlupf-Kurve den steilen Linearanstieg, der maßgeblich von der Steifigkeit der Profilelemente des Reifens abhängt. Bis ca. 10 % Schlupf ist ein weiterer Anstieg des Deformationsschlupfs zu beobachten, darüber hinaus führen höhere Schlupfwerte zu keiner wesentlichen Veränderung der Reifensensorsignale mehr. Das Reibwertmaximum ist nahezu erreicht. Bis weit in den degressiven Teil der Reibwert-Schlupf-Kurve hinein bleiben die Reifensensorsignale danach auf konstantem Verformungsniveau. Dementsprechend gilt für den Deformationsschlupf am Reifen ebenso ein unveränderter Betrag.

Der trockene Fahrbahnzustand zeigt erwartungsgemäß deutliche Reaktionen des Reifensensors auf die von außen aufgetragenen Kräfte. Die Signale des Fahrbahnsensors können für diesen Zustand nicht dargestellt werden. Unter den guten Griffigkeitsbedingungen ist die für die Auswertung des Fahrbahnsensorsignals nötige Anzahl von Überrollungen unter konstanten Betriebsparametern nicht erreichbar, da der Reifen in kürzester Zeit verschlissen wäre.



**Bild 44:** Reifensensorsignale in x-Richtung, Variation Bremsschlupf, IPS, 40km/h trockene Farbahn

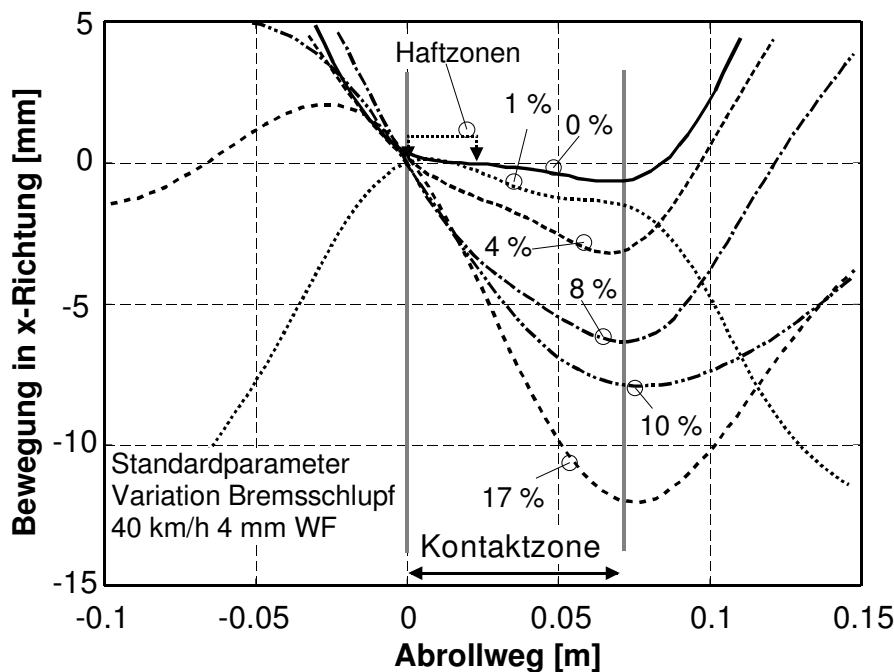
Wesentlich geringere Reifenbelastungen sind bei einem Wasserfilm von 4 mm Höhe zu verzeichnen. Der maximale Reibwert beträgt hier nur noch ca.  $\mu=0.8$ . Die Reifensensorsignale in **Bild 45** reagieren in ähnlicher Weise auf den Bremsschlupf wie die bei trockener Fahrbahn. Die Verformungen entwickeln sich



**Bild 45:** Reifensensorsignale in x-Richtung, Variation Bremsschlupf, IPS, 40 km/h, 4 mm Wasserfilm

entwickeln sich mit ansteigendem Bremsschlupf sehr schnell, um auch hier bei vergleichsweise niedrigen Schlupfwerten ihr Maximum zu erreichen. Dieses ist gegenüber dem trockenen Fahrbahnzustand nur leicht vermindert und verhält sich proportional zum Maximalreibwert. Es

können somit keine signifikanten Veränderungen durch das Aufbringen des Wasserfilms erzielt werden. Das entspricht der Betrachtung der Charakteristik der beiden



**Bild 46:** Fahrbahnsensorsignale in x-Richtung, Variation Bremsschlupf, IPS, 40 km/h, 4 mm Wasserfilm

Reibwert-Schlupf-Kurven. Für beide Fahrbahnzustände ist die Anfangssteigung nahezu konstant, es zeigt sich keine Abhängigkeit vom Maximalreibwert. In **Bild 46** sind die Signale des Fahrbahnsensors unter den gleichen Versuchsbedingungen aufgetragen. Definitionsgemäß handelt es sich bei diesen Verschiebungen um die Summe aus

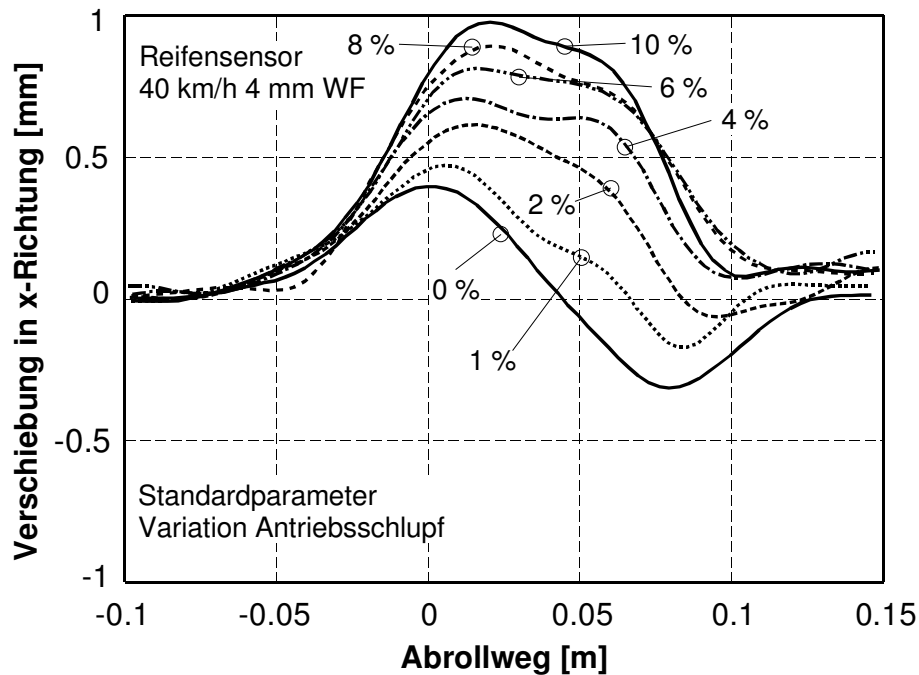
Deformations- und Gleitschlupf, da der Magnet, dessen Verschiebung gemessen wird, auf der Innenseite des Reifens befestigt ist (vgl. Abschnitt 2.3). Die ermittelte Gesamtverschiebung muß sich daher in etwa proportional zum globalen Schlupf verhalten. Die vor und nach der Kontaktzone zu beobachtenden Signalverläufe resultieren aus der Annäherung des Magneten an den Sensor. Da diese Vorgänge durch die Dreh- und Annäherungsbewegung stark nichtlinearen Charakter haben, sind sie nur schwer zu interpretieren. Es wird darauf verzichtet, da sie für die weitere Betrachtung der Vorgänge in der eigentlichen Kontaktzone unerheblich sind. Da sich aus den Reifensensorsignalen, die ein Maß für den Deformationsschlupf darstellen, keine gravierenden Veränderungen von der trockenen zur nassen Fahrbahnoberfläche ergeben haben, kann auch das Fahrbahnsensorsignal, das Reifensensorsignal und lokales Gleiten enthält, für den trockenen bzw. griffigen Fahrbahnzustand als repräsentativ gelten. Die Messungen zeigen erwartungsgemäß mit dem Gesamtschlupf ansteigende Bewegungen aus Deformations- und Gleitschlupf.

Der leicht fallende Verlauf des 0% Signals enthält die elastischen Deformationen des Laufstreifens und fällt daher nicht mit der Nulllinie zusammen. Für kleine Schlupfwerte sind im Anfangsbereich der Kontaktzone Haftgebiete erkennbar. Das Meßsignal für 1% Schlupf weicht in diesem Bereich nicht von der 0% Linie ab. Dies entspricht den in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Messungen auf LINUS, wenn auch die Auflösung der Messungen auf IPS weniger hoch ist und solche Effekte nur eingeschränkt diskutiert werden können. Für die Reibwert-Schlupf-Kurve bestätigt dieser Zusammenhang die Beobachtung von Haft- und Gleitgebieten im Reifenlatsch, die gleichzeitig auftreten können. Im Unterschied zu den Reifensensormessungen aus **Bild 44** und **Bild 45** steigen die Signale des Fahrbahnsensors in etwa linear zum Bremsschlupf an, ohne ein Gebiet der „Sättigung“ zu zeigen. Aus dem Vergleich mit den Reifensensorsignalen ist ersichtlich, daß daher für kleine Schlupfwerte ein nennenswerter Teil der ermittelten Gesamtverschiebung aus der Deformation des Laufstreifengummis resultiert. Dieser Zusammenhang und seine Auswirkung auf die Reibwert-Schlupf-Kurve wird in Kapitel 3.3 näher erläutert. Es werden bis ca. 13 mm Gleit- und Deformationsweg bei einem Schlupf von 17% erreicht. Dies entspricht dem Wert, der für die vorliegende Latschlänge von ca. 75 mm zu erwarten ist. Es zeigt, daß tatsächlich der Latschbereich des Reifens das Gebiet ist, in dem Deformations- und Gleitschlupf auftreten.

Für identische Umgebungsparameter erfolgten analog zum Bremsschlupf Untersuchungen der Profilelementverformungen und Gleitbewegungen bei Antriebsschlupf. Messungen dieser Art wurden bisher mit der Darmstädter Reifensensorik nur in geringem Umfang durchgeführt. Die am Fachgebiet vorhandenen Reifenmeßanhänger sind bis auf eine neuere Konstruktion nur für Bremsversuche geeignet. Der Prüfstand LINUS läßt wegen der geringen Geschwindigkeit des Prüfrads keine exakte

Bestimmung des globalen Schlupfs zu. Messungen im Fahrversuch sind zwar auch im angetriebenen Zustand durchgeführt worden, allerdings ist die Motorleistung des Versuchsfahrzeugs begrenzt, so daß Messungen bei hohen Zugkräften nur eingeschränkt realisierbar sind. Zudem gestaltet sich die Berechnung des Reifenschlupfs an einem Pkw schwierig.

Der Innentrommelprüfstand der BAST gestattet sowohl Brems- als auch Antriebsversuche und ermöglichte so erstmals umfangreiche Sensormessungen unter diesen Bedingungen.



**Bild 47:** Reifensensorsignale in x-Richtung, Variation Antriebsschlupf, IPS, 40 km/h, 4 mm Wasserfilm

kleinen Schlupfwerten zunächst schnell an, um bei Schlupfwerten ab 10 % die elastische Maximaldeformation des Laufstreifens zu erreichen. Dabei bleibt im Unterschied zu den Verformungen bei Bremsschlupf das Gebiet der größten elastischen Deformation immer im Bereich des Latschbeginns. Dies kann durch die Überlagerung der abplattungsbedingten mit den aus der Antriebskraft resultierenden Schubspannungen erklärt werden (vgl. Kapitel 3.1.4, **Bild 34**).

Bemerkenswert ist, daß offensichtlich im Antriebsfall höhere Schlupfwerte erforderlich sind, bis das elastische Deformationsvermögen der Profilelemente ausgeschöpft ist (vgl. **Bild 45** und **Bild 47**). Dies kann durch einen relativ komplexen Wirkmechanismus erklärt werden: Die Profilelemente benötigen für den maximalen Aufbau ihrer elastischen Deformation bei einer gegebenen lokalen Schubspannung aus kinematischen Gründen eine gewisse Einlaufstrecke. Die Länge dieser Distanz hängt von der Höhe der Schubspannung ab, da bei einem angenommenen linearen Kraftanstieg über der Einlaufstrecke sehr hohe lokale Kräfte, die das lokale Reibwertmaximum über-

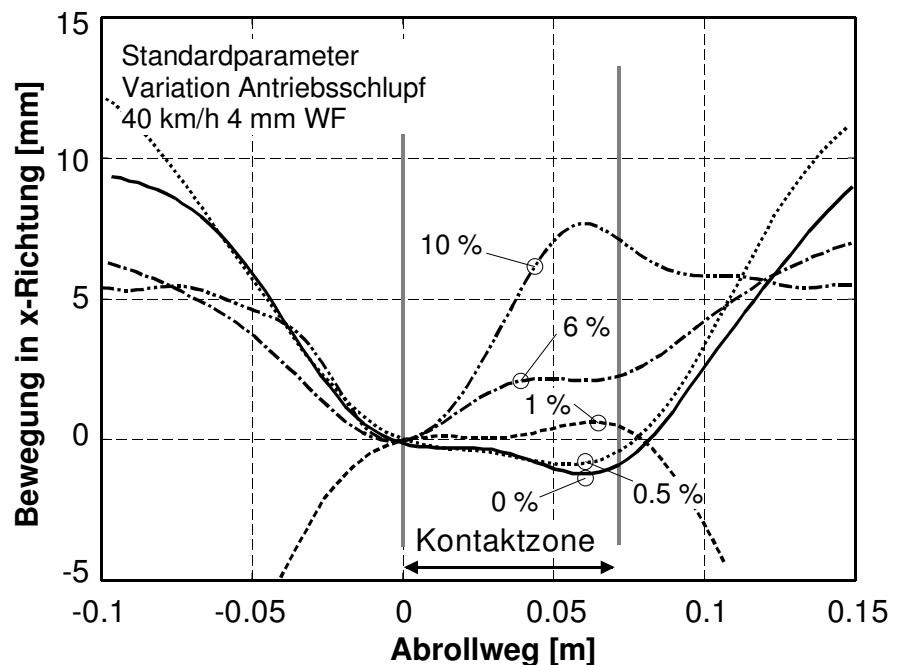
**Bild 47** zeigt die Reifensensorsignale in x-Richtung bei der Variation des Antriebsschlupfs auf dem Prüfstand IPS. Auch hier ergeben sich dem Borstenmodell des Reifens entsprechende Verformungen. Die Profilelemente werden durch die Antriebskraft in Richtung Latschbeginn verschoben. Die Verformungen steigen bei



schreiten, bereits nach kurzer Distanz zur Ausschöpfung des maximalen Deformationsvermögens eines Profilelements führen. Dieser Effekt bedingt, daß bei Antriebskräften, die im Latscheinlauf zunächst die höchsten lokalen Schubspannungen herbeiführen, die mit ansteigenden lokalen Kräften kürzer werdende Einlaufstrecke zu einem stetig steigenden Deformationspotential im Latschbeginn führt. Die Verkürzung der Einlaufstrecke bewirkt, daß das Potential der wirkenden Schubspannungen voll in Deformation umgesetzt werden kann, bevor die Schubspannung bei der Annäherung an die Latschmitte wieder abfallen. Dagegen hat die Länge der Einlaufstrecke beim gebremsten Reifen einen geringeren Einfluß, da hier die höchsten Schubspannungen und resultierenden elastischen Deformationen im Latschlauf erreicht werden. Bis dorthin ist eine genügend lange Einlaufstrecke zur vollen Ausbildung der elastischen Deformation vorhanden. Diese wird somit bereits bei niedrigeren Umfangskräften bzw. Schlupfwerten erreicht, während sich beim angetriebenen Rad beide Effekte der höheren Schubspannungen und der verkürzten Einlaufstrecke voll ausbilden müssen, damit das Deformationsmaximum auftritt.

Das Gesamtdeformationsniveau, das dann erreicht wird, entspricht beim angetriebenen Rad in etwa den Verhältnissen des gebremsten Rades. Es treten bis zu 1 mm Verschiebung des Magneten relativ zum Gürtel auf.

Die zugehörigen Fahrbahnsensorsignale sind in **Bild 48** aufgetragen. Analog zum Bremschlupf ist auch hier ein mit dem globalen Schlupf nahezu linearer Anstieg der Deformations- und Gleitbewegungen, die mit dem Fahrbahnsensor erfaßt werden, zu verzeichnen. Niedrige Schlupfwerte können mit den Deformationen der Profilelemente alleine erklärt werden. Interessant ist der Kurvenver-

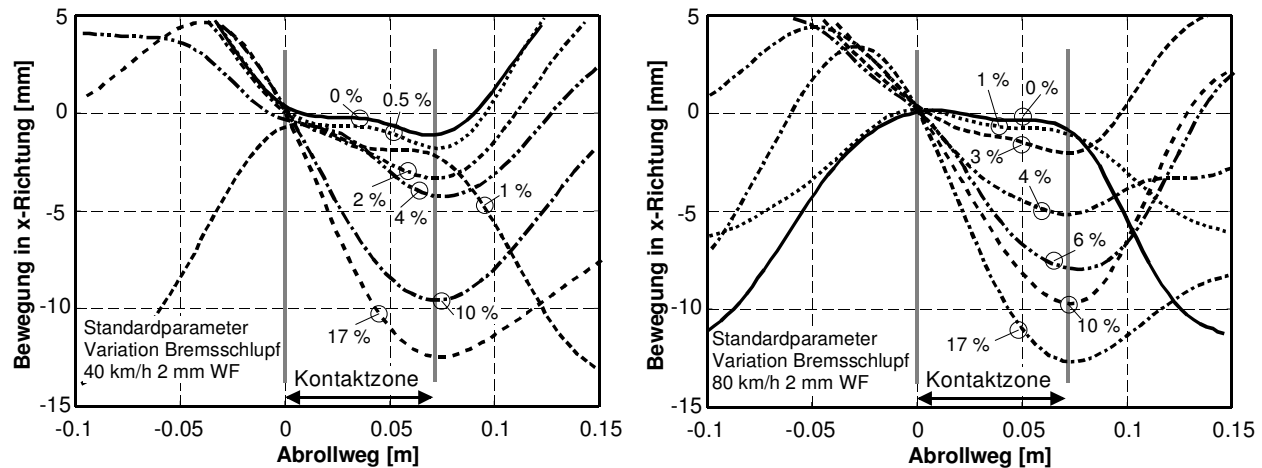


**Bild 48:** Fahrbahnsensorsignale in x-Richtung, Variation Antriebsschlupf, IPS, 40 km/h, 4 mm Wasserfilm

lauf für 6 % Schlupf, der ähnlich wie bei den quasistationären Versuchen auf LINUS zu Beginn der Kontaktzone Gleitbewegungen zeigt, um in der zweiten Latschhälfte auf den Verformungsverlauf

des freierollenden Rades zurückzukehren. Demgegenüber führen 10 % Antriebsschlupf zu Gleitbewegungen, die sich gleichmäßig über den gesamten Kontaktbereich Reifen-Straße ausdehnen.

Ein Vergleich von zwei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen und deren Auswirkungen auf das Summensignal von Deformations- und Gleitschlupf, das Fahrbahnsensorsignal, zeigt **Bild 49**.

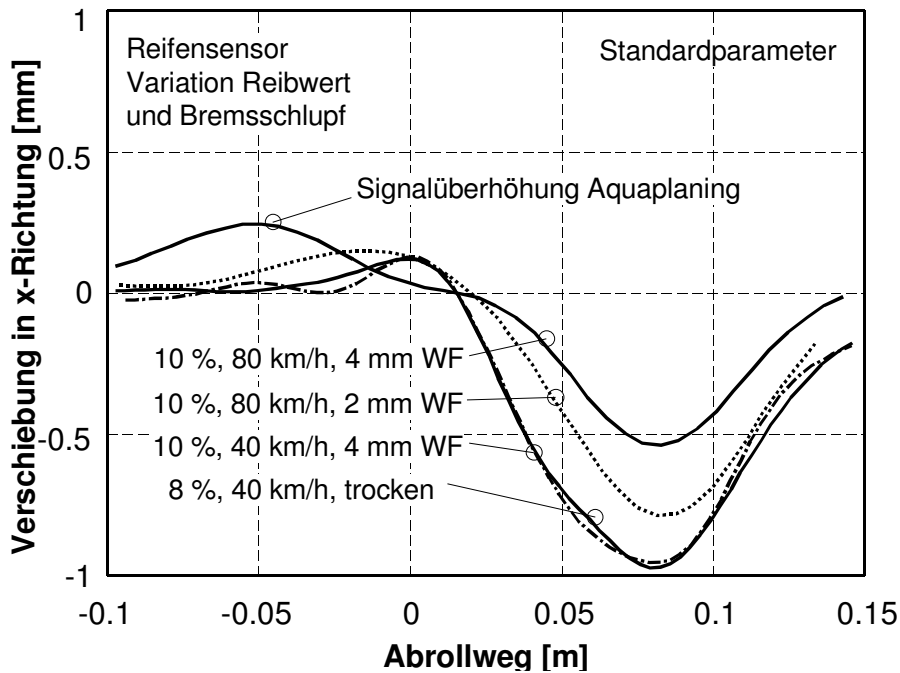


**Bild 49:** Fahrbahnsensorsignale in x-Richtung, Variation Bremsschlupf, IPS, 40 km/h, 2 mm Wasserfilm (links), 80 km/h, 2 mm Wasserfilm (rechts)

In der linken Bildhälfte sind die Fahrbahnsensorsignale bei Variation des Bremsschlupfs, einer Geschwindigkeit von 40 km/h und einem Wasserfilm von 2 mm Höhe aufgetragen. Rechts ist die Geschwindigkeit auf 80 km/h erhöht. Damit verändert sich der maximale Reibwert zwischen Reifen und Straße von  $\mu=0.9$  auf  $\mu=0.7$ . Der Vergleich der beiden Kurvenscharen läßt keine deutlichen Auswirkungen der Geschwindigkeit bzw. des Reibwerts erkennen. Dies überrascht nicht, da die Summe aus Deformations- und Gleitschlupf nur vom globalen Gesamtschlupf abhängig ist. Es können also nur Verschiebungen innerhalb dieser beiden Schlupfanteile auftreten. Diese müßten dann als charakteristische Signaländerungen des Fahrbahnsensors erkennbar sein, die Gesamtamplitude jedoch nicht beeinflussen. Gradientenverschiebungen innerhalb der Fahrbahnsensorsignale sind zwar erkennbar, die Interpretation solcher Steigungsänderungen soll jedoch nicht erfolgen, da die dafür nötige Auflösung innerhalb der Signale nicht immer gegeben ist.

Vielmehr läßt der Vergleich der unter den verschiedenen Reibwertbedingungen aufgenommenen Reifensensorsignale eine Aussage über das Verhältnis von Deformations- und Gleitschlupf erwarten. Die Reifensensorsignale, die nur den Deformationsanteil des Gesamtschlupfs widerspiegeln können, sind prinzipbedingt deutlich höher aufgelöst, da der Meßbereich sehr gut an die zu erwartenden Meßsignale angepaßt ist.

Die Reifensensorsignale in Längsrichtung für die vier untersuchten Fahrbahnzustände beim jeweils größten Verformungszustand sind in **Bild 50** einander gegenübergestellt. Der maximale Verformungszustand der Profilelemente stellt sich kurz vor Erreichen des Reibwertmaximums der  $\mu$ -Schlupf-Kurve ein und bleibt dann für hohe Schlupfwerte nahezu konstant. Dieser Zustand eignet sich für einen Vergleich der Anteile von Deformations- und Gleitschlupf daher besonders gut. Den Meßkurven kann entnommen



**Bild 50:** Reifensensorsignale in x-Richtung, Antriebsschlupf bei Reibwertmaximum, IPS, verschiedene Fahrbahnzustände

werden, daß für den trockenen und den Fahrbahnzustand 40 km/h, 4 mm Wasserfilmhöhe annähernd gleiche Profilelementdeformationen erreicht werden können. Der dazwischen liegende Wert für 40 km/h und 2 mm Wasserfilm ist der Übersichtlichkeit wegen nicht dargestellt. Bei 80 km/h und 2 mm Wasserfilmhöhe, also bei reduziertem Reibwert, sind die maximal erreichbaren Profilelementdeformationen bereits deutlich reduziert. Eine Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h auf 4 mm Wasserfilm führt neben dem Absinken des Reibwerts auf ca.  $\mu=0.5$  zu einer noch einmal verringerten maximalen elastischen Deformation des Laufstreifens. Im gleichen Maße sinkt der Deformationsanteil am Gesamtschlupf des Reifens. Wenn bestimmte Werte des Reibwertniveaus unterschritten werden, zeigen sich also deutliche Reduktionen des maximal auftretenden Deformationschlupfs. Die Auswirkungen dieses Verhaltens auf die Reibwert-Schlupf-Kurve werden im folgenden noch einmal vertieft aufgegriffen.

Daneben können bei hohen Geschwindigkeiten und Wasserfilmhöhen bereits Aquaplaningeffekte beobachtet werden, die sich in der Ausbildung eines Maximums der Profilelementverformung vor dem Eintritt des Reifensensors in die Kontaktzone zeigen. Diese Effekte wurden in identischer Weise von Stöcker [114] beobachtet. Sie führten zur Entwicklung eines Kennwerts zur Beschreibung der Aquaplaningefahr und spielen im Zusammenhang der Reibwernerkenntnis mit dem Darmstädter Reifensensor eine besondere Rolle (vgl. Kapitel 4). In der vorliegenden Arbeit konnte

den Meßkurven kann entnommen werden, daß für den trockenen und den Fahrbahnzustand 40 km/h, 4 mm Wasserfilmhöhe annähernd gleiche Profilelementdeformationen erreicht werden können. Der dazwischen liegende Wert für 40 km/h und 2 mm Wasserfilm ist der Übersichtlichkeit wegen nicht dargestellt. Bei 80 km/h und 2 mm Wasserfilmhöhe, also bei reduziertem Reibwert, sind die maximal erreichbaren Profilelementdeformationen bereits deutlich reduziert. Eine Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h auf 4 mm Wasserfilm führt neben dem Absinken des Reibwerts auf ca.  $\mu=0.5$  zu einer noch einmal verringerten maximalen elastischen Deformation des Laufstreifens. Im gleichen Maße sinkt der Deformationsanteil am Gesamtschlupf des Reifens. Wenn bestimmte Werte des Reibwertniveaus unterschritten werden, zeigen sich also deutliche Reduktionen des maximal auftretenden Deformationschlupfs. Die Auswirkungen dieses Verhaltens auf die Reibwert-Schlupf-Kurve werden im folgenden noch einmal vertieft aufgegriffen.

erstmalig nachgewiesen werden, daß die für das Aquaplaningrisiko charakteristischen Signalformen, die auf das Eindringen des Wasserkeils in die Aufstandsfläche zurückzuführen sind, auch bei hohen Reibwertbeanspruchungen in Längsrichtung detektiert werden können. Damit gewinnt das Verfahren der Aquaplaningerkennung mit Hilfe von Reifensensoren deutlich an Einsatzpotential für das fahrende Fahrzeug.

Aus den Untersuchungen der Profilelementverformungen und der Gleitvorgänge in der Aufstandsfläche des Versuchsreifens bei Variation von Brems- und Antriebsschlupf im Innentrommelprüfstand können eine Reihe von Schlußfolgerungen für die lokale Kraftübertragung am Pkw- Reifen gezogen werden. Besonders aufschlußreich ist hierbei die Betrachtung definiert unterschiedlicher Reibwertzustände der Fahrbahn.

- Der Betrag der mit dem Fahrbahnsensor und mit dem Reifensensor gemessenen Deformations- und Gleitbewegungen entspricht dem globalen Gesamtschlupf des Reifens.
- Deformations- und Gleitanteile des Gesamtschlupfs sind mit der verwendeten Sensorik trennbar.
- Die mittlere Geschwindigkeit der Bewegungen kann aus dem Betrag der Meßsignale bezogen auf die Latschlänge und die Fahrgeschwindigkeit berechnet werden.
- Das Deformationsverhalten des Reifens, das primär konstruktionsspezifisch ist und von Reifenbauart, Gummimischung, Profilhöhe, Temperatur, usw. abhängig ist, wird daneben auch vom Reibwertniveau zwischen Reifen und Straße beeinflusst.
- Ab einem bestimmten Reibwertniveau kommt es bei weiterer Erhöhung der Reibkräfte zu keiner nennenswerten Steigerung der maximalen elastischen Profildeformation mehr.
- Antriebsschlupf führt im Vergleich zu Bremsschlupf zu ähnlichen Gesamtbeträgen für Deformations- und Gleitschlupf, aber zur Ausprägung unterschiedlicher Charakteristika insbesondere des Deformationsanteils, die auf die Kinematik kraftbeanspruchter Profilelemente zurückzuführen sind.

Legt man die in Kapitel 2.5 beschriebenen Kalibrierungen zu Grunde, kann aus der Profilelementdeformation, die mit dem Reifensensor gemessen wird, die Gesamtdeformation des Laufstreifens, der Deformationsschlupfweg, extrapoliert werden. Dazu muß aus den Signalen des Reifensensors der Anteil bestimmt werden, der den Deformationsbewegungen entspricht, die durch die wirkenden Kräfte verursacht werden.

Dies ist vor allem eine Definitionsfrage, da in der Mittelrippe des Reifens im Gegensatz zu den Deformationen in Querrichtung starke abplattungsbedingte Grundverformungen in Längsrichtung vorhanden sind. Von dort aus nehmen in Richtung der Reifenflanken auch die abplattungsbedingten Verformungen in Querrichtung zu. Dabei spielen neben den Betriebsparametern auch die Reifenbreite und andere konstruktive Eigenschaften des Reifens wie z.B. die Gürtelkontur eine große Rolle [115].

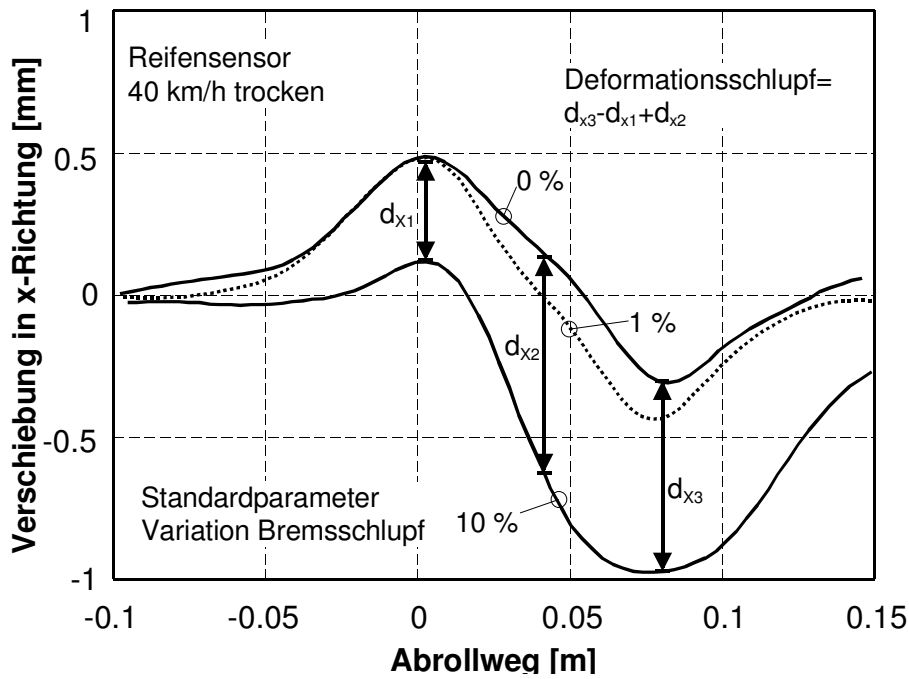
Der Deformationsschlupf stellt den Unterschied zu den Signalen im freirollenden Zustand dar. In dieser Arbeit wird der Ansatz verfolgt, die Parallelverschiebung des normalerweise etwa sinusförmigen Signalverlaufs des Reifensensors in x-Richtung zusammen mit der Erhöhung der Gesamamplitude des Verlaufs vom Maximum bis zum Minimum gemeinsam als Deformationsschlupf zu definieren. Damit wird eine Analogie zu den von Roth [101] vorgestellten Kennwerten für die Umfangskraft erzielt. Diese lauten für die Umfangskraft:

$$K_{fx} = C_{Kfx} \cdot \sum_{i=1}^N PEV_{x,i} \rightarrow F_x \quad (16)$$

d.h. die Fläche, die zwischen Profilelementverformungssignal und Abszisse aufgespannt wird, bzw. für die Reibwertausnutzung:

$$K_{FM} = C_{KFM} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N PEV_{x,i}}{PEV_{x,\max} + PEV_{x,\min}} \quad (17)$$

als dem Verhältnis der Fläche zu der Summe der maximalen und der minimalen Amplitude des Sensorsignals. Besonders die Flächensumme des Verformungssignals bildet ein Maß für die Änderung der Profilelementverformung in Folge einer Bremskraft. Diese Änderung ähnelt der oben genannten Definition für den Deformationsschlupf, berechnet sich aber dimensionslos und ist so als Äquivalent für diesen nicht besonders gut geeignet. Die Berechnung der Verschiebung und der Verlängerung des Signals in x-Richtung liefert eine Deformation in Millimetern und kann sehr gut mit dem Begriff Deformationsschlupf umschrieben werden. Dennoch handelt es sich dabei um Deformationsschlupf nach einer bestimmten Definition.

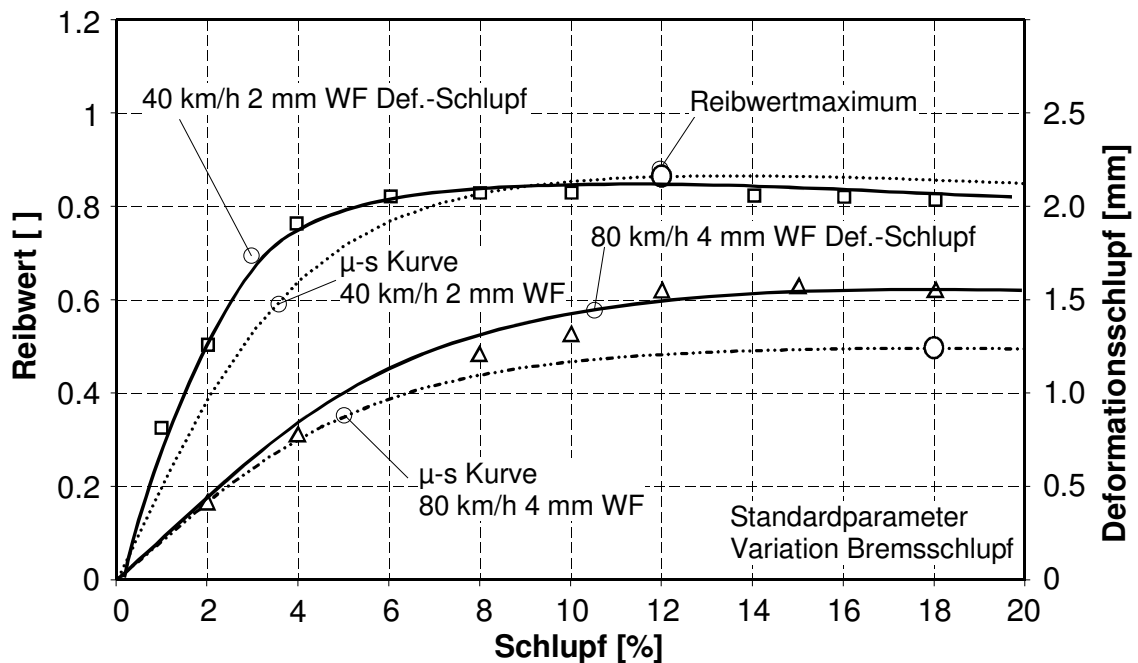


Es entsteht ein Zahlenwert mit einer physikalischen Einheit, der das Maß der Laufstreifen-deformation im Vergleich zum freirollenden Zustand beschreibt. Andere Definitionen sind genauso möglich.

**Bild 51** zeigt die Berechnung des Deformationsschlupfes mit dem in dieser Arbeit angewendeten Verfahren.

**Bild 51:** Reifensensorsignale in x-Richtung, Variation Antriebsschlupf, Berechnung des Deformationsschlupfes, IPS,

Berechnet man den Deformationsschlupf auf die oben beschriebene Art und trägt die Ergebnisse über dem Gesamtschlupf auf, so erhält man die Darstellung in **Bild 52**.



**Bild 52:** Deformationsschlupf im Vergleich mit Reibwert-Schlupf-Kurven, Prüfstand IPS

Für zwei unterschiedliche Reibwertniveaus ist hier der Deformationsschlupf zusammen mit dem jeweils erreichten Reibwert über dem Schlupf aufgetragen. Die Reibwert-Schlupf-Kurven sind auf

den Bereich bis 20 % Schlupf beschränkt, darüber hinaus ergaben sich keine Steigerungen der Profilelementverformungen. Außerdem würden höhere Schlupfwerte zu einer Überschreitung des Meßbereiches des Fahrbahnsensors führen, der auf max. 20 mm begrenzt ist.

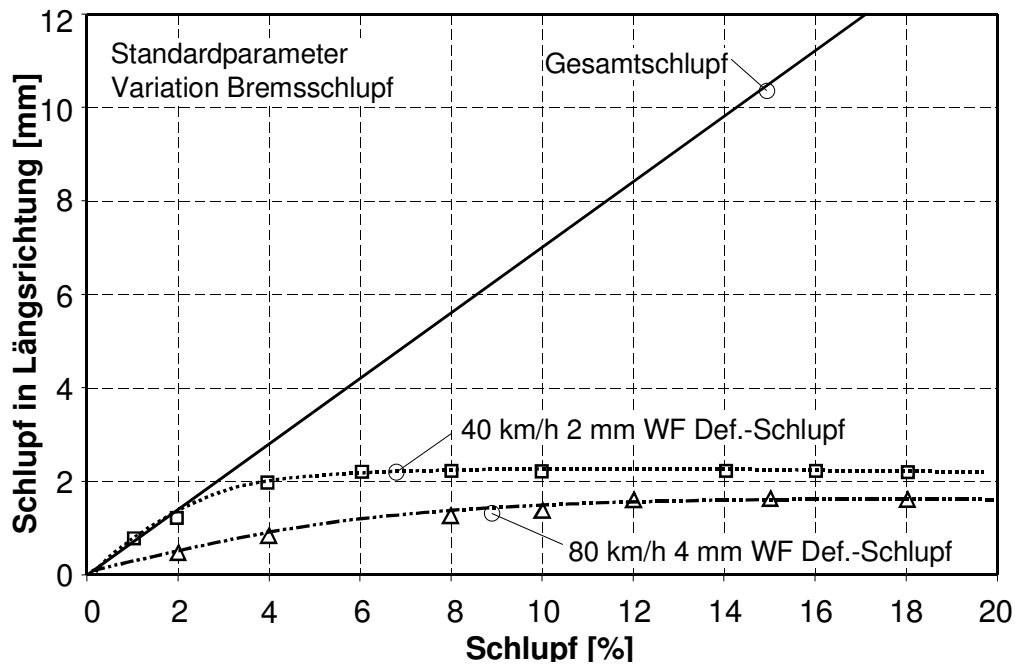
Man erkennt für die beiden ausgewählten Reibwertbedingungen durchaus unterschiedliche Verläufe des Deformationsschlupfwegs über dem Gesamtschlupf. 40 km/h Fahrgeschwindigkeit auf 2 mm Wasserfilmhöhe repräsentieren eine für die untersuchte Fahrbahn relativ gute Griffigkeit, die nur leicht gegenüber dem trockenen Zustand vermindert ist. Der Deformationsweg der Profilelemente zeigt einen steilen Anstieg bereits bei kleinem Reifenschlupf. Ab etwa 3 % Schlupf verläuft der Anstieg der elastischen Laufstreifendeformation deutlich flacher. Dies spricht für verstärktes Auftreten von Gleitschlupf im Reifenlatsch.

Die höchsten Profilelementverformungen werden bei etwa 8-10 % Schlupf in der Nähe des Reibwertmaximums erzielt. Im Vergleich zu diesem Zusammenhang verläuft der Deformationsweg bei stark reduziertem Reibwert (80 km/h und 4 mm Wasserfilmhöhe) von Beginn an deutlich flacher. Bereits bei niedrigen Schlupfwerten sind große Abweichungen gegenüber dem griffigeren Fahrbahnzustand erkennbar. Auch die Reibwert-Schlupf-Kurve verfügt über eine signifikant niedrigere Anfangssteigung unter diesen Bedingungen. Die maximale elastische Deformation tritt erst bei ca. 18 % Schlupf auf und erreicht nicht den Betrag der Verformungen bei höheren Reibwerten.

Der Vergleich der beiden Deformationsverläufe zeigt aber auch, daß bei gleichen Reibwerten ähnliche Deformationswerte der Profilelemente, unabhängig vom Reibwertpotential der Fahrbahn auftreten. Der Deformationsschlupf ist unter den hier vorliegenden Bedingungen in etwa proportional zur übertragenen Bremskraft. Die Reduzierung des Reibwertpotentials führt zu einer Reduzierung der maximal übertragbaren Kräfte und damit auch zu einer Verkleinerung der auftretenden Profilelementdeformationen.

Der vom Prüfstand ausgegebene Schlupfwert für den jeweiligen Betriebszustand des Reifens kann durch Bezug auf die aktuelle Latschlänge des Reifens in einen Gesamtgleitweg der Profilelemente, der zu erwarten ist umgerechnet werden. Man kann diesen Wert wiederum mit den Messungen der Gleitbewegungen vergleichen, die mit dem Fahrbahnsensor möglich sind.

Wird der aus dem Reifensensorsignal berechnete Deformationsschlupf im Vergleich mit dem vom Prüfstand ausgegebenen Gesamtschlupf, umgerechnet in Schlupfwege, dargestellt, ergibt sich **Bild 53**.



**Bild 53:** Deformationsschlupf im Vergleich mit Gesamtschlupf, Prüfstand IPS

Es ist erkennbar, daß im Bereich kleiner Schlupfwerte der Kurve 40 km/h 2mm WF der Deformationsanteil überwiegt, und dort für hohe Reibwerte nahezu 100 % der Gesamtdeformation stellt. Niedrigere Reibwerte führen zu einem bereits von Beginn an reduzierten Deformationsanteil am Gesamtschlupf. Gleichzeitig kann dieser Darstellung in Verbindung mit **Bild 52** entnommen werden, daß für das Erreichen des Reibwertmaximums bzw. entsprechender maximaler Profilelementdeformationen reiner Deformationsschlupf nicht ausreicht. Im Bereich des Maximums wird ein nennenswerter Gleitschlupfanteil erreicht. Die Höhe dieses Anteils bzw. das Verhältnis zum Deformationsschlupf zeigt wiederum eine Abhängigkeit zum Reibwertpotential der Fahrbahn. Aus den hier diskutierten Messungen können Hypothesen und Begründungen werden, die in Kapitel 3.3 zusammenfassend erläutert sind.

### 3.2.2 Schräglaufwinkel

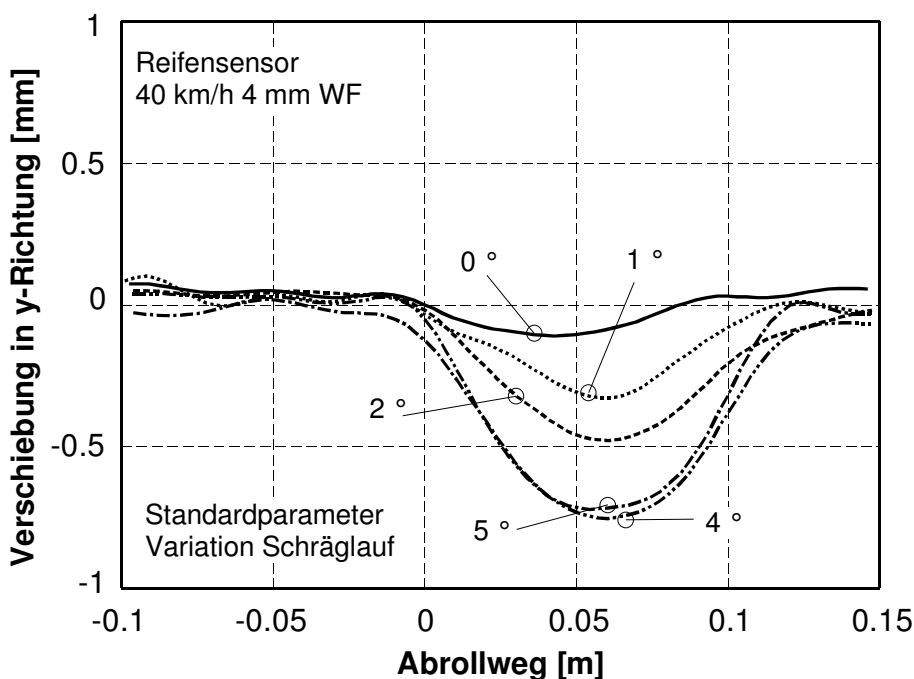
Neben der Kraftübertragung in Längsrichtung spielt auch die Kraftübertragung in Querrichtung für die Fahrdynamik von Pkw eine wichtige Rolle. Der Reifen reagiert auf eine Seitenkraft mit einem Schräglaufwinkel bzw. umgekehrt. Der Schräglaufwinkel des Reifens ist der Winkel zwischen der tatsächlichen Bewegungsrichtung und der geometrischen Mittellinie des Reifens in der Draufsicht. Auf Prüfständen wie dem IPS werden Schräglaufwinkel in der Regel über Lenkwinkel am Rad erzeugt. Dabei entsteht ein Zusammenhang zwischen Schräglaufwinkel und Seitenkraft, der z.B. wie in **Bild 42** dargestellt werden kann.



Der Schräglaufwinkel führt wie der Reifenschlupf zu einer Relativgeschwindigkeit zwischen Profilelementen und Fahrbahnoberfläche. In diesem Fall bewegen sich die Profilelemente quer zur Fahrtrichtung, wobei die Geschwindigkeit und auch die Richtung der Bewegung von der Position des Profilelementes in Querrichtung des Reifenlatsches abhängt. In dieser Arbeit werden in Querrichtung nur die Ergebnisse der Meßstelle in der Latschmitte, also die Bewegungen der Profilelemente, die in der durchlaufenden Mittelrippe des Reifens angeordnet sind, diskutiert.

So zeigt die Schräglaufwinkel-Seitenkraftbeiwert-Kurve deutliche Analogien zur Reibwert-Schlupf-Kurve [119], die im folgenden angesprochen werden.

In **Bild 54** sind die Reifensensorsignale in y-Richtung, d.h. die Bewegungen des Magneten im Profilelement quer zur Fahrtrichtung, bei einer Variation des Schräglaufwinkels aufgetragen.

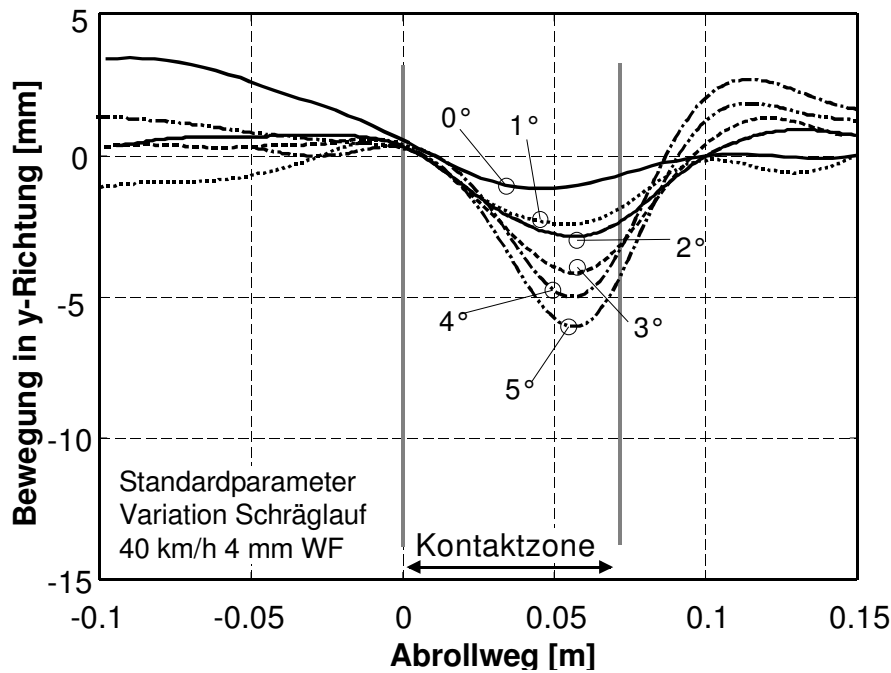


Größere Schräglaufwinkel führen zu ansteigenden Seitenkräften und im gleichen Maße zu ansteigenden Profilelementverformungen. Ähnlich wie in Längsrichtung kann auch hier ein Maximum der elastischen Deformation beobachtet werden,

**Bild 54:** Reifensensorsignale in y-Richtung, Variation Schräglaufwinkel, IPS, 40 km/h, 4 mm Wasserfilm

das bei weiterer Vergrößerung des Schräglaufs nicht überschritten wird. Dieses Deformationsmaximum korreliert mit dem Reibwertmaximum.

Von der Fahrbahn aus betrachtet ergibt sich **Bild 55**.



**Bild 55:** Fahrbahnsensorsignale in y-Richtung, Variation Schräglaufwinkel, IPS, 40 km/h, 4 mm Wasserfilm

Die Deformations- und Gleitbewegungen in Querrichtung steigen nahezu linear mit dem Schräglaufwinkel an. Im Reibwertmaximum (vgl. **Bild 42**) werden ca. 6 mm Gesamtverschiebung erreicht. Dieser Wert entspricht in etwa der Verschiebung in Längsrichtung im Reibwertmaximum der  $\mu$ -s Kurve (ca. 5 mm). Die Messung der Querver-

schiebung erfolgte allerdings in der Latschmitte, in der abplattungsbedingte Schubspannungen in Querrichtung keine Rolle spielen.

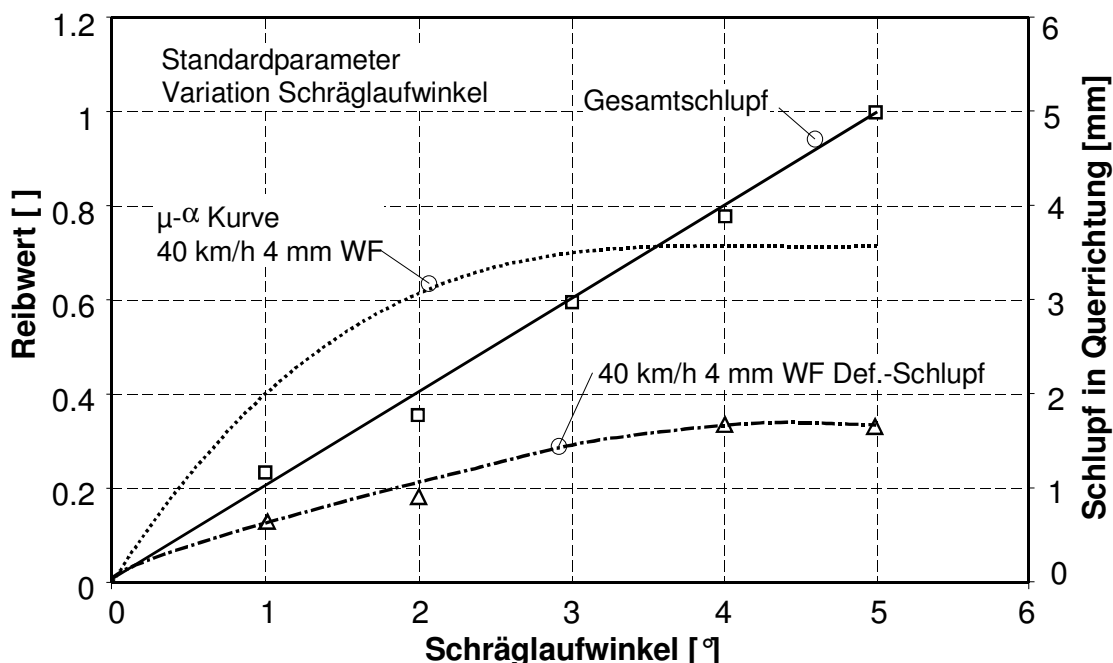
Ebenso wie bei der Betrachtung des Längsschlupfs kann auch für den Querschlupf der Deformations- und der Gleitanteil berechnet werden. Im Vergleich zum Reifensensor x-Signal gestaltet sich die Berechnung einfacher. Die Abweichung der Reifensensorsignalverläufe von der Kurve für den freirollenden Zustand kann direkt als Unterschied in der maximalen Amplitude abgelesen werden. Damit ergibt sich auch für diesen Wert eine Ähnlichkeit zu dem von Roth [101] vorgestellten Kennwert für die Querkraft:

$$K_{fy} = C_{kfy} \cdot \sum_{i=1}^N PEV_{y,i} \rightarrow F_y \tag{18}$$

der das Integral der Fläche zwischen Abszisse und Sensorsignal berechnet. Dieses Integral verhält sich, bedingt durch den charakteristischen Verlauf des y-Signals, proportional zu dessen maximaler Amplitude.

Der in Querrichtung zurückgelegte Gleitweg kann aus dem Fahrbahnsensorsignal abzüglich dem extrapolierten Deformationschlupf des Reifensensorsignals berechnet werden.

Aus diesen Berechnungen kann **Bild 56** entwickelt werden.



**Bild 56:** Deformations- und Gesamtschlupf im Vergleich mit Reibwert-Schräglaufwinkel-Kurven

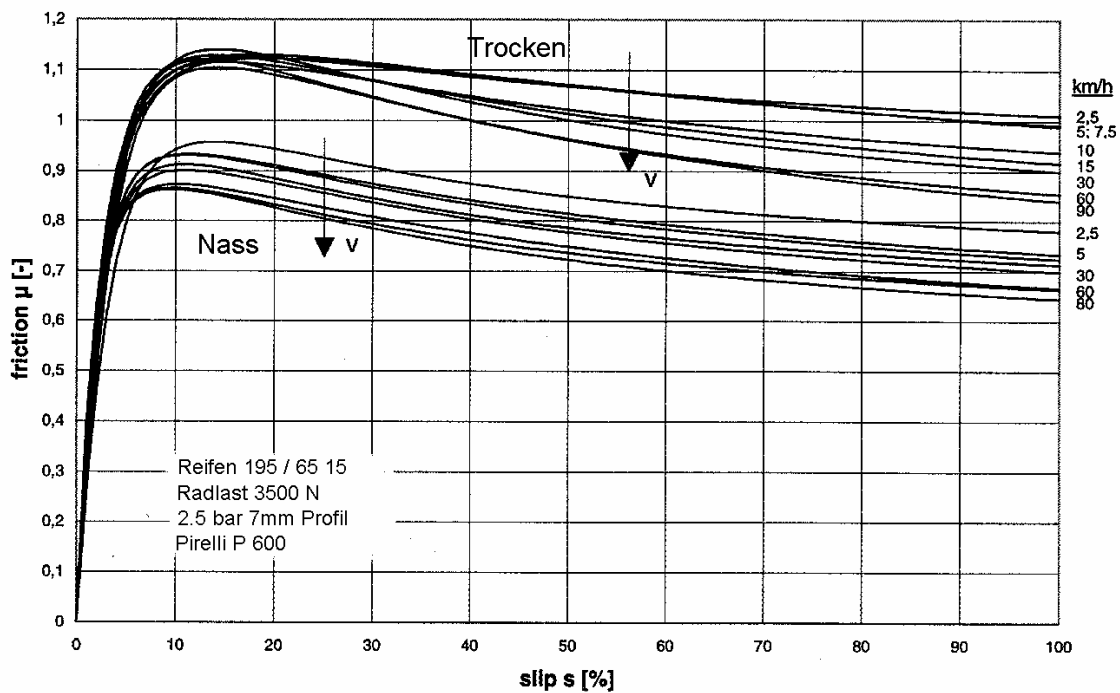
Der mit den Fahrbahnsensor direkt gemessene Gesamtschlupf steigt linear mit dem Schräglaufwinkel auf einen Wert von ca. 5 mm bei einem Schräglaufwinkel von 5° an. Die  $\mu$ - $\alpha$ -Kurve hat bezogen auf den Gesamtquerschlupf einen vergleichbaren Anstieg wie die  $\mu$ -s-Kurve bezogen auf den Gesamtlängsschlupf. Auch in Querrichtung verhält sich der Deformationsanteil zunächst linear ansteigend, um danach in ein degressives Verhalten bei weiterem Anstieg des Gesamtschlupfs überzugehen. Im Bereich des Reibwertmaximums erreicht auch der Deformationsschlupf seinen höchsten Betrag, um danach leicht abzufallen. Insgesamt können die Messungen die systematische Analogie zwischen Schräglaufwinkel und Längsschlupf bestätigen. Die weitere Betrachtung lokaler Effekte zwischen Reifen und Fahrbahn behandelt daher vertieft die Reibwert- Schlupf Kurve unter Bremskräften.

### 3.3 Erkenntnisse zur Reibwert- Schlupf Kurve

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurden Meßergebnisse lokaler Effekte der Reibung vorgestellt, aus denen eine Reihe von prinzipiellen Erkenntnissen zur Wechselwirkung Reifen-Fahrbahn abgeleitet werden können. Diese Erkenntnisse werden im folgenden am Beispiel der charakteristischen Kenngrößen der Reibwert-Schlupf-Kurve (vgl. Kapitel 1.2.2, **Bild 9**) diskutiert. Schwerpunkte sind dabei zum einen der Zusammenhang zwischen globalem Schlupf am Reifen

und der tatsächlichen Gleitgeschwindigkeit im Latsch. Zum anderen wird die Beziehung zwischen der Anfangssteigung und dem Maximum der  $\mu$ -s-Kurve behandelt.

Die Reibwert- Schlupf Kurve spiegelt den Zusammenhang zwischen der Gleitgeschwindigkeit und den Reibkräften von Reifengummi und Fahrbahnoberfläche wider. Aus der Definition des Reifenschlupfs resultiert, daß mit steigender Fahrgeschwindigkeit die Relativgeschwindigkeit zwischen Reifengummi und Fahrbahnoberfläche bei konstantem Schlupf steigen muß. Dies kann auch experimentell bestätigt werden, da die Messungen der lokalen Gleitbewegungen unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit für konstanten Schlupf konstante Gleitwege liefern. Gleichbleibende Gleitwege bei kürzerer Kontaktzeit Reifen-Fahrbahn bedingen höhere Gleitgeschwindigkeiten. Ein Beispiel für den Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die Reibwert-Schlupf-Kurve zeigt **Bild 57**.



**Bild 57:** Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf die Reibwert-Schlupf-Kurve nach Bachmann [4]

Nach den grundlegenden Erkenntnissen der Gummireibung (vgl. Kapitel 1.2.1, **Bild 3**) ist ein Abfall der Reibkoeffizienten mit steigender Gleitgeschwindigkeit zu erwarten. Für das blockierte Rad, d.h. 100 % Bremsschlupf, trifft diese Aussage zu. In diesem Betriebspunkt kann von einer homogenen Verteilung der Gleitgeschwindigkeit im Reifenlatsch ausgegangen werden. Andere Betriebspunkte unterscheiden sich dadurch, daß die Verteilung der Gleitgeschwindigkeit in der Kontaktzone nicht homogen sein muß. Die Ausbildung von Haftgebieten und Gleitgebieten mit stark unterschiedlicher Relativgeschwindigkeit Gummi-Fahrbahn führt zu komplexeren Zusammenhän-

gen. So kann der von Kummer und Meyer vorgestellte Ansatz der vereinheitlichten Reibungstheorie [79] für die Betrachtung der Kontaktfläche eines rotierenden Reifens nicht vollständig zielführend sein.

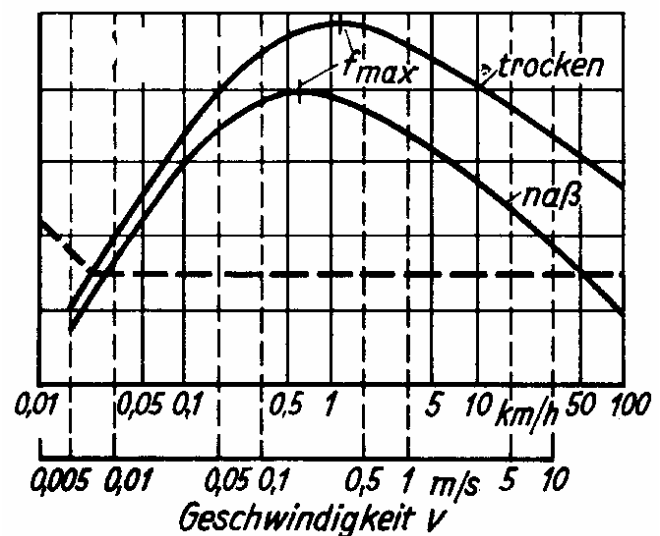
Die dort vorgestellte Annahme einer idealen Gleitgeschwindigkeit, bei der Adhäsions- und Hysteresemechanismen zu einer optimalen Gesamtreibung angeregt werden (vgl. **Bild 3**) setzt voraus, daß es innerhalb der Kontaktzone wesentliche Bereiche gibt, die genau diese Gleitgeschwindigkeit besitzen. Die Betrachtung der lokalen Gleitvorgänge zeigt aber, daß Bereiche stark unterschiedlicher Gleitgeschwindigkeit existieren (vgl. Kapitel 3.1). Wäre das Maximum der Reibwert-Schlupf-Kurve das Resultat einer über den gesamten Reifenlatsch konstanten, idealen Gleitgeschwindigkeit, die beide Reibungskomponenten gleichzeitig anregt, dann müßte sich die Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit signifikant anders ergeben als z. B. in **Bild 57** dargestellt. Die Gleitgeschwindigkeit, die sich aus der Kombination aus Fahrgeschwindigkeit und Schlupf ergibt, würde in gleicher Höhe auch bei anderen Fahrgeschwindigkeiten, aber veränderten Schlupfwerten auftreten. So würde eine Verdoppelung der Fahrgeschwindigkeit zur gleichen Gleitgeschwindigkeit bei etwa halbiertem Schlupf führen. Dementsprechend wäre ein Abfall der maximalen Reibkoeffizienten bei steigender Fahrgeschwindigkeit nicht zu erklären.

Weiterhin müßte sich das Reibwertmaximum bei Schlupfwerten ergeben, die sich umgekehrt proportional zur Fahrgeschwindigkeit verhalten. In der Realität kann aber beobachtet werden, daß die maximalen Reibwerte mit steigender Fahrgeschwindigkeit durchaus abfallen. Dies gilt sowohl für den trockenen Fahrbahnzustand als auch für nasse Oberflächen, bei denen zudem durch hydrodynamische Effekte eine weitere Reduzierung der Reibung eintreten kann (vgl. Kapitel 1.2.2, **Bild 11**). Gleichzeitig ist zwar eine Verlagerung der Maximalreibwerte hin zu niedrigeren Schlupfwerten zu beobachten, die aber bei weitem nicht den Erwartungen aus der oben beschriebenen Theorie entsprechen.

Tatsächlich kann die Ausprägung des Maximums der Reibwert-Schlupf-Kurve und dessen Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit auf andere Weise erklärt werden. Prinzipiell kann von der Existenz zweier unterschiedlicher Mechanismen zur Erzeugung der Gummireibung ausgegangen werden. Diese unterscheiden sich vor allem durch eine große Differenz in der Gleitgeschwindigkeit, die zu ihrer Anregung erforderlich ist. Dabei ist es unerheblich, ob die von Kummer definierten Adhäsionskräfte auf molekularen Bindungen beruhen, oder wie von Persson [93] formuliert, auf Hysteresevorgängen in mikroskopischer Größenordnung basieren. Ferner ist zunächst nicht von Relevanz, ob für das Auftreten von Reibungskräften zwischen Gummi und einer Oberfläche Gleit-

geschwindigkeiten vorhanden sein müssen, oder ob tatsächlich eine Übertragung von Reibkräften ohne gleitende Relativbewegungen möglich ist. Entscheidend ist vielmehr die Existenz zweier unabhängiger Reibungsmechanismen mit Anregungsgeschwindigkeiten, die um Größenordnungen auseinanderliegen. Aus der Tatsache, daß innerhalb des Reifenlatschs Bereiche mit extrem niedriger Gleitgeschwindigkeit bzw. haftendem Gummi und Bereiche mit nennenswerten Gleitbewegungen relativ zur Fahrbahnoberfläche vorliegen (Nachweis siehe Kapitel 3.1.4, **Bild 40**) kann geschlossen werden, daß in den Haftbereichen von der Gleitgeschwindigkeit unabhängige Reibkräfte und in den Gleitbereichen überwiegend von der Gleitgeschwindigkeit abhängige Reibkräfte vorliegen.

Im folgenden wird zur Vereinheitlichung der Ansatz von Persson [93] verfolgt, der die gesamte Reibungsfunktion des Gummis durch das Wirken von Hysteresekräften erklärt, die im Bereich sehr kleiner Geschwindigkeiten  $v_{\text{gleit}} < 0.1 \text{ km/h}$  durch adhäsionsunterstützte Hysteresereibung ergänzt werden. Damit wird die von Kummer und Meyer vorgestellte Gesamtreibungsfunktion von Gummi in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit in **Bild 58** der Wirkung von Hysteresekräften zugeordnet, die eine entsprechende Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit haben. Die Adhäsionskomponente wird demgegenüber nur bei sehr kleinen Gleitgeschwindigkeiten wirksam.



Dies erklärt allerdings noch nicht die Ursache für das gleichzeitige Auftreten beider Reibungskomponenten, dazu später. Aus der

**Bild 58:** Vereinheitlichte Gummireibungstheorie nach Meyer und Kummer [84],

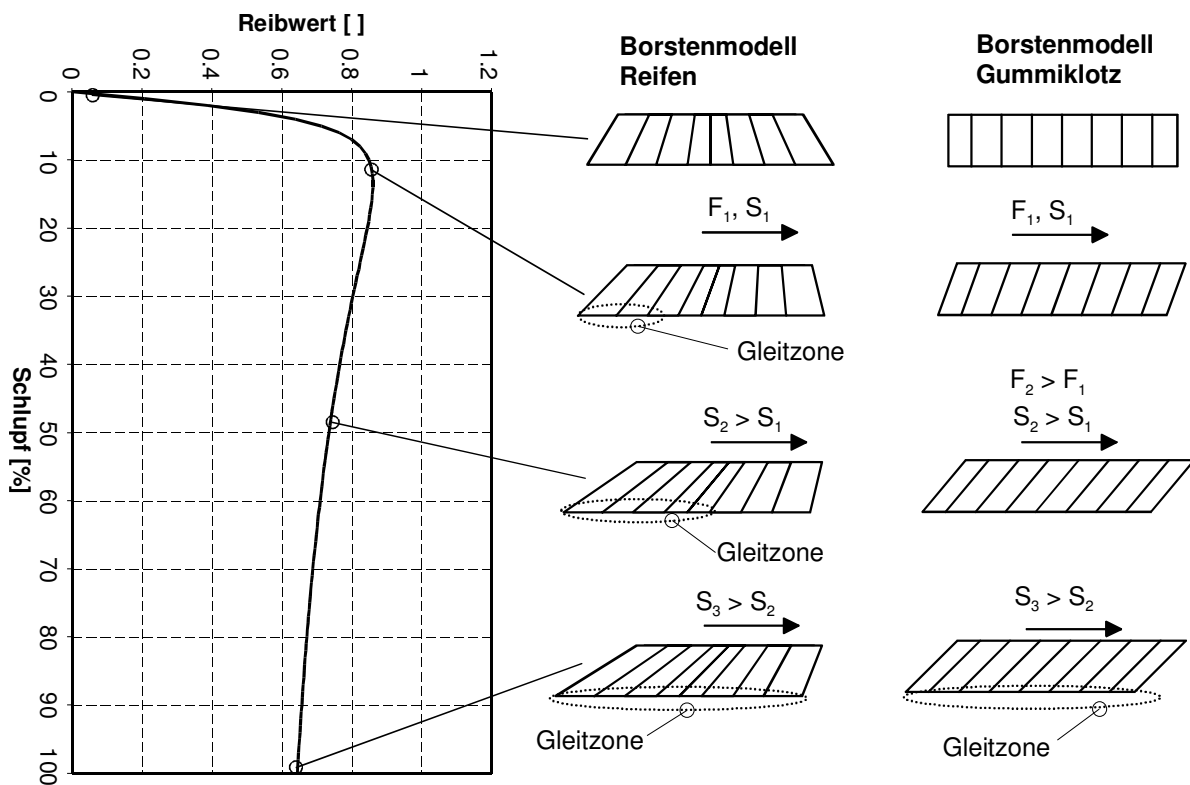
bloßen Anschauung bzw. aus geeigneten Experimenten (vgl. **Bild 34**) ist ersichtlich, daß die Adhäsionsreibung größere Reibkräfte liefert als der Mechanismus der Hysterese (siehe auch **Bild 3**). Das Auftreten von Gleitbewegungen setzt immer ein gewisses Maß an Reibkräften voraus, das vorhanden sein muß. Bis zu Auftreten von Gleitbewegungen werden aber bereits Reibkräfte ohne bzw. mit Extrem geringen Gleitbewegungen übertragen. Der in diesem Bereich wirkende Reibmechanismus, in dieser Arbeit als Adhäsionsreibung interpretiert, hat das Potential höhere Reibwerte zu liefern, als der Mechanismus der Hysterese, der mit dem Auftreten von Gleitbewegungen verbunden ist, weil nach dem Einsetzen von Gleitbewegungen die übertragbaren Reibkräfte absinken.

Weiterhin kann formuliert werden, daß die sehr kleine Gleitgeschwindigkeit in den haftenden Bereichen des Reifenlatschs von der Fahrgeschwindigkeit weitgehend unabhängig zu sein scheint. (Eine nicht vorhandene Relativbewegung kann auch keine von der Fahrgeschwindigkeit abhängige Relativgeschwindigkeit verursachen) Dementsprechend sind maßgebliche Anteile der Gesamtreibkraft am Reifen von der Fahrgeschwindigkeit weitgehend unabhängig. Nur der Anteil, der durch die Gleitbewegungen zwischen Gummi und Fahrbahn erzeugt wird, kann über die von Kummer aufgestellten Beziehungen von der Fahrgeschwindigkeit beeinflußt werden, da bei konstantem Schlupf und damit konstanten Relativverschiebungen zwischen Gummi und Fahrbahn die Geschwindigkeit dieser Bewegungen mit der Fahrgeschwindigkeit zunehmen muß.

Auf trockener Fahrbahn können sich die Anteile der Reibkraft, die auf Adhäsionseffekten beruhen, optimal ausbilden, sofern die Fahrbahntextur dafür die Voraussetzungen bietet (Bachmann [4]). Diese Reibungsmechanismen werden von sehr niedrigen Gleitgeschwindigkeiten angeregt und finden sich daher in den Haftbereichen des Reifenlatschs. Dadurch wird auf trockener Fahrbahn der größere Teil der Gesamtreibkräfte in Folge der oben angestellten Überlegungen von der Fahrgeschwindigkeit weitgehend unabhängig (Unter Vernachlässigung geschwindigkeitsabhängiger Verzahnungseffekte nach Bachmann [4]). Nur der Anteil der Reibkräfte, der durch lokales Gleiten entsteht, fällt mit steigender Fahrgeschwindigkeit. Folgerichtig kann **Bild 57** entnommen werden, daß die Maximalreibwerte auf trockener Fahrbahn mit höherer Geschwindigkeit nur leicht abfallen. Die Blockierreibwerte jedoch, bei denen die Fahrgeschwindigkeit mit der Gleitgeschwindigkeit zusammenfällt, sinken sehr viel deutlicher ab. Auf nasser Fahrbahn werden die Adhäsionsbindungskräfte durch das Vorhandensein eines Zwischenmediums grundsätzlich reduziert. Es dominieren die Anteile der Reibungseffekte, die von der Gleitgeschwindigkeit abhängig sind. Dies gilt bereits für das Reibwertmaximum. Dementsprechend zeigt das Reibwertmaximum unter diesen Umständen eine stärkere Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, wie ebenfalls in **Bild 57** ersichtlich ist.

Das gemeinsame Auftreten von Haftbereichen und Gleitbereichen ist kinematisch nur über den Deformationsschlupf zu erklären. Werden bei gleichem Gesamtschlupf in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand (z.B. naß/trocken) unterschiedliche Reibungsmechanismen angeregt, so muß sich das Verhältnis zwischen Haftbereich und Gleitbereich im Reifenlatsch ändern. Dies kann nur durch hohen Deformationsschlupf bei großer Haftzone bzw. niedrigem Deformationsschlupf bei kleiner Haftzone erfolgen. Dies spiegelt sich in den mit fallendem Reibwertpotential geringeren Deformationsbewegungen in **Bild 52** wider. Aber auch dieser Zusammenhang erklärt noch nicht das gleichzeitige Auftreten von Haftbereichen und Gleitbereichen im Reifenlatsch. Dazu ist ein anderer Me-

chanismus erforderlich. Da die haftend übertragenen Reibkräfte größer sind als die gleitend übertragenen, so ist an einer ruhenden kraftbelasteten Gummiprobe zunächst eine rein haftende Reibkraftübertragung zu erwarten. Die Gleitgeschwindigkeiten ist dabei nahe null und es tritt in Abhängigkeit von der Geometrie und den Materialeigenschaften Deformationsschlupf auf. Diese Situation ist in **Bild 59** rechte Seite schematisch dargestellt. Eine Steigerung der übertragenen Kräfte resultiert in einer Vergrößerung der elastischen Deformation. Erst bei Überschreitung der maximalen übertragbaren Haftreibungskraft setzt lokales Gleiten mit reduzierter Reibung ein. Der dadurch zu vermutende sprunghafte Übergang von der Haft- zur Gleitreibung (vergleichbar mit der Coulomb'schen Reibung) ist im Experiment an Gummiprüben jedoch nicht nachweisbar [58]. Die nicht ideale Kinematik einer Gummiprobe führt immer zum ungleichmäßigem Einsetzen von Gleitbewegungen. Der Übergang von haftendem zu gleitendem Gummi vollzieht sich daher nicht sprunghaft, sondern kontinuierlich. Am Reifen tritt neben diesen Effekten noch die Überlagerung mit den abplattungsbedingten Schubspannungen auf, **Bild 59** links.



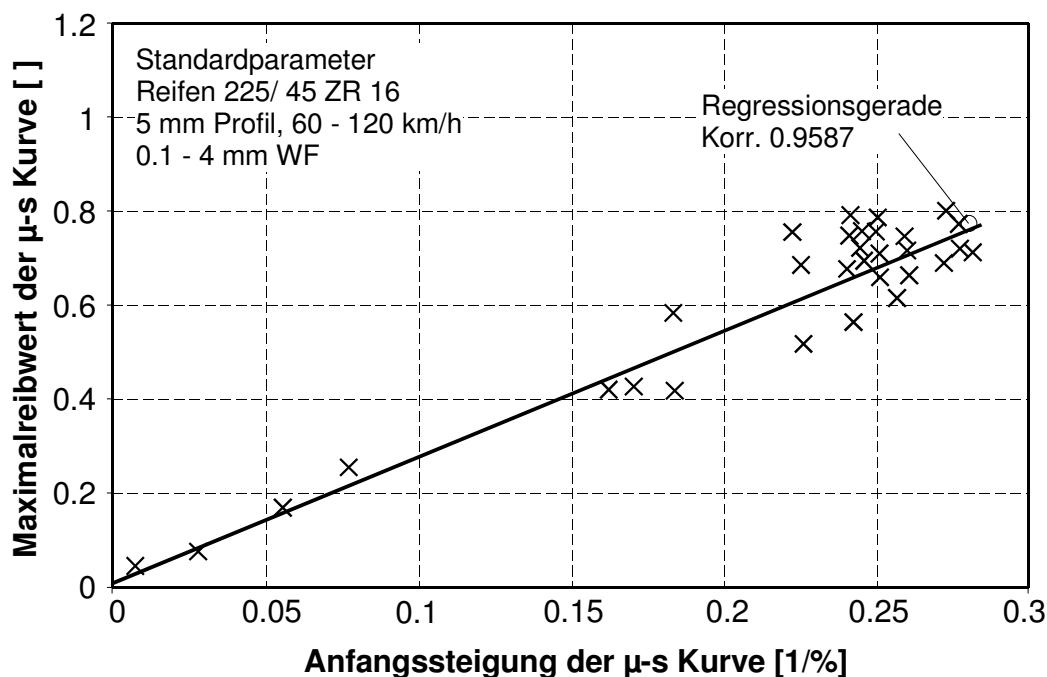
**Bild 59:** Modell zur Entstehung von Deformations- und Gleitschlupf am gebremsten Pkw-Reifen,  $F_i$ : Kräfte unterschiedlicher Höhe,  $S_i$  Schlupfwerte unterschiedlichen Betrags

Für die maximale Anregung der haftend bzw. mit sehr niedriger Gleitgeschwindigkeit übertragenen Reibkräfte muß ein möglichst großer Teil des Reifenlatschs an der Haftgrenze betrieben werden. Dazu ist es erforderlich, daß die Profilelemente maximal elastisch vorgespannt sind. Aufgrund der



bereits vorhandenen abplattungsbedingten Schübe ist die Überschreitung der haftend übertragbaren Kräfte in Teilen der Kontaktzone bei gleichzeitiger Ausnutzung der Haftreibung in anderen Bereichen im Latsch prinzipbedingt vorgegeben. Im Fall des Bremsschlupfs sind die gleitenden Bereiche dabei im Reifenauslauf zu finden. Das charakteristische Aussehen der Reibwert-Schlupf-Kurve begründet sich also durch die Wechselwirkung der beiden beteiligten Gummireibungsmechanismen in Verbindung mit der Tatsache, daß der Reifen ein abgeplatteter rotationssymmetrischer Körper ist, in dessen Aufstandszone Abplattungsschübe herrschen.

Das Aussehen der Reibwert-Schlupf-Kurve wird darüber hinaus von einer Vielzahl von Reifeneigenschaften und Betriebsparametern bestimmt (vgl. Kapitel 1.2.2), die an dieser Stelle jedoch nicht diskutiert werden können. Die abplattungsbedingten Schübe in der Aufstandsfläche stellen außerdem die Ursache für ein weiteres Phänomen in Zusammenhang mit der Reibwert-Schlupf-Kurve dar. In **Bild 60** sind die Anfangssteigungen der  $\mu$ -s-Kurven eines Versuchsreifens unter Variation von Fahrgeschwindigkeit und Wasserfilmhöhe im Vergleich zum jeweils erzielten Reibwertmaximum aufgetragen.



**Bild 60:** Abhängigkeit der Anfangssteigung vom Maximalreibwert der Reibwert-Schlupf-Kurve, Fach [34]

Für den gesamten Bereich der variierten Reibwertbedingungen zeigt sich eine Korrelation zwischen maximalem Reibwert und Anfangssteigung der  $\mu$ -s Kurve. Niedrigere Reibwerte führen zu flacheren Anfangssteigungen, wie auch von Dieckmann [27] apostrophiert. Betrachtet man nur den Be-

reich mittlerer bis hoher Reibwerte, so zeigt sich eine nur sehr schwach ausgeprägte Korrelation, wie sie auch bei den Messungen von Bachmann [4] zu beobachten ist.

Die Erklärung für diesen Effekt resultiert aus den lokalen Schubspannungen in der Aufstandsfläche. Zunehmende Bremsmomente führen zu lokaler Reibwertbeanspruchung und zu Deformationsschlupf. Mit höheren Bremskräften und damit einhergehenden höheren Reibwertausnutzungen setzen lokal Gleitbewegungen ein, und die Reibwert-Schlupf-Kurve entfernt sich von dem zunächst durch die Steifigkeit des Reifens vorgegebenen Deformationsschlupfverlauf. Ein geringeres Reibwertpotential führt zu früherem Einsetzen von Gleitbewegungen an bestimmten Stellen der Reifenkontaktfläche und dementsprechend zu einer früheren Abweichung von der Deformationsschlupfkurve.

Für relativ griffige Fahrbahnen finden diese Abweichungen aber erst bei mittleren bis hohen Bremskräften statt so daß die Steigung aus dem Nullpunkt heraus davon unbeeindruckt bleibt. Die abplattungsbedingten Schubspannungen führen ihrerseits zu einer Beanspruchung des lokalen Reibwerts. Ist das Reibwertpotential zwischen Reifen und Fahrbahn so niedrig, daß die abplattungsbedingten Schubspannungen bereits zu seiner Überschreitung führen, dann reduziert sich die Zahl der Profilelemente, die haftend Kräfte übertragen können, da lokales Gleiten bereits im freirollenden Zustand eingesetzt hat (vgl. Kapitel 4). Dementsprechend verläuft unter diesen Bedingungen die Steigung der  $\mu$ -s-Kurve bereits aus dem Nullpunkt heraus deutlich flacher, da bereits niedrige äußere Kräfte über Gleitbewegungen in der Aufstandsfläche übertragen werden müssen.

Ein Effekt, der im übrigen auch in den Arbeiten von Bachmann [4] für Niedrigreibwerte beobachtet wurde. Der Reifensensor ist in der Lage, Informationen über die abplattungsbedingten Schubspannungen zu geben. Für die im Innentrommelprüfstand untersuchten Reibwertzustände konnte für die beiden niedrigsten Reibwertniveaus tatsächlich bereits im freirollenden Zustand eine Reduzierung der vom Reifensensor erfaßten Profildeformationen festgestellt werden (siehe **Bild 77**). Genau unter diesen Bedingungen ist auch eine flachere Anfangssteigung der zugehörigen Reibwert-Schlupf-Kurve, **Bild 41**, zu beobachten. Dies bestätigt die oben aufgezeigten Zusammenhänge.

Neben dem Reibwertpotential wird die Anfangssteigung ebenso wie der Maximalreibwert von vielen anderen Parametern beeinflusst. Ein Beispiel dafür ist die Temperatur, die maßgeblich für die Steifigkeit des Reifengummis verantwortlich ist. Die Messungen, die in ausgewertet sind wurden bei einer geregelten Temperatur von Prüfstand und eingesetztem Wasser von 21 °C durchgeführt. Ergebnisse zum Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Reibwert-Schlupf-Kurven von Reifen mit unterschiedlichen Gummimischungen finden sich in [36]. So kann im Unterschied zu einer

trockenen Fahrbahn die Anfangssteigung der  $\mu$ -s-Kurve auf nasser Fahrbahn steiler werden, obwohl das Reibwertpotential sinkt. Ursächlich dafür ist die Kühlwirkung des auf der Fahrbahn befindlichen Wassers, Bachmann [4]. Unter anderem erschwert dies die Reibwernerkenntnis mit Hilfe des von Dieckmann vorgestellten Ansatzes der Mikroschlupfmessung außerordentlich.

### 3.4 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Verfahren entwickelt, die eine Messung der lokalen Gleitvorgänge in der Aufstandsfläche von Pkw-Reifen bei zum Teil gleichzeitiger Erfassung der Laufstreifen-deformationen ermöglichen. Die Methoden wurden auf zwei Prüfständen zur Erforschung der lokalen Kraftübertragung vom Reifen auf die Fahrbahn eingesetzt. Dabei wurden quasistationäre Untersuchungen auf einem Linearprüfstand mit Plexiglasoberfläche vorgenommen, die eine Analyse von Gleitvorgängen mit hoher Präzision ermöglichtem. Daran anschließend erfolgten mit einem abgewandelten Aufbau Messungen von Profilelementverformungen und lokalen Gleitbewegungen auf einem Innentrommelprüfstand mit realistischer Asphaltoberfläche. Besonderer Schwerpunkt war hierbei die Variation der Reibwertbedingungen durch definiertes Aufbringen von Wasser auf die Versuchsfahrbahn.

Als Ergebnis können eine Reihe von Aussagen zur Kraftübertragung Reifen- Fahrbahn formuliert werden, die zunächst für den untersuchten Reifen, aber nach Auffassung des Verfassers in ihren Kernsätzen zumindest qualitativ auch für die gesamte übrige Palette der Pkw- Reifen gelten:

- Gleitvorgänge treten in Abhängigkeit von Richtung und Betrag der am Reifen wirkenden äußeren Kräfte an unterschiedlichen Stellen im Reifenlatsch auf.
- Bestimmte Betriebszustände, wie z. B. extrem niedriger Reifeninnendruck, führen bereits am freirollenden Rad zu lokalen Gleitvorgängen.
- Innerhalb des Reifenlatschs existieren Bereiche mit stark unterschiedlicher Gleitgeschwindigkeit. Es ist möglich „haftende“ und „gleitende“ Bereiche zu unterscheiden.
- Das Auftreten von Gleitvorgängen an bestimmten Stellen der Kontaktzone Reifen-Fahrbahn kann durch die Überlagerung von abplattungsbedingten und kraftverursachten Schubspannungen erklärt werden.
- Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn hat keinen Einfluß auf die Summe aus Deformations- und Gleitschlupf am unter Gesamtschlupf betriebenen Rad, wohl aber auf das Verhältnis

der beiden Anteile zueinander, da der Gesamtschlupf sich aus den beiden Komponenten zusammensetzt.

- Aus den ermittelten Zusammenhängen läßt sich das charakteristische Aussehen der Reibwert-Schlupf-Kurve in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Reibwert ableiten.
- Fahrbahnen mit sehr niedrigem maximalen Reibwert, bei denen bereits am freirollenden Rad Überschreitungen des lokalen Reibwertmaximums auftreten können, zeigen einen flacheren Anstieg der Reibwert-Schlupf-Kurve.
- Oberhalb eines bestimmten Grenzureibwerts ist dieser Effekt nicht beobachtbar.
- Entsprechend der Verteilung der Gleitgeschwindigkeiten im Latsch erklärt sich das gleichzeitige Auftreten von unterschiedlichen Reibungsmechanismen, die von jeweils anderen Geschwindigkeiten angeregt werden.

Die Bedeutung der Ergebnisse kann z.B. anhand der Vorhersagemethoden für die Reibungseigenschaften von Gummiprobe (vgl. Kapitel 1.2.1, **Bild 6**) bewertet werden.

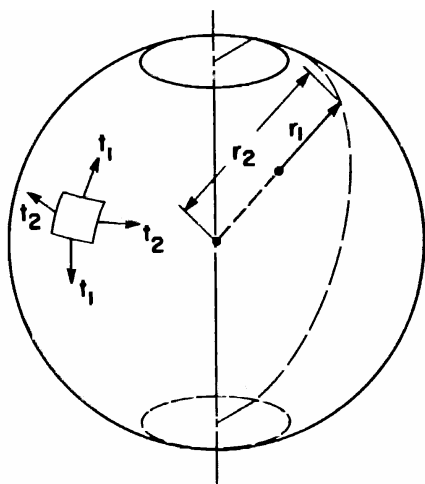
Da eine einheitliche Gleitgeschwindigkeit für den gesamten Reifenlatsch nicht gegeben ist, sondern besonders beim Maximalreibwert gleichzeitig Bereiche mit sehr niedriger und relativ hoher Gleitgeschwindigkeit auftreten, ist die Definition einer Anregungsfrequenz zur optimalen Ausbildung der reibungsrelevanten Gummieigenschaften äußerst schwierig. Die Anregungsfrequenz für den Teil der Reibkraft, der von niedrigen Gleitgeschwindigkeiten erzeugt wird, ist wahrscheinlich von der Fahrgeschwindigkeit unabhängig. Der Teil der Reibkraft, der von meßbaren Gleitbewegungen angeregt wird, und der besonders auf nassen Fahrbahnen maßgeblich ist, muß von der Fahrgeschwindigkeit abhängig sein. Die Anregungsfrequenz der viskoelastischen Gummieigenschaften ergibt sich für diesen Anteil der Reibkraft aus der Gleitgeschwindigkeit und der Fahrbahntextur. Während erstere bestimmt werden kann, sind besonders die Oberflächeneigenschaften der Fahrbahn Gegenstand aktueller Arbeiten und bisher immer noch nicht vollständig erforscht.

## 4 Reibwerterkennung

Die Erkennung des Reibwerts zwischen Reifen und Straße war ein wesentliches Ziel bei der Entwicklung des Darmstädter Reifensensors. Roth konnte in seiner Arbeit [101] bereits früh nachweisen, daß die Profilelementverformungen eines abrollenden Pkw-Reifens Informationen über den Reibwert zwischen Reifen und Straße enthalten. Die abplattungsbedingten Schubspannungen in der Reifenaufstandsfläche führen zu lokaler Beanspruchung des Reibwerts, so daß bereits am freierollenden Rad bei Überschreitung des lokalen Reibwertmaximums signifikante Änderungen der Profilelementverformungen auftreten. Augenfälligste Erscheinung ist dabei das Auftreten von Gradientenänderungen im Profilelementverformungssignal. Roth entwickelte eine einfache mathematische Beschreibung dieser Signaländerungen, indem er den mittleren Gradienten des Profilelementverformungssignals in Längsrichtung bildete. Ausgehend von diesen Grundlagen kann heute auf einer wesentlich breiteren Basis an Meßdaten eine Bewertung der von Roth vorgestellten Ansätze und eine Weiterentwicklung seiner Verfahren erfolgen.

### 4.1 Grundlagen

Zur Erleichterung des Verständnisses werden an dieser Stelle die Grundlagen der Kinematik des Luftreifens und deren Auswirkungen auf die Spannungen im Reifenlatsch nach Clark [23] kurz



**Bild 61:** Spannungen an einem unter Innendruck stehenden Körper [23]

zusammengefaßt. Der Reifen ist ein luftgefüllter rotationssymmetrischer Körper. Ähnlich wie bei einer gasgefüllten Membran, **Bild 61**, halten Schubspannungen in der Oberfläche dem Innendruck das Gleichgewicht. Die Höhe dieser Schubspannungen ergibt sich aus dem Innendruck und dem wirkenden Radius der Kugel mit der Beziehung:

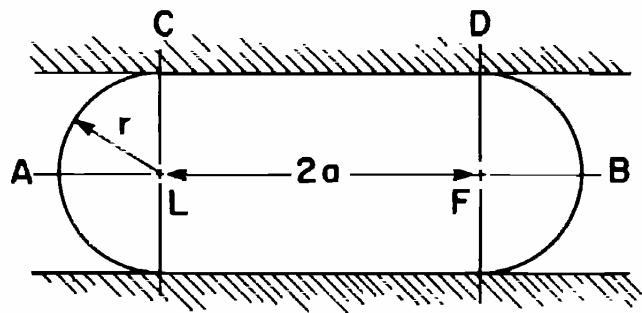
$$\tau = p_i \cdot R \quad (19)$$

In dieser Gleichung bezeichnet  $\tau$  eine schubspannungsäquivalente Linienlast, die zu Berechnung der Spannung durch die Dicke des Materials geteilt werden muß. Im

vorliegenden Beispiel ist dies nicht möglich, da die Kugel eine Membran mit unendlich kleiner Dicke darstellt. Betrachtet man eine zwischen zwei Platten eingeschlossene gasgefüllte,

unter Innendruck stehende Membran, so erhält man die in **Bild 62** schematisch dargestellte Anordnung.

Die Kraft in Normalrichtung auf die beiden Platten kann aus dem Innendruck und der wirkenden Fläche, in der zweidimensionalen Ansicht der wirkenden Länge, berechnet werden.

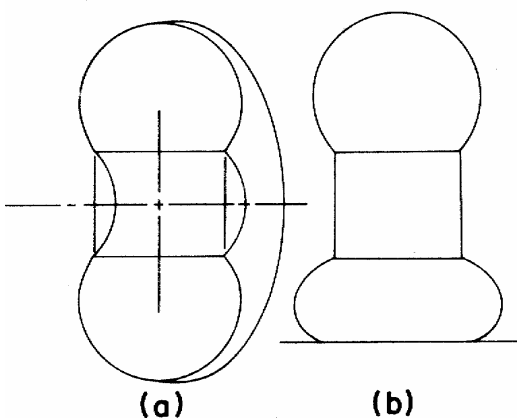


Für die tangentialen Schubspannungen in den freien Radien der Membran A-C und B-D zwischen den beiden Platten gilt die oben genannte Beziehung. Ist der Kontakt

**Bild 62:** Flexible Membran unter Druck zwischen zwei Platten [23]

zwischen der Membran und den beiden Platten reibungsfrei, so sind die tangentialen Schubspannungen der Membran in der Kontaktzone C-D genauso hoch wie in den Bereichen A-C und B-D, da die unter dieser Schubspannung stehende Membran tangential in die Kontaktzone mit der Platte einläuft. Ist der Kontakt zwischen Platte und Membran nicht reibungsfrei, dann verändern sich die tangentialen Schubspannungen in der Membran in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizienten, von der elastischen Eigenschaften der Membran und sogar in Abhängigkeit von der kinematischen Annäherung der Membran an die Platten. Auf die in Normalrichtung der Platten wirkende Kraft hätte dieser Zusammenhang allerdings keine Auswirkung. Diese Wechselwirkungen finden sich auch in der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn wieder. Sie sind wegen ihrer Komplexität allerdings analytisch nicht zu beschreiben.

Der abgeplattete Reifen unterscheidet sich von dem oben beschriebenen Beispiel dadurch, daß er



dreidimensionale Formen hat, keine unendlich dünnen Membran darstellt, Reibungskräfte in der Aufstandsfläche existieren und die Einleitung der Radlast in die Felge einen anderen Mechanismus voraussetzt als die Krafteinleitung in zwei parallele Platten. Dennoch gelten die wesentlichen Zusammenhänge des obigen Beispiels auch hier. **Bild 63** zeigt einen Schnitt durch einen unbelasteten Reifen (a) und im belasteten Zustand (b). Man erkennt in

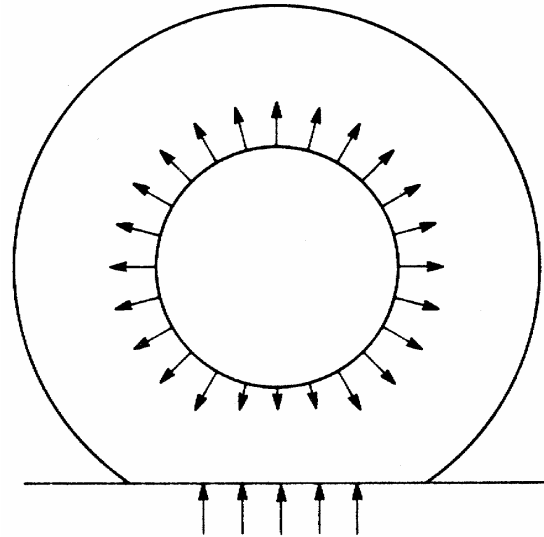
**Bild 63:** Schnitt eines abgeplatteten Reifens [23]

der Aufstandszone die Radienänderungen der Reifenseitenwand gegenüber dem unbelasteten Zustand. Diese Änderungen führen über die Beziehung zwi-

schen Druck, Radius und Schubspannung dazu, daß im Bereich der Abplattung in den Seitenwänden die tangentialen Schubspannungen, verursacht durch den geringeren Radius der Seitenwand, kleiner sind als an jeder anderen Stelle des Reifentorus.

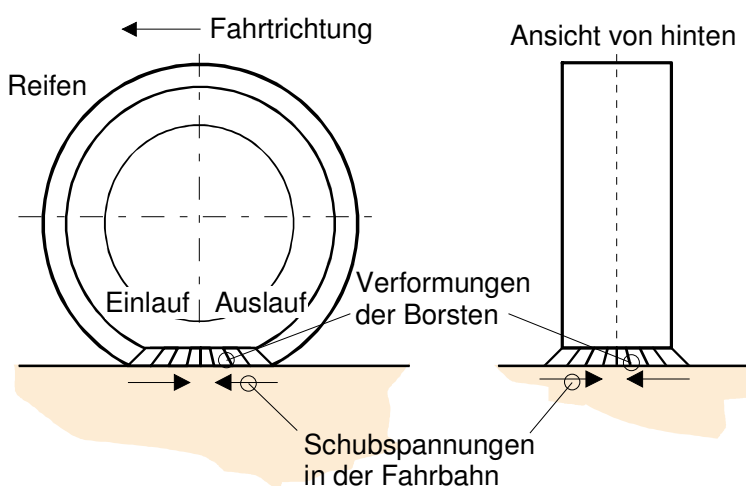
In der Seitenansicht von Reifen und Felge folgt daraus die in **Bild 64** skizzierte Wirkung.

Im Bereich der Aufstandsfläche ändern die tangentialen Schubspannungen, die unter anderem in die Felge eingeleitet werden, ihren Betrag und ihre Richtung. Daraus resultiert im oberen Bereich der Felge in der Summe der tangentialen Spannungen ein Kraftüberschuß, der die Radlast trägt. Der Kraftfluß vom Reifen in die Felge erfolgt dabei über die Wulstkabel, die im Reifengummi eingebettet um die Felge geschlungen sind. Daneben wird noch ein kleinerer Kraftanteil über die Struktursteifigkeit der Reifenseitenwand direkt von der Aufstandsfläche in die Felge eingeleitet.



**Bild 64:** Wirkung der Radlast am luftgefüllten Reifen [23]

Wie bereits oben angedeutet, verursachen die tangentialen Schübe im Reifenmaterial beim Kontakt mit der Fahrbahn lokale Schubspannungen in der Aufstandsfläche und in weiterer Folge Profileformationen entsprechend dem Borstenmodell in **Bild 65**. Die sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung wirkenden lokalen Kräfte sind damit ein Nebeneffekt der radlastbedingten Abplattung des Reifens. Selbst bei nicht vorhandenem Reibwert und damit schubspannungsfreiem Reifenlatsch trägt der Reifen die Radlast.



**Bild 65:** Borstenmodell des abgeplatteten Pkw-Reifens

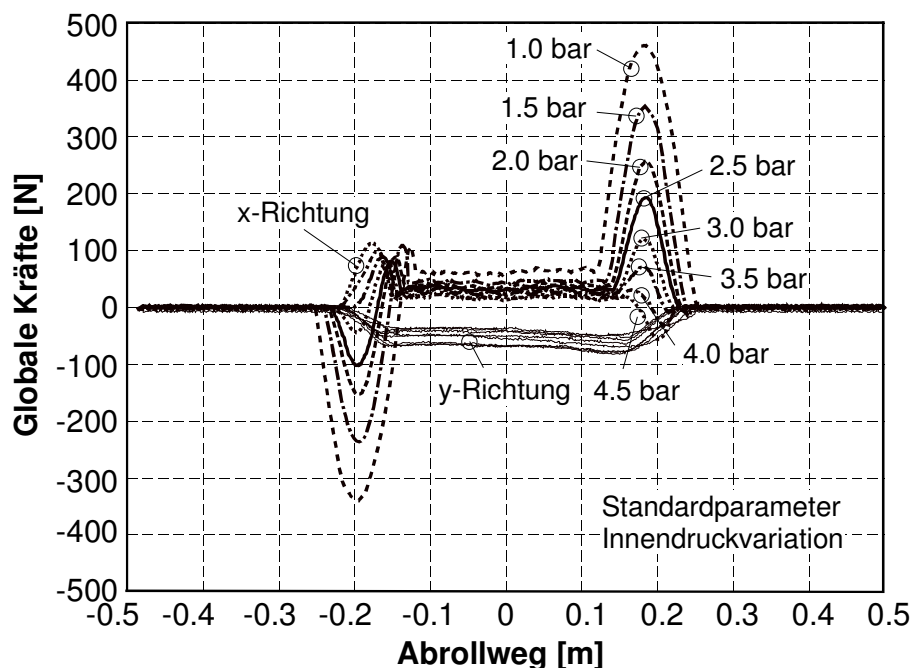
und Fahrbahn zu gewinnen. Je nach verwendeter Sensorgeneration (vgl. **Bild 16**) werden die Signale dieser Sensoren allerdings von Verzweigungen innerhalb des Laufstreifens beeinflusst, die

tung des Reifens. Selbst bei nicht vorhandenem Reibwert und damit schubspannungsfreiem Reifenlatsch trägt der Reifen die Radlast.

Der Darmstädter Reifensensor macht sich den Zusammenhang zwischen lokalen Schubspannungen und Profilelementverformungen zu Nutze, um Informationen über den Zustand der Kontaktfläche zwischen Reifen

zwar eine Folge der tangentialen Schübe bzw. deren Änderung bei der Abplattung sind, jedoch nicht unbedingt mit den Schubspannungen in der Fahrbahn in Zusammenhang stehen. Besonders der in dieser Arbeit verwendete Reifensensor der 2. Generation zeichnet sich durch den tief im Profilelement liegenden Magneten dadurch aus, daß erhebliche Anteile seines Signals nicht durch reibwertbedingte Schubspannungen in der Kontaktzone entstehen, sondern durch innere Verformungen, wie mit Messungen auf einer mit Seifenlösung präparierten Fahrbahn nachweisbar (s.u.).

Um einen Eindruck von den tatsächlich reibwertbeeinflussten Kräften in der Aufstandsfläche zu gewinnen, bieten sich fahrbahnseitige Messungen an. Ein Beispiel dafür ist das Meßsignal der globalen Meßplattform des Prüfstand LINUS (vgl. **Bild 19**). Dadurch, daß der Reifen die Trennstelle zwischen feststehender Fahrbahn und Meßplattform überrollt, werden die inneren Kräfte im Reifenlatsch sichtbar. Diese hängen stark von den Betriebsbedingungen des Reifens ab und werden im freierollenden Zustand vor allem durch Radlast bzw. Reifeninnendruck beeinflusst, die beide das



**Bild 66:** Globale Kräfte in Längsrichtung beim Überrollen unter Variation des Reifeninnendrucks am Prüfstand LINUS

Maß der Abplattung des Reifens bestimmen. **Bild 66** zeigt beispielhaft, wie eine Verminderung des Reifeninnendrucks und die damit einher gehende stärkere Einfederung des Reifens zu einem Anstieg der lokalen Kräfte im Reifenlatsch führen. Stellt man sich in dem gezeigten Beispiel eine Meßplattform der Länge Null vor, so werden aus den Signalen beim Aufrollen und danach beim Abrollen des Reifens die typischen sinusförmigen Kurven sichtbar, die auch der Reifensensor beim Überrollen zeigt. Die Vorzeichenwechsel der Kräfte in x-Richtung bei hohen Reifeninnendrücken resultieren wahrscheinlich aus dem Eindringen von Gummi in den Spalt zwischen Meßplattform und Fahrbahn. Bei hohen Drücken bzw. niedrigen lokalen Schubspannungen in x-Richtung kann dieser Effekt dominant werden.



Neben den inneren Kräften kann auch der Rollwiderstand des Reifens im mittleren Bereich der Meßplattform abgelesen werden. Mit fallendem Reifeninnendruck steigt er als Folge der größer werdenden kinematischen Verzwängungen an.

Die lokalen Schubspannungen können am Prüfstand LINUS auch mit einem speziell dafür geeigneten Meßstempel gemessen werden. Dessen kleine Meßfläche ist bündig in der Mitte der Meßplattform angeordnet und auf einer Dreikomponenten Kraftmeßdose gelagert. Aus der wirkenden Kraft kann mit der Fläche des Stempels die lokale Schubspannung bestimmt werden. Allerdings hat diese Einrichtung den Nachteil, daß der um den Meßstempel befindliche Ringspalt durch Eindringen des Reifengummis zusätzliche, formschlüssige Kraftwirkungen verursacht. Besonders bei Variationen des Reibwerts sind diese Effekte sehr störend. Das Signal der globalen Plattform ist von solchen Einflüssen dagegen weitgehend frei.

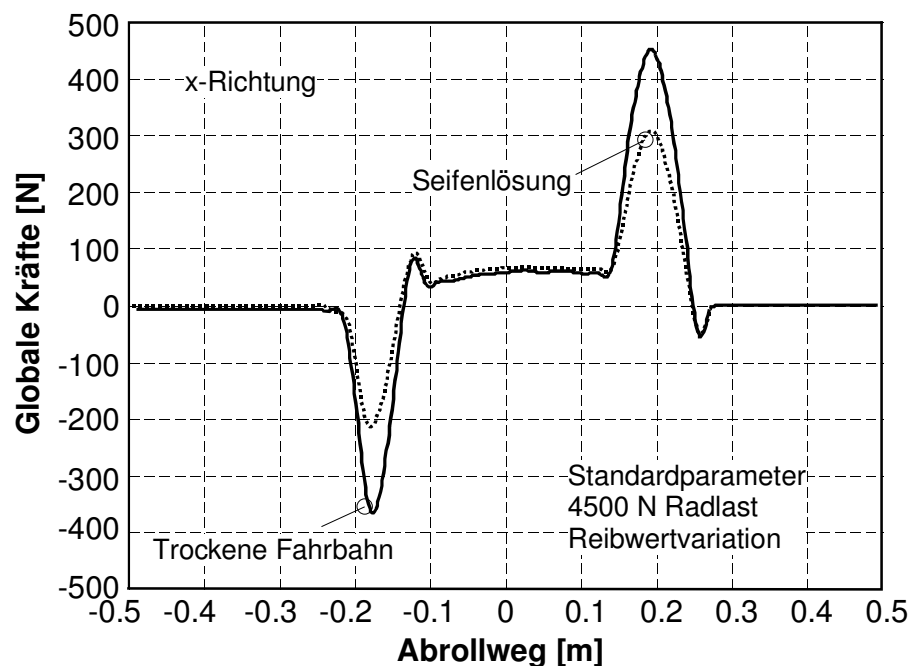
Um den Einfluß des Reibwerts zwischen Reifen und Straße auf die lokalen Schubspannungen im Reifenlatsch deutlich zu machen, wurde der in **Bild 67** gezeigte Versuch durchgeführt. Gegenübergestellt sind hier die Signale der globalen Meßplattform bei freirollendem Rad auf der trockenen

Plexiglasfahrbahn und nach dem Präparieren mit einer Seifenlösung.

Deutlich sichtbar sind die Reduzierung der lokalen Schubspannungen in der Aufstandfläche beim Aufrollen und beim Abrollen von der Fahrbahn. In der Spitze verringern sich die Amplituden von ca. 400 N auf Werte um 200 N. Der Reibwert der mit Seifenlösung bestrichenen

Fahrbahn beträgt ca.  $\mu=0.1$ .

Dieser Zustand entspricht in etwa einer Eisoberfläche. Dennoch sind bleibende Restschubspannungen zu beobachten, die wahrscheinlich erst bei einer weiteren Reduktion des Reibwerts zurückgehen werden.



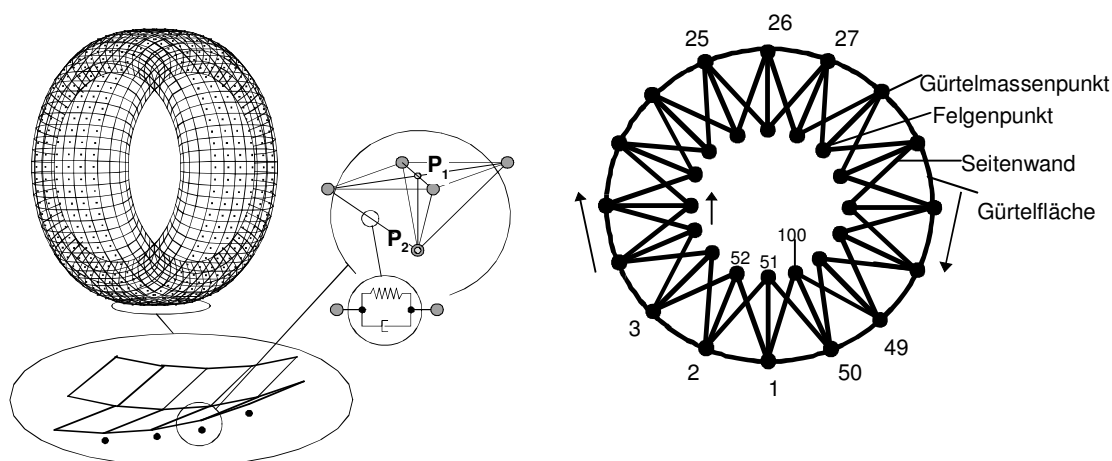
**Bild 67:** Globale Kräfte in Längsrichtung beim Überrollen unter Variation des Reibwerts am Prüfstand LINUS

Neben diesen Beobachtungen kann aus den gezeigten Meßsignalen auch abgelesen werden, daß der Rollwiderstand von der Verringerung des maximalen Reibwerts unbeeinflußt bleibt. Es liegt der Schluß nahe, daß ein Einfluß auf den Rollwiderstand erst dann eintritt, wenn der Reibwert so niedrig ist, daß er für die Überwindung des Rollwiderstands nicht mehr ausreicht. Unter diesen Umständen würde das Rad natürlich stehen bleiben. Es daher kann formuliert werden, daß der Rollwiderstand vom Reibwert zwischen Reifen und Straße unabhängig ist.

## 4.2 Simulation

Besonders hilfreich für die Untersuchung der lokalen Effekte in der Aufstandsfläche von Reifen, die sich wie erwähnt einer analytischen Beschreibung weitgehend entziehen, kann neben dem Experiment die numerische Simulation sein. Heutige Programme sind soweit entwickelt, daß detaillierte Aussagen über die Kinematik abrollender Reifen möglich sind, wenn auch der Inhalt der mit dem Reifensensor gemessenen Signale bislang noch nicht vollständig abgebildet werden kann und die hohen Rechenzeiten immer noch ein Hindernis darstellen.

Im Hinblick auf die Wirkung von Kräften am Reifen auf die Profilelementdeformationen wurden in der Dissertation Bachmann [6] umfangreiche Simulationsrechnungen durchgeführt. **Bild 68** zeigt die Programmstruktur der dabei verwendeten Modelle.

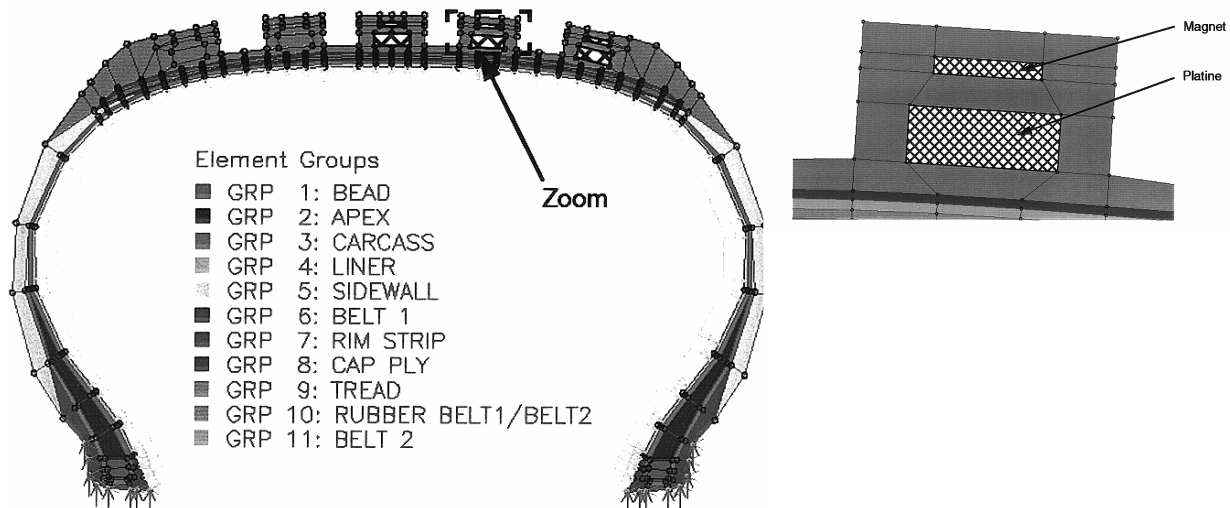


**Bild 68:** Modellstruktur von DNS Tire [51] (links) und Berliner Programm [12] (rechts)

Mit diesen Modellen gelang eine Vielzahl von Berechnungen, die zur Verifizierung der von den Reifensensoren erfaßten Profileformationen durchaus geeignet sind. Daneben konnten besonders Parameterüberlagerungen untersucht werden, die experimentell nur sehr aufwendig reproduzierbar

sind. Für eine ausreichend exakte Nachbildung reibwertrelevanter Probleme in der Aufstandsfläche sind diese Modelle jedoch nicht geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür in Zusammenarbeit mit der Firma Continental ein dort verwendetes, hochauflösendes 3 D FEM Programm genutzt, Fries [24].

**Bild 69** zeigt einen Querschnitt durch das verwendete FEM Netz. In der 2 D Ansicht verfügt das Netz über 436 Knoten.

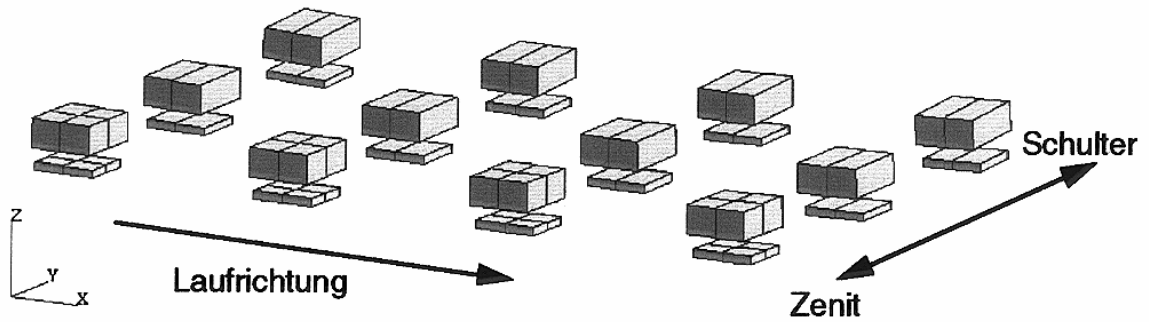


**Bild 69:** Querschnitt des verwendeten FEM Netzes (links) mit Vergrößerung des Reifensensors (rechts), Fries [24]

Für das 3 D Netz des gesamten Reifens ergibt sich eine Zahl von 21806 Knoten. Die Sensoren sind als quaderförmige Scheiben modelliert, um die Anzahl der zusätzlichen Netzknoten nicht übermäßig zu steigern. Die Materialeigenschaften von Platine und Magnet sind wie bei Stahl definiert. Das Modell kann sowohl den statisch abgeplatteten als auch den abrollenden Reifen simulieren. Um die Rechenzeiten zu verkürzen und eine Information über den Verlauf der Profilelementverformungen während des Abrollens zu erhalten, wurden mehrere Sensoren an verschiedenen Stellen des Reifenlatschs eingeführt. Die Verschiebung der einzelnen Sensoren entspricht dann der Verschiebung an einer bestimmten Stelle am Reifenumfang bzw. der Reifenbreite. Aus Symmetriegründen wurde nur die Reifenmitte und eine Hälfte der Kontaktzone mit Sensoren bestückt.

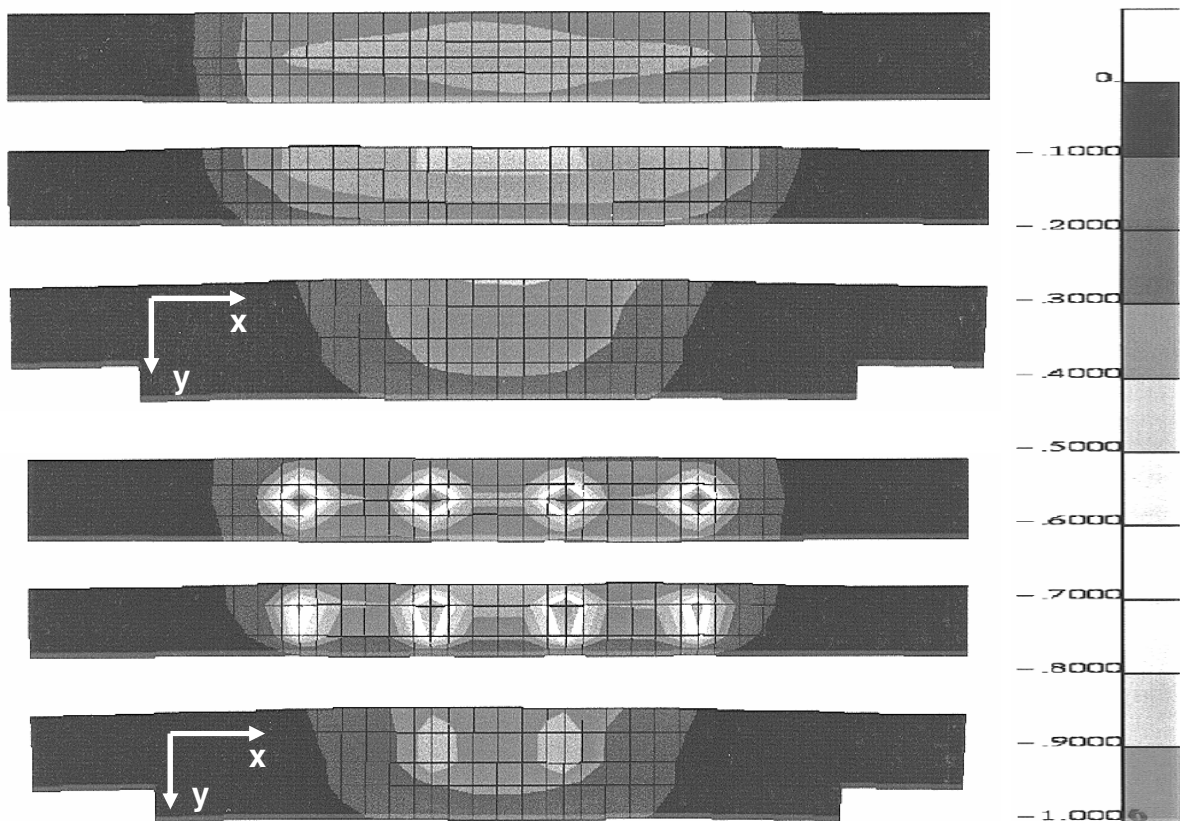
Die Betriebsparameter entsprechen in etwa denen der experimentellen Untersuchungen. Die Einfederung des Reifens beträgt 17.59 mm (ca. 3500 N Radlast), der Innendruck 2.5 bar. Der Reifen hat die Dimension 195/65 15 mit umlaufenden Längsrillen. Zur Verifizierung der Ergebnisse wurden Fahrversuche mit Reifen dieses Typs unter Verwendung der Reifensensoren der 3. Generation durchgeführt.

Unter statischer Einfederung ergibt sich für die modellierten Sensoren **Bild 70**.



**Bild 70:** Anordnung der Reifensensoren im eingefederten 3D FEM Netz, Fries [24]

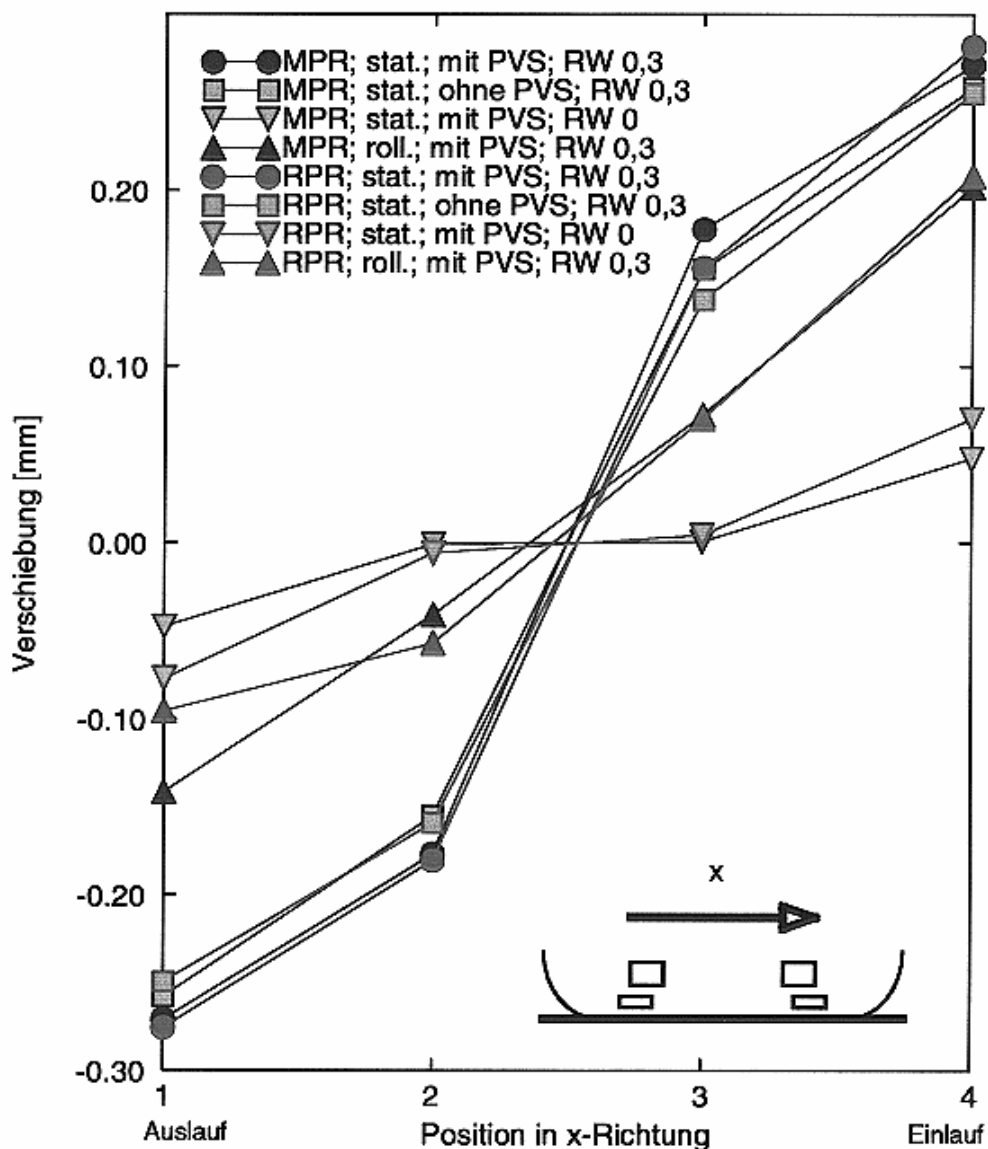
Im Zenit des Reifens befinden sich die Sensoren in der mittleren Profilrille, von dort nach außen in der rechten Profilrippe und schließlich in der Schulter. Die Flächenpressungsverteilung im Reifenlatsch mit und ohne Reifensensoren zeigt **Bild 71**.



**Bild 71:** Berechnete Flächenpressung in der Aufstandsfläche ohne Reifensensor (oben) und mit Reifensensoren (unten), Fries [24]

Deutlich zu erkennen sind die Flächenpressungsüberhöhungen an den Positionen der eingebrachten Sensoren. Durch die Anwesenheit der sehr steifen Sensoren im Reifengummi erhöht sich die lokale Flächenpressung von max. 0.5 MPa auf bis zu 1.0 MPa direkt unter den Sensoren. Diese Werte können auch experimentell mit der Reifensensorgeneration 3 bestätigt werden. Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn hat in der Simulation ebenfalls einen Einfluß auf die Flächenpressungsverteilung im Latsch. So führt ein höherer Reibwert tendenziell zu leicht erhöhten Flächenpressungen in der Reifenmitte.

Die berechneten Verformungen in Längsrichtungen sind in **Bild 72** aufgetragen.



**Bild 72:** Berechnete Profilelementverformungen in Längsrichtung mit und ohne Reifensensoren bei Reibwert (RW)  $\mu=0$  und Reibwert  $\mu=0.3$ . PVS=Profilelementverformungssensor, MPR=mittlere Profilrippe, RPR=rechte Profilrippe, Fries [24]

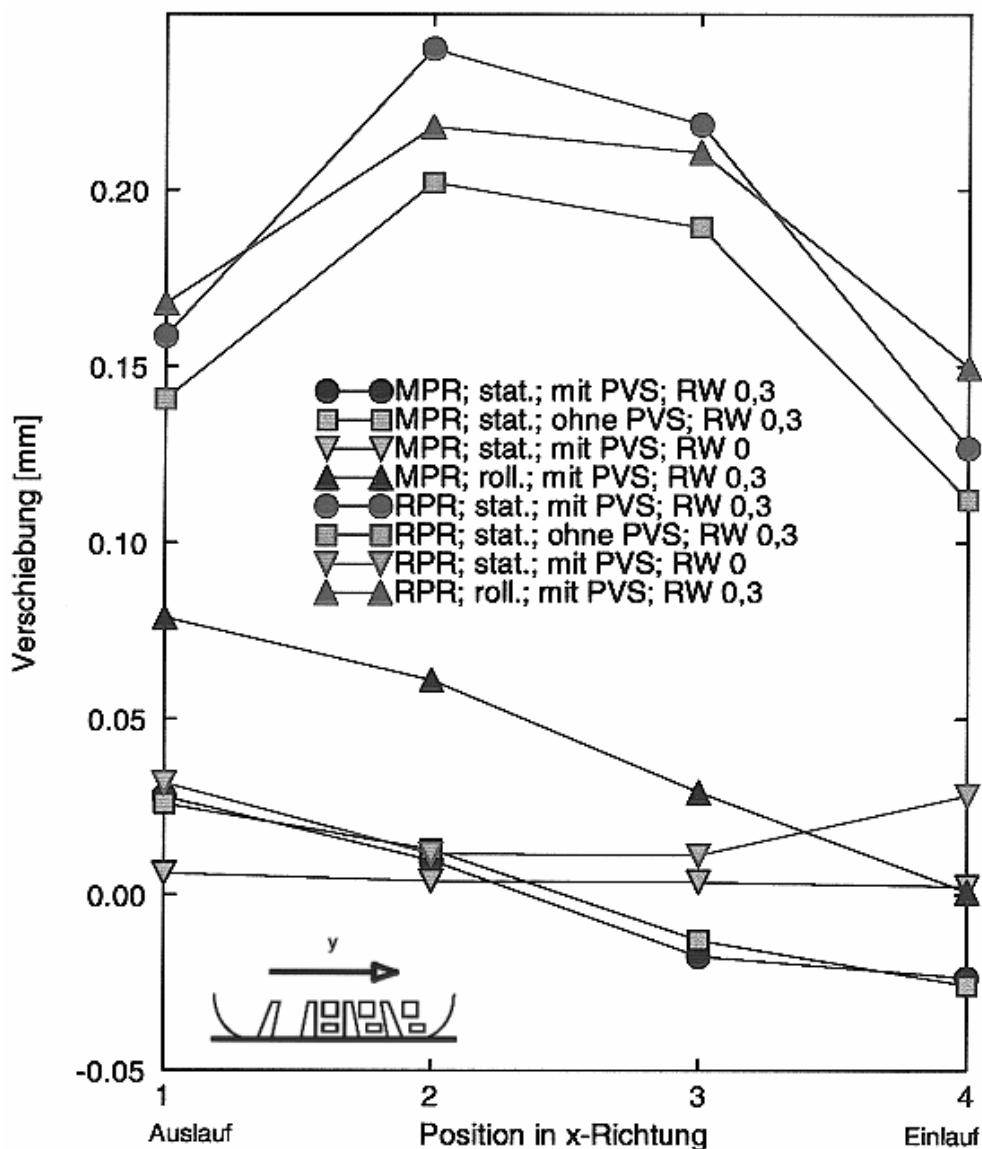
In der Darstellung sind sowohl die mit statisch abgeplattetem als auch die mit rollendem Reifen (nach oben gerichtete Dreiecke) gerechneten Ergebnisse enthalten. Die Berechnungen der Sensorverschiebungen bei rollendem Reifen liefern im Vergleich zum statisch abgeplatteten niedrigere Verformungen in Längsrichtung. Wahrscheinlich führt die Kinematik des Abrollens zu einer Homogenisierung der Schubspannungen in der Aufstandsfläche und entsprechend verringerten Deformationen. Die Rechnungen des abrollenden Reifens erfordern erheblich längere Rechenzeiten als die des statisch abgeplatteten Reifens. Daher sind nur wenige, exemplarische Simulationen erfolgt.

Zwischen rechter und mittlerer Profilrippe können keine signifikanten Unterschiede bei den Verschiebungen in Längsrichtung festgestellt werden. Auch dies entspricht den mit den Darmstädter Reifensensoren gemachten experimentellen Erfahrungen.

Interessanterweise zeigen sich auch keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen, die mit und ohne eingebrachte Sensoren berechnet wurden. Obwohl die Flächenpressung durch das Einbringen der Sensoren lokal um den Faktor 2 steigt, hat dies keinen Einfluß auf die Verschiebungen in Längsrichtung. Dies ist insbesondere für die Interpretation der Meßergebnisse mit den Darmstädter Reifensensoren von erheblicher Bedeutung. Es kann trotz der Störung der Kinematik der Profilelemente und der lokalen Erhöhung der Flächenpressung von einer prinzipiellen Übertragbarkeit der Sensormessungen ausgegangen werden. Einschränkend muß jedoch angemerkt werden, daß durch die Erhöhung der lokalen Flächenpressung im Zusammenhang mit einer texturierten Fahrbahn unter Umständen eine Erhöhung des lokalen Reibwerts auftreten kann. Ein solcher Effekt kann mit dem Simulationsprogramm nicht nachgebildet werden, hier ist der Reibwert unabhängig von der Flächenpressung. Im Experiment kann diese Tatsache allerdings erhebliche Auswirkungen besonders auf das Entstehen von lokalen Gleitbewegungen haben.

Die Simulationsergebnisse zeigen deutlich, daß der Reibwert einen erheblichen Einfluß auf die Verformungen im Laufstreifen hat. Für einen Reibwert von  $\mu=0$  (nach unten gerichtete Dreiecke) sind die Profilelementverformungen im stehenden Reifen in Längsrichtung deutlich reduziert. Gegenüber ca. 0.25 mm bei einem Reibwert von  $\mu=0.3$  werden nur noch Verschiebungen von ca. 0.05 mm erreicht. Dieser Umstand entspricht den im vorangegangenen Kapitel angestellten Überlegungen zur Entstehung der abplattungsbedingten lokalen Schubspannungen. Auch hier hat die Anwesenheit des Störkörpers Reifensensor nur einen geringen Einfluß.

Unter den gleichen Betriebsbedingungen können auch die Verformungen des Laufstreifens in Querrichtung berechnet werden, **Bild 73**.



**Bild 73:** Berechnete Profilelementverformungen in Querrichtung mit und ohne Reifensensoren bei Reibwert  $\mu=0$  und Reibwert  $\mu=0.3$ . PVS=Profilelementverformungssensor, MPR=mittlere Profilrippe, RPR=rechte Profilrippe, Fries [24]

Hier zeigen sich Unterschiede zwischen den Verformungen in der Mittelrippe (untere Bildhälfte) und der rechten Profilrippe (obere Bildhälfte). Das nach außen hin ansteigende Verformungsniveau kann mit dem Borstenmodell des Reifens erklärt werden.

Für die Verformungen in Querrichtung sind im Unterschied zur Längsrichtung keine signifikanten Änderungen zwischen rollender (nach oben gerichtete Dreiecke) und statischer Rechnung vorhanden. Dies hängt sehr wahrscheinlich damit zusammen, daß die in Längsrichtung stattfindende Ab-

rollbewegung besonders auch die in Längsrichtung wirkenden Schubspannungen beeinflusst bzw. homogenisiert.

Eine Verringerung des Reibwerts auf  $\mu=0$  (nach unten gerichtete Dreiecke) zeigt erwartungsgemäß keine Auswirkungen auf die Verformungen des stehenden Reifens in der mittleren Profilrippe, da hier das Verformungsniveau ohnehin sehr klein ist. Die Verformungen in der rechten Profilrippe werden demgegenüber sehr stark von ca. 0.2 mm auf nur noch 0.02 mm reduziert. Dieser Aspekt kann insbesondere für die Reibwerterkennung mit Hilfe der Reifensensoren von Interesse sein.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Simulationsrechnungen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Versuchen. Die Isolation von einzelnen Effekten, wie z.B. Reibwertvariationen, gelingt sehr gut und kann zum grundlegenden Verständnis der lokalen Effekte in der Aufstandsfläche beitragen. Die Bedingungen der FEM Simulation sind allerdings idealisiert, und die Überlagerung von in der Praxis auftretenden Störeffekten, von denen leider eine Vielzahl existieren, ist nicht möglich. Letzendlich muß das Experiment Aufschluß über das Potential der Reifensensorik zur Reibwerterkennung geben.

## 4.3 Ergebnisse mit der Reifensensorik

Die Grundlagen der reibwertabhängigen lokalen Effekte in der Aufstandsfläche, die im vorangehenden Kapitel numerisch simuliert wurden, spiegeln sich in den Signalen der Darmstädter Reifensensoren wider. Zur Untersuchung der dabei auftretenden Wirkungsmechanismen sind quasistationäre und dynamische Untersuchungen auf Prüfständen und im Fahrversuch geeignet.

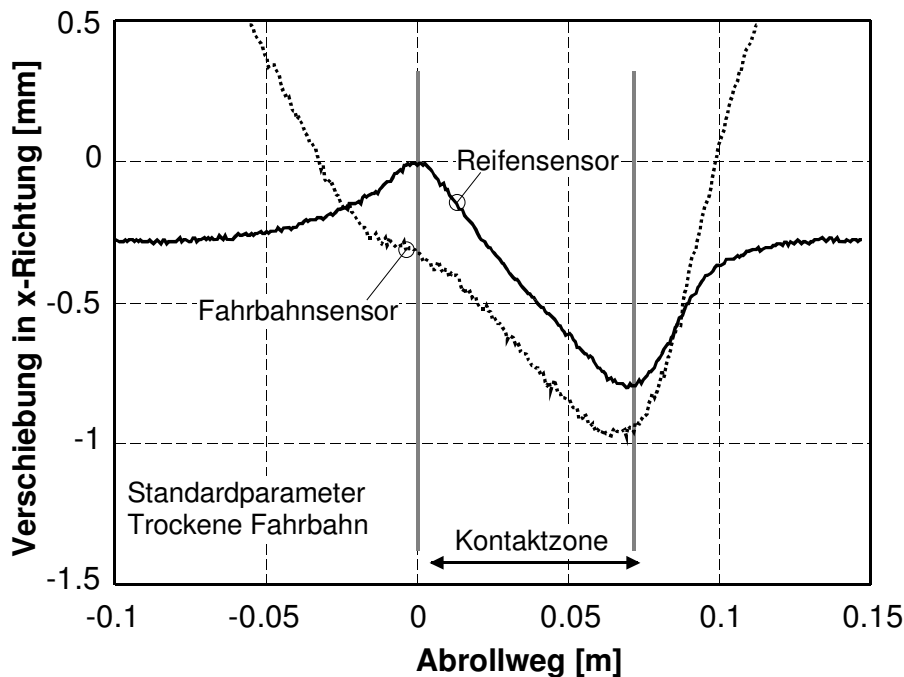
### 4.3.1 LINUS, quasistationäre Untersuchungen

Der Prüfstand LINUS (Kapitel 2.1) bietet nicht die Option, den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn kontinuierlich zu verändern. Es besteht nur die Möglichkeit, durch Aufbringen eines Zwischenmediums, im konkreten Fall Seifenlösung, den Reibwert drastisch auf Werte nahe Null zu reduzieren. Dieser Zustand entspricht in etwa einer vereisten Fahrbahnoberfläche.

Obwohl der Prüfstand LINUS vor allem wegen seiner langsamen Abrollgeschwindigkeit den realen Verhältnissen eines Pkw auf einer Asphaltfahrbahn nicht entspricht, können dennoch grundlegende Zusammenhänge der lokalen Effekte und auch der Reibwerterkennung mit den oben genannten Einschränkungen untersucht werden.



In **Bild 74** sind das Reifensensorsignal und das Fahrbahnsensorsignal, bezogen auf den gleichen Magneten im Profilelement, für den freirollenden Reifen auf trockener Fahrbahn gegenüber gestellt



**Bild 74:** Reifensensor- und Fahrbahnsensorsignal in Längsrichtung, Prüfstand LINUS, trockene Fahrbahn, freirollend

(vgl. Kapitel 2.3, **Bild 25**).

Der Reifensensor zeigt die Profilelementverformung in Längsrichtung entsprechend dem Borstenmodell des Reifens an.

Im Einlaufbereich treten Verformungen in positiver Richtung (in Fahrtrichtung) auf, die in der Latschmitte wieder etwa auf den Wert Null zurückgehen. Gegen Ende der Kontaktzone entstehen

Verformungen entgegen der Drehrichtung, die erst nach dem Verlassen des Reifenlatschs abgebaut werden (vgl. auch Kapitel 1.2.4). Das Signal des Fahrbahnsensors zeigt die Bewegung des Magneten im Profilelement relativ zur Fahrbahn. Dies entspricht den elastischen Verformungen des Gummis zwischen Fahrbahnoberfläche und Magnet. Auch hier ist erwartungsgemäß der gleiche abplattungsbedingte elastische Verformungsverlauf zu beobachten. Der Übersichtlichkeit wegen ist in der Darstellung das Signal des Fahrbahnsensors verschoben aufgetragen. Treten keine lokalen Gleitbewegungen auf, so ergibt sich nach geeigneter Kalibrierung (Kapitel 2.5) ein konstantes Verhältnis zwischen den elastischen Verformungen zwischen Gürtel und Magnet bzw. Magnet und Fahrbahnoberfläche. Dieses Verhältnis, das auf den geometrischen Abständen der beiden Sensoren vom Magnet bzw. den Gummieigenschaften beruht, wird durch das Auftreten von lokalen Gleitbewegungen gestört. Diese sind prinzipbedingt nur in dem Signal des Fahrbahnsensors sichtbar und können als Differenz zum Zustand ohne Gleitbewegungen abgelesen werden.

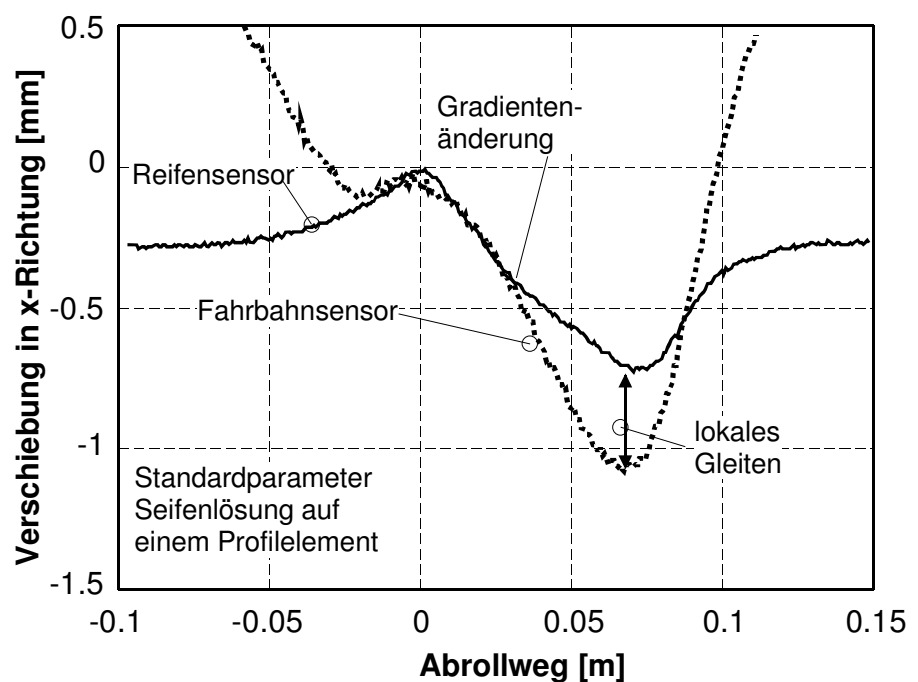
Unter den Standardbedingungen treten freirollend auf trockener Fahrbahn keine meßbaren Gleitbewegungen auf. Dies kann auch mit anderen Meßanordnungen des Fahrbahnsensors experimentell nachgewiesen werden. Variationen des Reibwerts müßten nach den im Abschnitt 4.1 angestellten Überlegungen zu einer Veränderung der lokalen abplattungsbedingten Schubspannungen und dementsprechend zu einer Veränderung der Reifen- bzw. Fahrbahnsensorsignale führen.

Die Simulationsergebnisse aus Abschnitt 4.2 lassen erwarten, daß eine Verringerung der Profileformationen auftritt. Daneben müßte durch das Überschreiten des lokalen Reibwertmaximums lokales Gleiten auftreten, das mit dem Fahrbahnsensor erfassbar ist.

Das Überschreiten des lokalen Reibwertmaximums muß über die in Kapitel 3.3 erläuterten Zusammenhänge der Gummireibung auch zu charakteristischen Änderungen im Reifensensorsignal führen. Dort wurde formuliert, daß der Anteil der Gummireibung, der auf Basis niedriger Gleitgeschwindigkeit „haftend“ übertragen wird, größer ist als der Teil, der bei höheren Gleitgeschwindigkeiten „gleitend“ übertragen werden kann. Daher bedeutet das Überschreiten des lokalen Reibwertmaximums einen Wechsel im Mechanismus der Gummireibung und bewirkt ähnlich wie bei der Coulombschen Reibung einen nichtlinearen Abfall der übertragenen lokalen Kräfte und der korrespondierenden elastischen Profilelementverformung.

Zur Variation des Reibwerts auf LINUS wurde ein mit dem Sensor ausgerüsteter Profilstollen des Versuchsreifens mit Seife präpariert. Das Abrollen des so vorbereiteten Reifens unter Standardbedingungen ergibt die in **Bild 75** aufgetragenen Signale von Fahrbahn- und Reifensensor.

Die Reduktion des Reibwerts durch die Seifenlösung führt zu lokalen Gleitvorgängen, die als Differenz zwischen Fahrbahn- und Reifensensorsignal abgelesen werden können. Wahlweise kann auch der Vergleich mit dem Fahrbahnsensorsignal



**Bild 75:** Reifensensor- und Fahrbahnsensorsignal in Längsrichtung, Prüfstand LINUS, ein Profilelement mit Seife präpariert

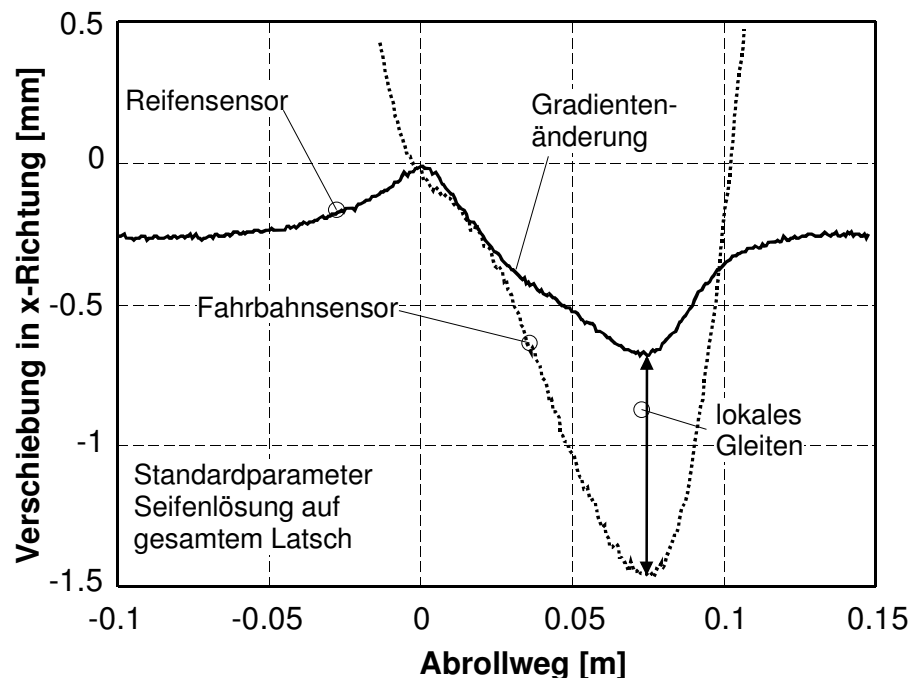
der obigen Messung erfolgen. Der Ort des Auftretens der lokalen Gleitvorgänge sowie deren Amplitude kann auf diese Weise bestimmt werden.

Die mit dem Reifensensor gemessenen Profilelementverformungen reagieren ebenfalls mit charakteristischen Unterschieden auf die veränderten Reibwertbedingungen. Zum einen ist eine deutliche Gradientenänderung an der Stelle zu erkennen, an der auch das lokale Gleiten auftritt. Dies ist auf

die vorher beschriebenen Zusammenhänge des haftenden und gleitenden Gummimaterials zurückzuführen. Entsprechend der Definition von Roth [101] kann hier von einer Veränderung der Profilelementverformungsgeschwindigkeit in Zusammenhang mit der Erscheinung von lokalen Gleitvorgängen gesprochen werden. Die veränderten Reibbedingungen führen zu Beschleunigungen der Profilelemente, die in Form von Gradientenänderungen im Reifensensorsignal sichtbar werden. Die von Roth formulierten Hypothesen können so experimentell bestätigt werden. Ebenso tritt die aus der Simulation zu erwartende Verringerung der Amplituden des Verformungssignals in x-Richtung auf.

Noch deutlicher sind diese Effekte bei einer Präparierung des gesamten Reifenlatschs mit einer Seifenlösung zu beobachten. Der Reibwert sinkt dabei auf  $\mu=0.1$  und es zeigen sich die in **Bild 76** dargestellten Signalverläufe.

Die Gradientenänderung im Reifensensorsignal wird noch etwas deutlicher und die entsprechenden lokalen Gleitvorgänge steigen stark an. Der in dieser Ansicht abgelesene Wert von ca. 0.8 mm muß noch um den Faktor 1.8 vermindert werden, da das Fahrbahnsensorsignal zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit zum Reifensensor in den drei obigen



**Bild 76:** Reifensensor- und Fahrbahnsensorsignal in Längsrichtung, Prüfstand LINUS, Fahrbahn mit Seife präpariert

Darstellungen mit diesem Kalibrierfaktor multipliziert wurde (siehe Kapitel 2.5). Damit ergibt sich ein Wert von ca. 0.44 mm, der in etwa vergleichbar mit dem Betrag des lokalen Gleitens ist, der auf trockener Fahrbahn, verursacht durch eine extreme Verringerung des Reifeninnendrucks, auftritt (vgl. Kapitel 3.1.3, **Bild 39**).

Insgesamt sind im Verhältnis zu dem sehr stark verringerten Reibwert die erkennbaren Auswirkungen im Signal des Reifensensors relativ klein.

Dies hängt damit zusammen, daß auf LINUS die sehr niedrigen Geschwindigkeiten und geringen Anregungsfrequenzen den Abbau der Verformungen behindern. Im folgenden werden Untersu-

chungen bei höheren Geschwindigkeiten diskutiert, die deutlich größere Einflüsse des Reibwerts auf die Signalamplituden zeigen. Außerdem enthält das Signal des Reifensensors der 2. Generation einen nicht unerheblichen Anteil an Verformungen, die zwar abplattungsbedingt sind, jedoch nicht auf die Schubspannungen in der Aufstandsfläche, sondern vielmehr auf innere Verzwängungen im Laufstreifen zurückzuführen sind. Die in Kapitel 2.5 erläuterten Kalibrierversuche lassen vermuten, daß bei dieser Sensorgeneration nur etwa 20 % des Signalinhalts auf reibwertabhängige lokale Schubspannungen zurückzuführen sind.

Der Reifensensor der 2. Generation ist also speziell für die Reibwerterkennung nicht ideal geeignet. Trotz dieser ungünstigen Eigenschaften ist eine Erkennung von Reibwerten möglich, wie auch die in den folgenden Kapitel enthaltenen Ergebnisse auf realen Fahrbahnen zeigen. Der Einfluß von Längs- und Querkräften auf die Verformungen des Laufstreifens ist von diesen Problemen nicht betroffen, wie auch die Ergebnisse von Bachmann [6] belegen. Hier werden den abplattungsbedingten Verformungen relativ große Effekte überlagert, so daß bei der Betrachtung der Änderungen im Signal in Folge der äußeren Kräfte die abplattungsbedingte Grundverformung eine vernachlässigbare Größe ist.

Neuere Sensorgenerationen mit der Anordnung von Sensor und Platine außerhalb des Gürtels (siehe auch Kapitel 1.2.4) sind besser in der Lage, Verformungen zu messen, die von den lokalen Schubspannungen in der Aufstandsfläche herrühren. Eine Verbesserung der Reibwerterkennung war mit diesen Sensoren bisher jedoch bisher nicht möglich. Die starke Erhöhung der Flächenpressung an den Stellen des Laufstreifens, an denen die Sensoren eingebracht sind, verändert lokal die Reibbedingungen und behindert das Auftreten von lokalen Gleitbewegungen. Neueste Entwicklungen wie der Reifensensor der 4. Generation lassen erwarten, daß durch die Verkleinerung des Magneten und der Platine die Störung der Profilelementkinematik nicht so stark ausfällt. Eine verbesserte Messung reibwertrelevanter Effekte erscheint damit möglich.

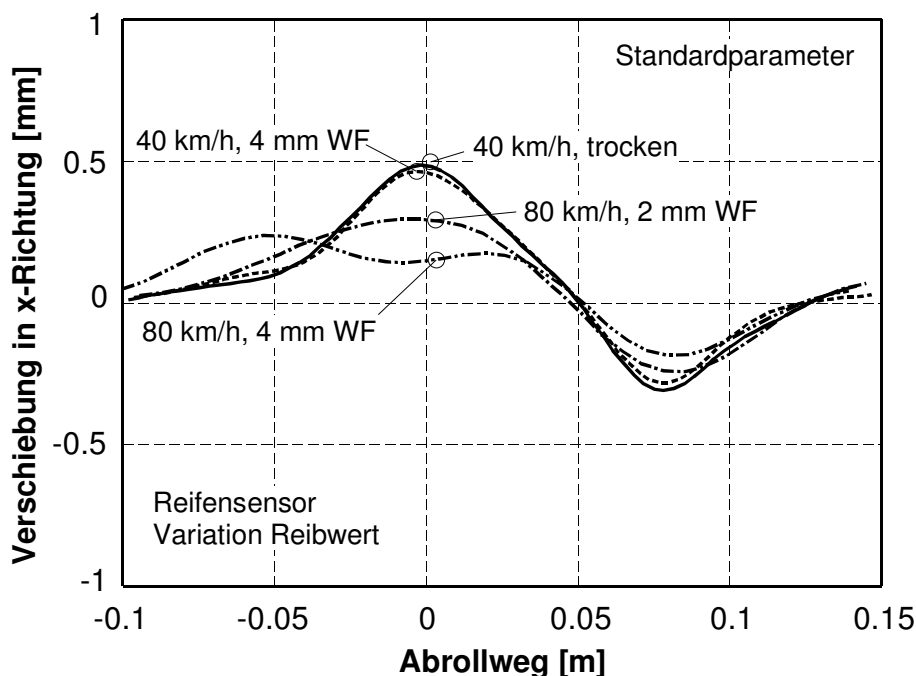
### **4.3.2 IPS, dynamische Untersuchungen**

Im Innentrommelprüfstand der Bundesanstalt für Straßenwesen sind im Rahmen dieser Arbeit Messungen der Profilementverformungen und der lokalen Gleitbewegungen bei Variation des Reibwerts zwischen Reifen und Straße durchgeführt worden. Der Vorteil gegenüber Untersuchungen auf realen Straßen ist hier die einfache Bestimmung des Maximalreibwerts. Die dazu erforderliche Messung der Reibwert-Schlupf-Kurve gehört im Innentrommelprüfstand zu den Standardversu-

chen. Im Fahrversuch ist demgegenüber die Bestimmung des Reibwerts sehr aufwendig. Entweder wird dazu ein Reifenmeßanhänger oder ein anderes vergleichbares Meßinstrument mitgeführt, oder man beschränkt sich auf eine Klassifizierung des Reibwerts in groben Stufen. So können Reibwertuntersuchungen auf trockenen, nassen, schneebedeckten oder vereisten Fahrbahnoberfläche ohne genaue Kenntnis des exakten Reibwerts orientierend erfolgen. Insbesondere auf nassen Fahrbahnen kommt erschwerend dazu, daß sowohl die Erzeugung als auch die Messung von definierten Wasserfilmhöhen nur sehr schwer möglich ist.

Im Innentrommelprüfstand kann speziell dies zu einer einfachen, gut reproduzierbaren Variation des Reibwerts genutzt werden.

Die Reifensensorsignale in x-Richtung unter den in dieser Arbeit variierten Reibwertbedingungen



sind in **Bild 77** dargestellt. Ausgehend vom trockenen Fahrbahnzustand wurden Wasserfilmhöhe und Geschwindigkeit mit den in **Bild 41** erkennbaren Auswirkungen auf den maximalen Reibwert erhöht.

Die Signalverläufe für 40 km/h auf trockener Fahrbahn und auf Wasserfilmhöhen von 2 mm zeigen keine Unterschiede, obwohl der Reibwert von ca.  $\mu=0.95$  auf  $\mu=0.85$  fällt. Erst das Signal bei 4 mm Wasserfilm ( $\mu=0.8$ ) zeigt eine kleine Änderung in der Höhe der Amplituden. Die Ursache dafür kann daraus abgeleitet werden, daß die abplattungsbedingten Schubspannungen den Reibwert zwischen Gummi und Fahrbahn lokal überschreiten müssen, damit die Amplituden des x-Signals merklich zurückgehen. Dazu muß ein je nach Betriebszustand des Reifens unterschiedlich hoher Reibwert unterschritten werden. Oberhalb dieses Reibwerts reichen die lokalen Schubspannungen in der Aufstandsfläche nicht aus, um den vorhandenen Reibwert zu erschöpfen. Dementsprechend sind keine Änderungen im Reifensensorsignal zu registrieren. Damit ergibt sich eine Analogie zu der Abhängigkeit der Anfangsstei-

**Bild 77:** Reifensensorsignale in x-Richtung, Variation Fahrbahnzustand, IPS, freierollend

Die Signalverläufe für 80 km/h auf trockener Fahrbahn und auf Wasserfilmhöhen von 2 mm zeigen keine Unterschiede, obwohl der Reibwert von ca.  $\mu=0.95$  auf  $\mu=0.85$  fällt. Erst das Signal bei 4 mm Wasserfilm ( $\mu=0.8$ ) zeigt eine kleine Änderung in der Höhe der Amplituden. Die Ursache dafür kann daraus abgeleitet werden, daß die abplattungsbedingten Schubspannungen den Reibwert zwischen Gummi und Fahrbahn lokal überschreiten müssen, damit die Amplituden des x-Signals merklich zurückgehen. Dazu muß ein je nach Betriebszustand des Reifens unterschiedlich hoher Reibwert unterschritten werden. Oberhalb dieses Reibwerts reichen die lokalen Schubspannungen in der Aufstandsfläche nicht aus, um den vorhandenen Reibwert zu erschöpfen. Dementsprechend sind keine Änderungen im Reifensensorsignal zu registrieren. Damit ergibt sich eine Analogie zu der Abhängigkeit der Anfangsstei-

gung der  $\mu$ -s Kurve vom Maximalreiwert. Auch hier muß das abplattungsbedingte Schubspannungsniveau lokal den Reiwert in nennenswerter Weise beanspruchen, damit der Reiwert-Schlupf Verlauf von Beginn an flacher wird (vgl. Kapitel 3.3).

Wird die Fahrgeschwindigkeit bzw. der Wasserfilm weiter erhöht, so zeigen sich deutliche Änderungen bei den Verformungen des Laufstreifens in Längsrichtung. 80 km/h auf einem Wasserfilm von 2 mm verursachen bereits deutlich geringere Verformungen in Längsrichtung aufgrund der Überschreitung des dann noch vorhandenen Reiwertpotentials von ca.  $\mu=0.75$ . Besonders niedrige Verformungen sind im Einlaufbereich in den Reifenlatsch zu beobachten. Es kann vermutet werden, daß die Verdrängung des Wassers aus der Aufstandsfläche bis zum Ende des Reifenlatschs vollständig gelungen ist und an dieser Stelle der Reiwert wieder ansteigt.

Die Kurve für 80 km/h und 4 mm Wasserfilm zeigt deutlich die bereits bei Stöcker [114] beschriebenen Aquaplaningeffekte. Durch das Eindringen des Wasserkeils in die Aufstandsfläche entsteht ein hervortretender Buckel im Signal vor Erreichen der Kontaktzone. Dieser Effekt konnte in dieser Arbeit erstmals am profilierten Reifen nachgewiesen werden. Darüber hinaus konnte erstmals gezeigt werden, daß der charakteristische Signalverlauf selbst bei Betrieb des Reifens im Reiwertmaximum bei hohen Schlupfwerten erhalten bleibt. Dies bedeutet eine wesentliche Steigerung des Potentials der Reifensensorik zur Erkennung von Aquaplaningzuständen im fahrenden Kraftfahrzeug, da z.B. auch frontgetriebene Fahrzeuge dieses Potential nutzen können.

Weiterhin kann innerhalb der Kontaktzone ein noch einmal gesteigertes Absinken der Amplituden der Verformung in Längsrichtung beobachtet werden. Dieser Effekt ist nach den Ergebnissen der Simulation zu erwarten und zeigt sich hier sehr deutlich.

Roth formulierte in seiner Arbeit die Hypothese, daß eine Überschreitung des lokalen Reiwerts zu lokalen Gleitvorgängen führt, die in Form einer Gradientenänderung im Reifensensor x-Signal sichtbar werden. Prinzipiell kann diese Annahme experimentell bestätigt werden (vgl. Abschnitt 4.3.1). Zur mathematischen Beschreibung dieses Effekts definierte er den Kennwert  $K_s$ :

$$K_s = C_{K_s} \cdot \frac{\frac{dPEV_x}{dx} \Big|_{\frac{x_{(PEV, \min)} - x_{(PEV, \max)}}{2}}}{\frac{PEV_{\max} - PEV_{\min}}{x_{(PEV, \min)} + x_{(PEV, \max)}}} \xrightarrow{\text{Standardparameter}} \mu_{\max} \quad (20)$$

In der Gleichung wird die Steigung des x-Signals in der Latschmitte durch die mittlere Steigung über den gesamten Latsch dividiert. Damit entsteht ein Maß für die Änderung der Verformungsge-

schwindigkeit in der Latschmitte im Vergleich zu der Verformungsgeschwindigkeit der restlichen Kontaktzone. Eine Änderung der Verformungsgeschwindigkeit ist gleichbedeutend mit einer lokalen Beschleunigung.

Betrachtet man die Meßsignale, die bei den verschiedenen Reibwertbedingungen im IPS aufgenommen wurden, bzw. berechnet man den Faktor  $K_s$ , wird schnell ersichtlich, daß sich keine signifikanten Unterschiede für die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen ergeben. Es sind auch optisch nur kleine Gradientenänderungen zu erkennen, auf die der Kennwert ansprechen würde. Ähnliche Beobachtungen konnten auch im Fahrversuch auf einer Vielzahl unterschiedlicher Oberflächen gemacht werden, Bachmann [6].

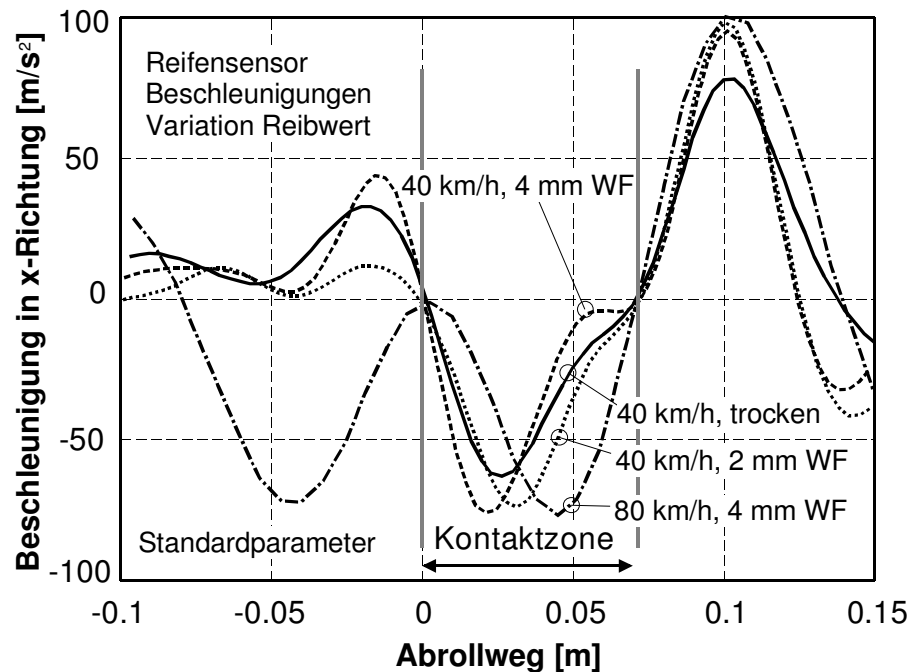
Die Ursache für die geringe Empfindlichkeit des Kennwertes  $K_s$  liegt zum einen darin, daß die maximal zu erwartenden Gradientenänderungen, wie z.B. auf LINUS mit Seifenlösung und einem Reibwert von  $\mu=0.1$ , **Bild 76**, selbst unter idealen Bedingungen nur sehr schwach ausfallen. Der Grund dafür kann der hohe nicht reibwertrelevante Anteil an dem Verformungssignal des Reifensensors sein. Diese obere Grenze für das Auftreten solcher Signaländerungen wird naturgemäß auf realen Fahrbahnen in der Regel nicht erreicht, da die zu Grunde liegenden Reibwerte hier viel höher sind. Mit Ausnahme des Zustandes Glatteis sind also immer weniger signifikante berechnete Kennwerte zu erwarten. Erschwerend kommt hinzu, daß auf realen Fahrbahnen mit ihrer ausgeprägten Mikro- und Makrotextur alle nur denkbaren Signalverformungen auftreten können (Bachmann [6]). Diese unter Umständen auch durch Fremdkörper auf der Fahrbahn verursachten Signalabweichungen können den Kennwert  $K_s$  stark verfälschen.

Eine zweite Ursache läßt sich aus der Entstehung der lokalen abplattungsbedingten Schubspannungen ableiten. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, entstehen die Schubspannungen in der Aufstandsfläche aus der Überlagerung der durch den Innendruck hervorgerufenen Zugspannungen in der Reifenstruktur mit den Reibkräften aus Flächenpressung und Reibwert. Daneben spielen innere Verzäugungen im Laufstreifen, der nicht unendlich dünn und flexibel ist, eine Rolle. Schließlich führt die Abplattung eines kreisrunden Körpers immer zu entsprechenden horizontalen Schüben in der Kontaktzone, die auch an einem nicht unter Innendruck stehenden Vollgummirad zu beobachten sind, Clark [23]. Alle diese Mechanismen zusammen lassen erwarten, daß die Entstehung der lokalen Kräfte und auch deren Änderung bei Variation des Reibwerts, vom Gummi gedämpft, sehr harmonisch und kontinuierlich verlaufen. Extreme Sprünge in den Signalen sind wegen der wirkenden Mechanismen und der hohen Dämpfung des Gummis sowie wegen des zusätzlich integrierenden Verhaltens des Reifensensors nicht zu erwarten.

Da es sich beim Kennwert  $K_s$  um eine mathematische Größe handelt, die Änderungen einer Geschwindigkeit, also Beschleunigungen, beschreibt, bietet es sich zur genaueren Analyse an, die Profilelementbeschleunigungen selbst zu berechnen. Für die im Innentrommelprüfstand untersuchten Reibwertbedingungen erhält man aus dieser Berechnung die in **Bild 78** dargestellten Werte. Die höchsten Beschleunigungen von ca.  $100 \text{ m/s}^2$  werden beim Zurückschnappen der Profilelemente nach dem Verlassen des

Reifenlatschs erreicht. Hier sind durchaus Korrelationen mit dem Reifengeräusch denkbar, die in Zukunft näher untersucht werden sollten.

In der Mitte der Kontaktzone, an der Stelle, an der eine Komponente von  $K_s$  berechnet wird, sind keine auffälligen Unterschiede unter den verschiedenen Versuchsbedingungen zu



**Bild 78:** Reifensensorsignale Beschleunigungen in x-Richtung, Variation Fahrbahnzustand, IPS

beobachten. Die Kurven für 40 km/h Fahrgeschwindigkeit zeigen annähernd gleiche Werte an dieser Stelle. 80 km/h Fahrgeschwindigkeit führen unter normalen Umständen zu einer Erhöhung der Beschleunigungen um den Faktor vier. Die Reduzierung der Amplituden der Profilelementverformungen durch den geringeren Reibwert auf 4 mm Wasserfilm hat in diesem Fall zu einer entsprechenden Verringerung der Beschleunigungen geführt. Dadurch werden wieder ähnliche Werte erreicht, wie bei 40 km/h. Die Beschleunigungen bei 80 km/h und 2 mm Wasserfilm sind in der Darstellung nicht enthalten, da sie den durch die Skalierung vorgegebenen Rahmen weit überschreiten.

Signifikante Unterschiede in den Beschleunigungen zwischen den verschiedenen Reibwertniveaus treten, abgesehen von der durch Aquaplaningeffekte hervorgerufenen Beschleunigungsspitze vor Latschbeginn beim 80 km/h Signal, besonders kurz vor Erreichen des Latschendes auf. An dieser Stelle sind die Verformungen in Längsrichtung maximal, während gleichzeitig die Flächenpressung abzufallen beginnt. Die Kombination dieser beiden Umstände begünstigt das Auftreten von lokalen Gleitbewegungen, da hohe lokale Schubspannungen bei niedriger Flächenpressung den Reibwert schnell erschöpfen können.



So scheinen bei 40 km/h und 4 mm Wasserfilmhöhe die Beschleunigungen in x-Richtung früher abzunehmen. Das Profilelement verringert seine Verformungsbeschleunigung, die im Latschende ca. Null ist, einige Zeit vor der Stelle, an der dies bei günstigeren Reibwertbedingungen erfolgt. Es zeigt sich zudem eine Unstetigkeit im Signalverlauf, die auf lokales Gleiten an dieser Stelle hindeutet. Einschränkend muß jedoch angemerkt werden, daß auch diese Effekte nicht sehr deutlich zu Tage treten und besonders für die Beschleunigungen des 80 km/h Signals nicht zu beobachten sind. Obwohl hier der Reibwert niedriger und die Verformungsamplituden kleiner sind, ist der Signalverlauf der Beschleunigungen über den gesamten Latsch relativ harmonisch. Möglicherweise führen die Aquaplaningeffekte hier zu homogen verteilten Gleitvorgängen in der Aufstandsfläche.

Insgesamt zeigt auch die direkte Analyse der Profilelementbeschleunigungen zwar plausible Einflüsse des Reibwerts auf die gemessenen Werte, besonders zuverlässige Informationen lassen sich jedoch auch daraus nicht ableiten. Dies gilt um so mehr, da die zweifache Ableitung des Reifensensorsignals sehr störanfällig ist und zumindest eine Echtzeitberechnung mit geeigneter Filterung einen vergleichsweise hohen Aufwand erfordert.

Die deutlichste Aussagefähigkeit in Bezug auf den Reibwert kann der Höhe der Amplituden des x-Signals unterstellt werden. Dementsprechend kann ein neuer Kennwert definiert werden, der aus dem Verhältnis der Amplitudenhöhe zur Latschlänge eine Information über den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche ableitet. Die Latschlänge bestimmt maßgeblich die Höhe der zu erwartenden Amplituden des x-Signals, da sie ein Maß für die Einfederung des Reifens darstellt. Ein stärker abgeplatteter Reifen verursacht in der Kontaktzone auf Grund der höheren kinematischen Verzweigungen bei seiner Geometrieänderung größere abplattungsbedingte Schübe, sofern der Reibwert zwischen Gummi und Fahrbahn für deren Aufrechterhaltung ausreicht. Ein Kennwert, der diesen Zusammenhang mathematisch beschreibt, kann wie folgt definiert werden:

$$K_{AV} = \frac{PEV_{\max} - PEV_{\min}}{C_{KAV}} \cdot \frac{\text{Standardparameter}}{\mathcal{X}(PEV, \min) + \mathcal{X}(PEV, \max)} \rightarrow \mu_{\max} \quad (21)$$

Der Kennwert bildet das Verhältnis aus Maximalamplitude des x-Signals und der Latschlänge und vergleicht dieses Verhältnis mit einer Konstante, die den Verhältniswert für optimale Reibwertbedingungen definiert. Das Verhältnis von Amplituden zu Latschlänge ergibt analog zu dem von Roth entwickelten Kennwert  $K_s$  die mittlere Steigung des x-Signals innerhalb des Reifenlatsches. Diese mittlere Steigung wird mit einer Sollsteigung für gute Reibwertbedingungen verglichen, die von einer Reihe von Betriebsparametern abhängig ist. So hat insbesondere der Reifeninnendruck einen

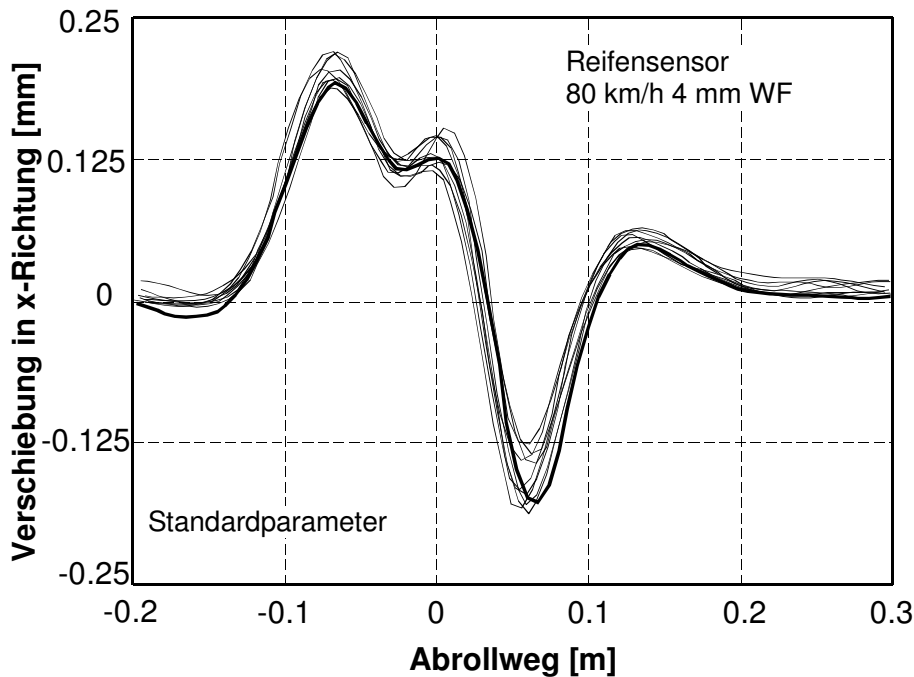
großen Einfluß auf die zugrundeliegende Sollsteigung des  $x$ -Signals. Die Radlast beeinflusst demgegenüber die Steigung des  $x$ -Signals nicht, da eine Erhöhung der Radlast zu einer Verlängerung des Reifenlatsches mit proportional ansteigenden Reifensensorsignalen führt.

Im Vergleich zu dem von Roth entwickelten Kennwert muß somit für  $K_{AV}$  in Kauf genommen werden, daß nur bei konstantem, bekanntem Reifeninnendruck, bekannter Reifentemperatur, Verschleißzustand etc. eine Aussage möglich ist. Diese zusätzlich beeinflussenden Umgebungsparameter ändern sich im Fahrbetrieb jedoch nur sehr langsam, so daß das bereits bei Bachmann [6] vorgestellte Verfahren der Autokalibrierung genutzt werden kann. Das Verfahren beruht darauf, daß bei stationärer Fahrt unter bestimmten fahrdynamischen Randbedingungen ein Abgleich der Reifensensorsignale mit externen zusätzlichen Sensoren erfolgt. Von Zeit zu Zeit kann dabei auch das Sollverformungssignal für den freirollenden Zustand ermittelt werden. Gegenüber dem Kennwert von Roth hat der hier vorgeschlagene den Vorteil, daß er weniger empfindlich auf Störungen reagiert, in seiner Aussage deutlicher ist und nach ersten orientierenden Versuchen auch bei höherer Reibwertausnutzung durch Bremskräfte arbeitet.

Zukünftige Untersuchungen auf breiterer Datenbasis müssen zeigen, ob der Kennwert  $K_{AV}$  im Fahrbetrieb unter den unvermeidlichen Störeinflüssen der realen Fahrbahn zuverlässige Informationen über den Reibwert zwischen Reifen und Straße liefern kann.

Für eine zuverlässige Ableitung von Informationen aus den Reifensensorsignalen ist Grundvoraussetzung, daß die Signale unter gleichen Umgebungsbedingungen wenigstens reproduzierbar sind und keine allzu großen Schwankungen von einer Radumdrehung zur nächsten auftreten. Für den Innentrommelprüfstand konnte unter allen Betriebsbedingungen eine hervorragende Reproduziergenauigkeit und Signalkonstanz beobachtet werden.

Als Beispiel sind in **Bild 79** die Signale von 10 aufeinanderfolgenden Radumdrehungen aufgetragen. Selbst unter den inhomogenen Bedingungen des bei 80 km/h und 4 mm Wasserfilm einsetzen-



den Aquaplanings kann eine gute Übereinstimmung der Signale festgestellt werden. Der Innentrommelprüfstand verfügt allerdings über eine Fahrbahn hoher Homogenität und geringer Unebenheit. Außerdem wird vom Versuchsreifen immer die gleiche Spur benutzt, und es werden sehr oft gleiche Abschnitte überrollt. Im Fahrversuch sind diese

**Bild 79:** Reifensensorsignale in x-Richtung, 10 Überrollungen, IPS, 80 km/h, 4 mm Wasserfilm

Umstände nicht gegeben. Hier wechseln Fahrbahnbelag und Textur sehr schnell mit den entsprechenden Auswirkungen auf das Sensorsignal. Zur Abschätzung der in der Realität auftretenden Effekte werden im folgenden Kapitel Signale aus dem Fahrversuch diskutiert, die der Arbeit von Bachmann [6] entnommen sind.

### 4.3.3 Fahrversuch

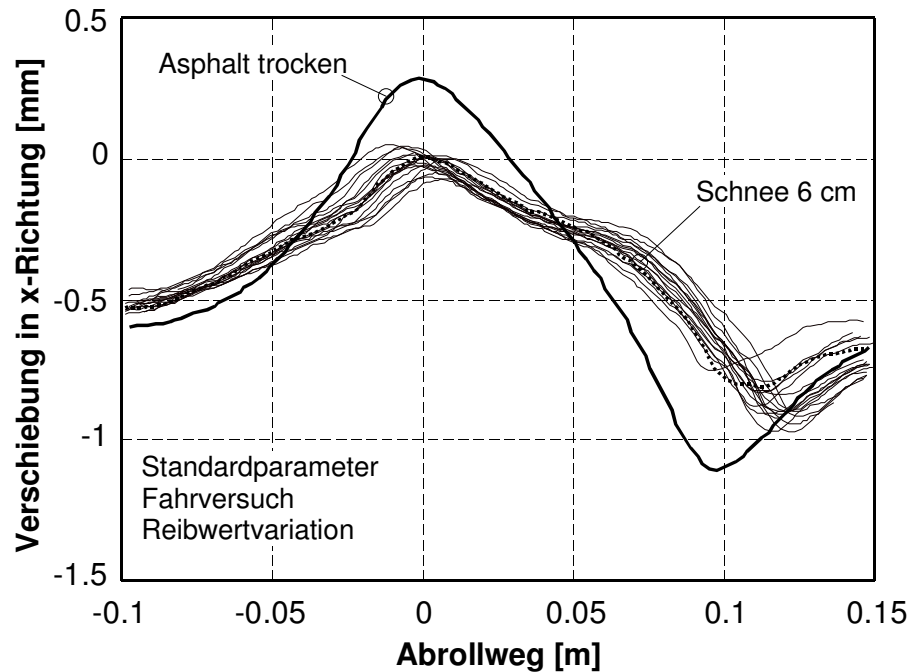
Im Fahrversuch können prinzipiell ähnliche Effekte wie im Innentrommelprüfstand beobachtet werden. Besonders die Wirkung von Kräften am Rad auf die Sensorsignale entspricht sehr genau den im IPS ermittelten Ergebnisse. Einzig die Variationen der Umgebungsparameter ist im Fahrversuch nicht so gut möglich wie auf einem Prüfstand. Es kommt immer zur mehr oder weniger ausgeprägten Überlagerungen von Betriebsparametern, die unter Umständen in ihrer Wirkung nur schwer getrennt werden können. Ebenso schwierig gestaltet sich die Erzeugung definierter Schlupfzustände oder gar die Messung im instationären Bereich der Reibwert-Schlupf-Kurve. Für solche Untersuchungen muß ein Meßanhänger oder ein Prüfstand benutzt werden.

Von größtem Interesse für den Einsatz des Reifensensors in zukünftigen fahrzeugtechnischen Systemen zur Steigerung der Aktiven Sicherheit ist die Reibwerterkennung. Im Fahrversuch muß sich das Potential des Sensors hierzu beweisen. Schwierig ist dabei die Bestimmung des tatsächlich

zwischen Reifen und Fahrbahn vorliegenden aktuellen Reibwerts. Dies erfordert eigentlich die separate Messung mit Hilfe eines geeigneten Werkzeugs. Wenn ein solches nicht verfügbar ist, dann kann der Reibwertzustand der jeweiligen Oberfläche nur grob klassifiziert werden.

Im folgenden sind Messungen auf zwei unterschiedlichen Reibbelägen dargestellt, die auf Teststrecken speziell präpariert und in ihrem Reibwert vorab vermessen wurden. Als Versuchsfahrzeug diente ein Pkw Mercedes-Benz C 180, der Versuchsreifen ist identisch mit dem in der übrigen hier vorliegenden Arbeit verwendeten. An der Vorderachse des Versuchsfahrzeugs herrscht mit 3860 N eine höhere statische Achslast als die in den Standardbedingungen definierte. Entsprechend sind die Profilelementverformungen in  $x$ -Richtung, **Bild 80**, auf trockener Fahrbahn gegenüber den Bedingungen im Innentrommelprüfstand und auf LINUS deutlich erhöht. Die Gesamtamplitude beträgt ca. 1.4 mm im Vergleich zu ca. 0.8 mm unter Standardbedingungen.

Auf einer Schneeoberfläche mit einer Höhe von 6 cm beträgt der Reibwert nur noch ca.  $\mu=0.3$ . Die Reifensensorsignale reagieren darauf ganz ähnlich wie bei einer Reduktion des Reibwerts im Innentrommelprüfstand. Die Gesamtamplitude sinkt deutlich ab und innerhalb des Signalverlaufs zeigen sich deutliche Gradientenänderungen. Bachmann



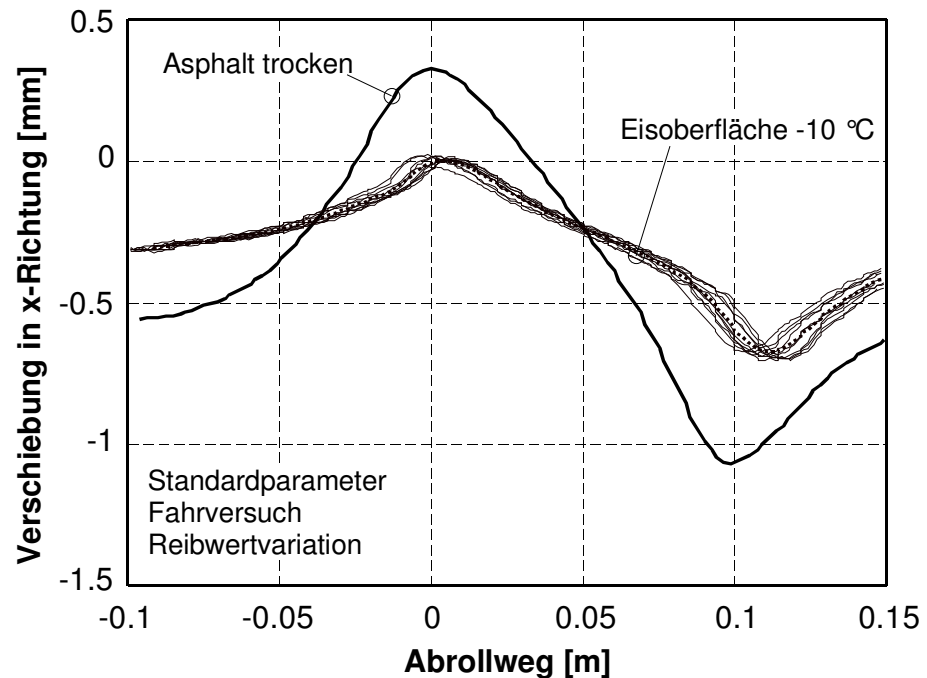
**Bild 80:** Reifensensorsignale in  $x$ -Richtung, 10 Überrollungen, Fahrversuch, Schneeoberfläche nach Bachmann [6]

berechnete aus diesen Signalen den Kennwert  $K_s$  und konnte zeigen, daß unter diesen Umständen eine Übereinstimmung mit dem Reibwert existiert.

Noch extremere Bedingungen herrschen auf einer Eisoberfläche. Der Reibwert von nur noch ca.  $\mu=0.1$  verursacht eine noch stärker verringerte Gesamtamplitude der Verformungen in x-Richtung,

**Bild 81.** Die Reproduziergenauigkeit der Sensorsignale ist unter den gezeigten Bedingungen sehr

gut. Allerdings sind die Ergebnisse auf Fahrbahnen mit solchen extrem niedrigen Reibwerten nicht auf alle Fahrbahnzustände übertragbar. Ähnlich wie auch im IPS ermittelt, sind die Änderungen im Reifensensor-signal bei mittleren bis hohen Reibwerten im Fahrversuch nicht sig-



nifikant. Der Kennwert **Bild 81:** Reifensensorsignale in x-Richtung, 10 Überrollungen, Fahrversuch, Eisoberfläche nach Bachmann [6]

$K_s$  zeigt nur eine ge-

ringe Reaktion, wenn z.B. der Fahrbahnzustand von trocken auf naß geändert wird. Offensichtlich existieren auch hier für den Reibwert Grenzen, oberhalb derer die Reifensensorsignale im freierollenden Zustand keine Abhängigkeit vom Reibwert mehr haben.

Durch den oben beschriebenen neuen Kennwert  $K_{AV}$  können diese Grenzen möglicherweise etwas nach oben verschoben werden. Um dies zu überprüfen, sind jedoch Fahrversuche erforderlich, bei denen der Fahrbahnzustand bzw. der maximale Reibwert genauer als bisher dokumentiert werden muß. Zur Vereinfachung des Meßverfahrens wäre es dabei auch ohne Abstriche in den Ergebnissen möglich, den Sensorreifen direkt auf einem Reifenmeßanhänger zu verwenden. Damit könnte die Messung des Reibwerts zwischen Reifen und Straße und die Messung der korrespondierenden Sensorsignale gleichzeitig erfolgen.

## 4.4 Fazit

Die Reibwerterkennung mit Hilfe der Darmstädter Reifensensorik stellt eines der reizvollsten, aber auch der schwierigsten Forschungsgebiete dar.

Aufbauend auf den Grundlagen der Kinematik des abrollenden Luftreifens wird die Entstehung der abplattungsbedingten lokalen Schubspannungen und der dadurch verursachten Profilelementverformungen hergeleitet. Diese grundlegenden Zusammenhänge konnten mit einfachen Experimenten nachgewiesen werden. Aus den Versuchen wird der qualitative und quantitative Einfluß des Reibwerts auf die lokalen Schübe ersichtlich.

Es wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Continental Simulationsrechnungen auf Basis eines 3 D FEM Programms durchgeführt. Die Ergebnisse geben Aufschluß über die Auswirkungen von Reibwertvariationen auf die Profilelementverformungen im Laufstreifen eines Pkw.-Reifens. Dabei können auch Betrachtungen erfolgen, die experimentell nicht möglich sind. So kann ein Vergleich der Profilelementverformungen mit und ohne eingebrachte Sensoren gezogen werden. In den Ergebnissen sind deutliche Abhängigkeiten der maximalen Verformungsamplituden vom jeweiligen Reibwert festzustellen. Niedrigere Reibwerte führen zu niedrigeren Profilelementverformungen.

Die Überprüfung der theoretischen Erkenntnisse erfolgte anhand experimenteller Untersuchungen auf quasistationären und dynamischen Prüfständen. Mit der Vorrichtung zur Erfassung lokaler Gleitvorgänge kann der Zusammenhang zwischen Gradientenänderungen im Reifensensorsignal und lokalen Gleitvorgängen belegt werden. Die Detektierung dieser Gradientenänderungen sind die Basis der Reibwerterkennung durch das von Roth [101] entwickelte Verfahren. Bei dynamischen Untersuchungen und im Fahrversuch überzeugt dieses Verfahren jedoch nicht vollständig. Die Gradientenänderungen sind nur bei extrem niedrigen Reibwerten signifikant. Höhere Reibwerte führen zu kaum mehr registrierbaren Steigungsänderungen. Zur Verbesserung der Aussagefähigkeit der Reifensensorsignale wird eine neuer Kennwert vorgeschlagen, der auch auf höhere Reibwerte mit einer deutlichen Information reagiert und das Potential hat, auch unter Kraftschlußbeanspruchung besser zu arbeiten.

Die frühzeitige Erkennung von Aquaplaningzuständen am Reifen nach Stöcker [114] konnte bestätigt werden. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, daß die dafür signifikanten Signalformen auch bei extrem hoher Reibwertausnutzung erhalten bleiben.

# 5 Abschließende Betrachtung und Ausblick

## 5.1 Lokales Gleiten

Lokale Gleitbewegungen in der Aufstandszone von Pkw-Reifen haben eine sehr große Bedeutung für die Entstehung der Reibkräfte zwischen Reifengummi und Fahrbahnoberfläche. Sie bestimmen die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Gummimaterial des Laufstreifens und seinem Reibpartner. Damit sind sie zusammen mit der Fahrbahntextur für das Auftreten bestimmter Komponenten der Gummireibung verantwortlich, indem Anregungsfrequenzen entstehen, die zusammen mit den viskoelastischen Eigenschaften des Gummis Reibkräfte erzeugen. Diese Komponenten tragen vor allem zur Reibung auf nassen Fahrbahnen bei und sind deshalb für die Aktive Sicherheit von Kraftfahrzeugen unter diesen kritischen Bedingungen von enormer Bedeutung. Die Entwicklung von Pkw-Reifen beschäftigt sich besonders intensiv mit den Reibungseigenschaften von Reifen auf Nässe, da diese Eigenschaften maßgebliches Bewertungskriterium für die Sicherheit eines Reifens sind.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und untersuchten Aufbauten zur Messung lokaler Gleitbewegungen in der Aufstandsfläche von Pkw-Reifen können einen vertieften Einblick in die Mechanismen der Reibung beim Fahrbahnkontakt des Gummis vermitteln. Durch die neuartige Anordnung eines Sensors in der Fahrbahn ist die Messung im Unterschied zu mechanischen Verfahren rückwirkungsfrei. Je nach Anordnung der verschiedenen Sensoren können lokale Gleitvorgänge mit hoher Präzision aufgelöst werden, wie z.B. bei der Verwendung miniaturisierter Magnete im Kontaktbereich Gummi-Fahrbahn auf dem Prüfstand LINUS. Diese Meßanordnung hat eine Auflösung und auch Genauigkeit von unter 0.1 mm. Die Kombination des Fahrbahnsensors mit dem Darmstädter Reifensensor ist besonders reizvoll, weil hier die gleichzeitige Erfassung von lokalen Gleitvorgängen und elastischen Deformationen möglich ist. Das Wechselspiel dieser beiden Komponenten bestimmt maßgeblich das charakteristische Aussehen der Reibwert-Schlupf-Kurve, wie gezeigt werden konnte. Prinzipbedingt liegt die Genauigkeit dieses Aufbaus wegen der größeren Fehlermöglichkeiten bei der Bestimmung des Grundabstands Sensor - Magnet bei etwa 0.2 mm. Für Messungen auf realistischen Fahrbahn wurde ein Verfahren vorgestellt, das unter Ausnutzung der statistischen Trefferwahrscheinlichkeit arbeitet. Der Nachteil der niedrigeren Auflösung und

Genauigkeit von nur noch ca. 0.3 mm schränkt die Aussagegenauigkeit zwar ein, dafür können aber Parametervariationen bei höheren Geschwindigkeiten und unterschiedlichen Reibwerten untersucht werden, die für den Reifen-Fahrbahnkontakt entscheidend sind.

Die hier vorgestellten Verfahren und Vorrichtungen haben die Möglichkeiten des Sensorreifens erheblich erweitert. So konnten bereits aus den ersten damit durchgeführten Untersuchungen neue Erkenntnisse zur Reibkraftübertragung vom Reifen auf die Fahrbahn abgeleitet werden. Neben diesen grundlegenden Versuchen sind noch eine Vielzahl von tiefergehenden Analysen an der Schnittstelle Reifen-Fahrbahn möglich.

So können z.B. die Messungen auf LINUS mit in den Reifen eingebrachten Miniaturmagneten Aufschluß über die Verteilung der lokalen Gleitbewegungen im Reifenlatsch bis hin zur Verteilung innerhalb eines Profilblocks geben. Mit diesen Analysen wären detaillierte Untersuchungen des Verschleißverhaltens, der Reibungseigenschaften verschiedener Profilgestaltungen oder sogar Korrelationen mit Geräuschemissionen möglich. Besonders die Kenntnis über das Zusammenwirken von Gleitbewegungen und Fahrbahntextur bei der Entstehung der Anregungsfrequenzen der Gummireibung könnte erheblich zur Verbesserung der existierenden Vorhersagemethoden zum Naßgriff beitragen.

Dazu wäre es denkbar, den Prüfstand LINUS mit einer Oberfläche bekannter Textur auszurüsten, um dann unter Variation verschiedener Betriebsparameter die auftretenden Gleitgeschwindigkeiten zu messen. Unter der Annahme, daß sich bei dem langsam laufenden Prüfstand LINUS bei hoher Kraftschlußausnutzung die optimalen Gleitgeschwindigkeiten von selbst einstellen, könnte eine sehr wertvolle Information über die ideale Gleitgeschwindigkeit zwischen Gummi und Fahrbahn abgeleitet werden. Dabei könnten neben den äußeren Kräften auch Parameter wie die Reifentemperatur variiert werden, die einen großen Einfluß auf das Frequenzverhalten des Gummis haben. Auch eine Benetzung der Fahrbahn mit Wasser ist bei einer geeigneten Textur denkbar.

Die direkte Messung von Anregungsfrequenzen durch Analysen des Reifensensorsignals erscheint demgegenüber wenig erfolgversprechend, da erwartet werden kann, daß die Frequenzen, die für die Reibung maßgeblich sind, entweder extrem hochfrequent sind und / oder besonders gut gedämpft werden. Da das Gummi Reibkräfte über innere Dämpfung erzeugt, werden besonders reibungsrelevante Frequenzen sicher nicht bis an die Meßstelle des Reifensensors durchdringen. Ein weiterer interessanter Parameter kann auch der Sturzwinkel des Reifens sein. In dieser Arbeit vorgenommene Untersuchungen haben zwar gezeigt, daß der Sturzwinkel alleine nicht zu Gleitvorgängen in der Aufstandsfläche führt. Dazu sind die entstehenden Seitenkräfte bei realistischen Sturzwinkel zu



gering. In Kombination mit einem Schräglaufwinkel kann jedoch die veränderte Flächendruckverteilung im Latsch die Verhältnisse der Seitenkraftherzeugung völlig verändern. Dabei sind durchaus positive Auswirkungen auf das Schräglaufwinkel-Seitenkraftverhalten des Reifens zu erwarten.

Neben solch hochauflösenden Messungen auf LINUS sind auch noch weitere Untersuchungen auf realen Fahrbahnen vorstellbar. Problematisch ist dabei das Treffen des Fahrbahnsensors. Hier könnte mittels einer Matrix aus Hallgeneratoren in der Fahrbahn die Trefferwahrscheinlichkeit so stark erhöht werden, daß in etwa vergleichbare Ergebnisse wie im IPS auch mit einem Reifenmeßanhänger darstellbar sind. Die hier vorgestellten Aussagen zur Reibwert-Schlupf-Kurve könnten mit diesen Ergebnissen überprüft und um die Auswirkungen anderer hier nicht untersuchter Betriebsparameter ergänzt werden. So ist zu erwarten, daß neben dem Reibwert vor allem Radlast, Reifennendruck, Verschleißzustand und Reifendimension ( $r_{\text{dyn}}$ ) über die beschriebenen Wechselwirkungen zwischen den abplattungsbedingten Schubspannungen und der Reibwert-Schlupf-Kurve einen großen Einfluß auf deren Erscheinungsbild haben.

Insgesamt sind in der Wirkungskette von den viskoelastischen Gummieigenschaften bis hin zur Reibkraft am Rad noch immer viele Erkenntnislücken vorhanden. Zu deren Schließung können die hier vorgestellten Methoden auch in Zukunft beitragen.

## 5.2 Reibwerterkennung

Die rückwirkungsfreie Erkennung des Reibwerts zwischen Reifen und Straße im fahrenden Fahrzeug ist das Ziel von mehreren unterschiedlichen Forschungsarbeiten. Einige der in der Vergangenheit entwickelten Ansätze haben ihren Ursprung im europäischen Forschungsprogramm PROMETHEUS, das die Steigerung von Effizienz und Sicherheit des Straßenverkehrs zum Ziel hatte. Innerhalb dieses Programms wurden auch die Systeme entwickelt, die aus der Information über den Reibwert großen Nutzen ziehen können bzw. diese Information unabdingbar benötigen.

Ein Beispiel für solche Systeme ist der in der Markteinführung befindliche „Intelligente Tempomat“ Burghoff [21], der zwar ein Komfortsystem darstellt, in Verbindung mit einer zuverlässigen Reibwerterkennung aber durchaus auch Sicherheitsaspekte bedienen könnte. Daneben könnten bereits bewährte Systeme wie ABS oder auch die Fahrdynamikregelung, Debes [26], Müller [86], v. Zanten [127] von der Kenntnis des Reibwerts profitieren. Noch weiter in der Zukunft angesiedelte Systeme der Fahrerwarnung oder der Aktiven Fahrzeugführung sind zum Teil ohne Reibwerterkennung gar nicht vorstellbar.

Der Darmstädter Reifensensor steht in seiner Funktion als reibwerterkennendes System in Konkurrenz mit anderen existierenden Verfahren, die grob in zwei Klassen eingeteilt werden können:

1. Systeme, die aus der möglichst exakten Erfassung der reibwertbeeinflussenden äußeren Parametern eine Information über den zu erwartenden Kraftschluß ableiten. Darunter fällt der von Eichhorn [31] untersuchte Ansatz der Messung von Fahrbahntextur und anderer Größen und das von Görich [53] vorgestellte, relativ einfache Verfahren der qualitativen und quantitativen Erkennung von Nässe auf der Fahrbahn.
2. Daneben kann auch der Reifen selbst als Meßglied genutzt werden, das über seine charakteristischen Reaktionen auf eine Reibwertbeanspruchung den Rückschluß auf die Reibverhältnisse zuläßt. Dieckmann [27] entwickelte dazu ein Verfahren der Mikroschlupfmessung und Extrapolation des maximalen Reibwerts bei Längskraftbeanspruchung, Pasterkamp [92] nutzte in ganz ähnlicher Weise das Schräglaufwinkel-Seitenkraft Verhalten des Reifens.

Die Reifensensorik hat gegenüber diesen Systemen den Vorteil, daß direkt an der Schnittstelle Reifen-Fahrbahn, an der die Reibungskräfte wirksam werden, gemessen wird. Dadurch kann die zum Teil hohe Kraftschlußausnutzung der örtlich wirkenden Schubspannungen genutzt werden. Nachteilig ist der mit der lokalen Messung an einem rotierenden Reifen verbundene sehr hohe Aufwand für die Energie- und Datenübertragung sowie die Komplexität der Sensorfertigung und der Einbringung in den Reifen.

Die Grundlagen des Zusammenhangs zwischen dem vorhandenen Reibwert und den entstehenden lokalen Schubspannungen sind in der vorliegenden Arbeit, sofern nicht bereits bei Roth [101] beschrieben, hergeleitet. Auf Basis der heute viel größeren Meßdatenmenge kann das Potential des Sensors zur Reibwertmessung bestätigt werden, es haben sich aber auch deutliche Grenzen der Sensorik gezeigt.

Zum einen lassen sich aus den Grundlagen der Entstehung der lokalen Schubspannungen bzw. der Deformationen im Laufstreifen theoretische Auflösungsgrenzen definieren, die selbst bei Verwendung einer idealen Sensorik nicht überschritten werden können. So ist in Abhängigkeit von den Betriebsparametern des Reifens, von denen die lokalen abplattungsbedingten Schubspannungen beeinflußt werden, im Zusammenhang mit der Flächenpressung die lokale Reibwertbeanspruchung vorgegeben. Liegt der zur Verfügung stehende Reibwert deutlich über dem von den Abplattungsschüben beanspruchten, kann der Sensor keine nochmals höheren Reibwerte auflösen. Daneben hat sich gezeigt, daß die bisher erforschten Reifensensoren keineswegs ideale Eigenschaften besitzen.

Der Reifensensor 2. Generation integriert sehr stark und enthält in seinem Verformungssignal viele Anteile, die nicht reibwertrelevant sind. Die höheren Evolutionsstufen sind in dieser Beziehung näher an der Wirkung der tatsächlichen lokalen Schubspannungen. Sie stören durch ihre Geometrie allerdings die Kinematik des Profilelements stärker und erhöhen die Flächenpressung an der Meßstelle zum Teil beträchtlich.

Aktuelle Arbeiten, die sich mit dem Reifensensor der 4. Generation beschäftigen, lassen erwarten, daß durch die extreme Miniaturisierung des Magneten bei dieser Evolutionsstufe die experimentelle Darstellung der von der Theorie her zu erwartenden Effekte besser gelingt. Die Optimierung der Ortsauflösung bei gleichzeitiger Verringerung der Störeffekte durch die Miniaturisierung hat aber Grenzen. So ist die exakte Positionierung und Kalibrierung der extrem kleinen Bauteile ein noch nicht vollständig gelöstes Problem. Zudem führt eine höhere Auflösung auch zu einer größeren Empfindlichkeit gegenüber Störungen von außen. So konnten bereits die Sensoren der 3. Generation im Fahrversuch die Reproduziergenauigkeit der 2. Generation bei weitem nicht erreichen.

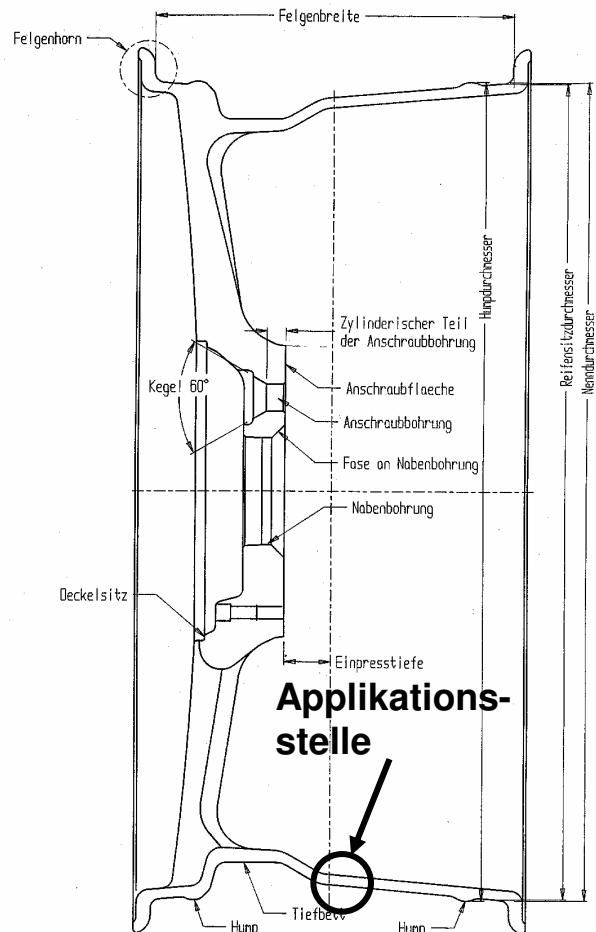
Zukünftige Arbeiten müssen zeigen, ob mit der 4. Sensorgeneration das Optimum zwischen Auflösung und Störimpfindlichkeit gefunden ist. Es muß zudem überprüft werden, ob die vorhandenen Auswerteverfahren der Meßsignale in Bezug auf den Reibwert für den veränderten Sensoraufbau noch gültig sind. In dieser Arbeit wurde ein Kennwert für die Beschreibung des Reibwertpotentials vorgestellt, der aber durchaus, insbesondere bei einer neuartigen Sensorgeneration, verbessert werden kann.

Schließlich kann auch das Hauptproblem aufgegriffen werden, das einem serienmäßigen Einsatz von Reifensensoren bisher entgegensteht. Die Daten- und Energieübertragung der für den Laboreinsatz konzipierten bisherigen Sensoren zeigt kein Potential für eine serienmäßige Verwendung im Kraftfahrzeug. Die Technologie der Oberflächenwellensensorik [97], die bereits bei Supke [115] angedacht wurde und zur Zeit Gegenstand aktueller Arbeiten ist, bietet sehr vielversprechende Optionen zur Lösung dieses Problems. Ein solcher passiv arbeitender Sensor kann von außen angefunkt werden und sendet nach kurzer Zeit ein Antwortsignal zurück, das von den auf der Oberfläche eines Siliziumchips laufenden Oberflächenwellen moduliert wird. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit und das Reflexionsverhalten dieser Wellen kann genutzt werden, um Verformungen des Chips zu messen. Um einen Reifensensor mit dieser Technologie darzustellen, muß es allerdings gelingen, die Verformungen des Laufstreifens, die große Wege bei vergleichsweise niedriger Kraft darstellen, an das sehr steife Verformungsverhalten des Chips anzupassen. Dazu sind bereits

konstruktive Lösungen entwickelt worden, die sich zur Zeit kurz vor der Erprobung befinden. Zukünftige Forschungen werden über Potential und Erfolg dieser Technologie entscheiden.

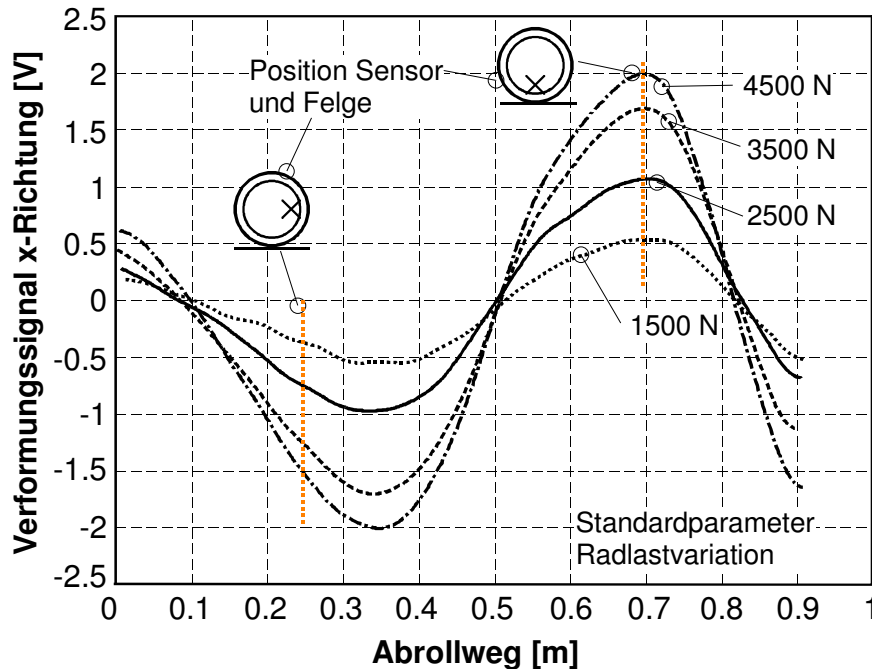
Neben dem Einsatz im Laufstreifen bietet der OFW Chip auch völlig neuartige Einsatzmöglichkeiten. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, sind die abplattungsbedingten Kräfte und Verformungen im Reifentorus fast überall vorhanden und werden schließlich in die Felge eingeleitet. So daß die Messung dieser Erscheinungen nicht zwingend auf den Laufstreifen beschränkt ist. Besonders der Felgenkörper ist wegen seiner sehr ähnlichen Elastizitätseigenschaften im Vergleich zum OFW-Chip besonders gut für die Applikation geeignet. Im Sinne orientierender Messungen wurde im Rahmen dieser Arbeit das Bett einer Aluminiumfelge mit einer DMS-Applikation versehen, die mit zwei Halbbrückenschaltungen die Dehnung des Felgenkörpers in zwei Raumrichtungen messen konnten. **Bild 82** zeigt ein Schnittbild der Felge mit eingezeichneter Applikationsstelle.

Die Mitte des Felgenbettes bietet sich an, da hier die aus den Reifenflanken stammenden Kräfte symmetrisch wirken. Tatsächlich können mit diesem Aufbau Verformungen gemessen werden, die aus dem Reifeninnendruck, aus Brems-, Antriebs-, oder auch aus Seitenkräften resultieren. Sehr wahrscheinlich sind ähnliche Verformungen an allen anderen Stellen zu beobachten, die im Kraftfluß vom Reifenkörper bis zum Felgenbett liegen. Die ersten Untersuchungen zeigen aber auch, daß die Erfassung der durch reibenden Kontakt hervorgerufenen Schubspannungen in der Aufstandsfläche im Felgenbett nicht oder nur sehr schwach möglich ist. Die Ursache dafür liegt in den Eigenschaften des Stahlgürtels, der die lokalen Schubspannungen in der Aufstandsfläche auf ihrem Weg in die Reifenstruktur aufnimmt und für eine gleichmäßige Verteilung sorgt. Messungen der Spannungen im Stahlgürtel wären diesbezüglich aussichtsreicher, auf Grund der Geometrie und der mechanischen Eigenschaften allerdings auch nur sehr schwer realisierbar.



**Bild 82:** Applikation der DMS-Brücke zur Messung der Felgenverformungen

Die Verformungen im Felgenbett werden erwartungsgemäß von der Radlast des Reifens am stärksten beeinflusst. Die Dehnungen in Umfangsrichtung der Felge bei Variation der Radlast am abrollenden Reifen sind in **Bild 83** aufgetragen. Sehr deutlich sind die umlaufenden Verformungen



**Bild 83:** Felgenverformungen in Umfangsrichtung, Variation der Radlast, LINUS

komplex, daß eine analytische Beschreibung nicht möglich ist. An dieser Stelle könnten nur numerische Simulationen, die in dieser Arbeit nicht durchführbar waren, einen tieferen Einblick vermitteln. Das Meßverfahren kann somit zwar keine neue Option zur Reibwerterkennung eröffnen, die Erfassung globaler Größen wie Radlast und äußere Kräfte sowie eventuell die Erkennung der Kraftwirkung des Wasserkeils bei aufkommendem Aquaplaning scheinen jedoch denkbar. Das Verfahren ist Gegenstand einer Patentanmeldung, eine genaue Quellenangabe war zum Zeitpunkt der Drucklegung der Arbeit noch nicht möglich.

Insgesamt zeigen diese Untersuchungen und auch die an anderer Stelle stattfindenden Messungen der Seitenwandtorsion des Reifens, Becherer [8], daß die Erforschung des Reifens als direktes oder indirektes Meßglied fahrzeugtechnischer Größen noch ein weites Feld für innovative Ideen und Konzepte bietet.

durch die von der Abplattung verursachten Spannungen in der Reifenstruktur zu erkennen. Die höchsten Beträge werden beim Kontakt mit der Fahrbahn bzw. 45° vor diesem Punkt erreicht.

Die Ausbreitung der Dehnungen im Felgenkörper in Folge der vom Reifen eingeleiteten Kräfte ist allerdings so

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Messung und Interpretation lokaler Effekte der Reibung in der Aufstandsfläche von Pkw-Reifen. Darunter sind sowohl elastische Deformationen des Laufstreifens als auch Gleitbewegungen zwischen Reifengummi und Fahrbahnoberfläche zu verstehen. Aus diesen lokalen Effekten resultieren die Reibkräfte, die das Führen von Kraftfahrzeugen in Längs- und Querrichtung ermöglichen.

Für beide Effekte wurden im Rahmen dieser Arbeit Meßmethoden geschaffen bzw. vorhandene Verfahren angepaßt. Die Sensorik wurde auf Prüfständen unterschiedlicher konstruktiver Ausführung eingesetzt. Sie gestattet hochauflösende Messungen unter Laborbedingungen mit einigen Einschränkungen im Vergleich zu Realität. Es konnten aber auch Messungen unter stark an die realen Bedingungen der Straße angelehnten Verhältnissen vorgenommen werden.

Die Ergebnisse zum lokalen Gleiten und zu den elastischen Deformationen zeigen, daß ein Zusammenspiel der beiden Komponenten für die Ausprägung von Reibkräften zwischen Reifen und Straße maßgeblich ist. Die Überlagerung abplattungsbedingter Schubspannungen in der Aufstandsfläche mit den von äußeren Kräften verursachten lokalen Spannungen kann die Wechselwirkung der verschiedenen Gummireibungsmechanismen erklären. Es entsteht das gemeinsame Auftreten von Deformations- und Gleitschlupf am Reifen und damit das charakteristische Aussehen der Reibwert-Schlupf-Kurve in Abhängigkeit von Betriebsparametern wie z.B. Reibwertniveau und Geschwindigkeit. Eine geschlossene Theorie zur Charakteristik der Reifenreibung, ausgehend von den prinzipiellen Gummireibungsmechanismen, wird vorgestellt.

Daneben zeigen sich deutliche Analogien zwischen den lokalen Effekten in Folge von Reibwertbeanspruchung am Reifen und den Verfahren zur Reibwerterkennung mit Hilfe der Darmstädter Reifensensorik. Die grundlegenden Mechanismen dafür konnten hergeleitet werden. Die verschiedenen Sensoren sind in ihren derzeitigen Ausführungen für die Fragestellung nicht optimal geeignet. In Kombination mit besseren Auswerteverfahren kann eine Verbesserung der Aussage dennoch erzielt werden. Aktuelle Entwicklungen lassen erwarten, daß zukünftige Sensoren den in dieser Arbeit vorgestellten theoretischen Zusammenhängen näherkommen. Die Lösung des Problems der Datenübertragung aus einem rotierenden Reifen ist ebenfalls Gegenstand aktueller Arbeiten und läßt für die Zukunft den serienmäßigen Einsatz von Reifensensoren vorstellbar erscheinen.

## 7 Literatur

- [1] Ammon, D.; Gipser, M.; Rauh, J. und J. Wimmer: Effiziente Simulation der Gesamtdynamik Reifen-Achse-Fahrwerk. VDI Bericht 1224, VDI Verlag Düsseldorf, 1995
- [2] Bachmann, T.; S. Ernesti, J. Stöcker und B. Breuer: Influences on and detection of tyre/road-friction; Proceedings XXV. FISITA-Congress, Peking 1994
- [3] Bachmann, T.: Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Straße. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 286, Düsseldorf VDI-Verlag 1996
- [4] Bachmann, T.: Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Dissertation TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 360, Düsseldorf VDI-Verlag 1998
- [5] Bachmann, V. und M. Fach: A Method to enhance Driving Safety by measuring Tire Dynamics, Autotest '98 Barcelona 1998
- [6] Bachmann, V.: Untersuchungen zum Einsatz von Reifensensoren im Pkw-Reifen. Dissertation TU Darmstadt, 1998, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 (Druckvorbereitung)
- [7] Bachmann, V.; M. Fach und B. Breuer: Future Car-Tires as Provider of Information for Vehicle Systems to enhance Primary Safety. SAE Paper 981944, Future Transportation Technology Conference, Costa Mesa, USA, 1998
- [8] Becherer, T.: The Sidewall Torsion Sensor System. 2. Darmstädter Reifenkolloquium, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 362, VDI-Verlag Düsseldorf 1998, S. 130 ff.
- [9] Benson, W., J. J. Henry, W. S. Adams: A tread deflection measurement system utilized in tire hydroplaning studies. SAE Paper 800243, 1980
- [10] Biederman, V. L.: Verformungen von Reifenelementen beim Abrollen. Revue Générale du Caoutchouc, Sonderheft November 1959
- [11] Bode, G.: Kräfte und Bewegungen in der Bodenberührfläche rollender Reifen von Lastkraftwagen. Dissertation Technische Universität Hannover, 1960
- [12] Böhm, F.: Reifenmodell für hochfrequente Rollvorgänge auf kurzwelligen Fahrbahnen. VDI-Bericht 1088, VDI-Verlag Düsseldorf, 1993
- [13] Böhm, F.: Zur Mechanik des Luftreifens. Habilitationsschrift, TH Stuttgart, 1966

- [14] Borgman, W.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Luftreifen bei Schräglauf. Dissertation Technische Hochschule Braunschweig, 1962
- [15] Bowden, F. P. and D. Tabor: The friction and lubrication of solids. Oxford University Press, Oxford 1950
- [16] Brandt, M.; V. Bachmann, A. Vogt, M. Fach, K. Mayer, B. Breuer und H.-L. Hartnagel: Highly sensitive AlGaAs-GaAs Position Sensors for Measurement of Tire Tread Deformation. Nummer 8 Vol. 34 Electronic Letters April 1998, IEE London
- [17] Breuer, B., U. Eichhorn and J. Roth: Measurement of Tyre/Road-Friction ahead of the car and inside the Tyre. Proceedings AVEC '92, Yokohama 1992, Paper 062, S. 347
- [18] Breuer, B.; T. Bachmann, S. Ernesti und J. Stöcker: Methods and Instruments for On-Board Measurement of Tyre/Road-Friction; SAE Motor Sports Engineering Conference and Exposition, SAE Paper 942470, Dearborn, USA, 1994
- [19] Brown, A., K. C. Ludema, S. K. Clark: Contact between the tire and roadway. Published in Clark, S. K. (Editor): Mechanics of Pneumatic Tires. US Department of Transportation, Washington DC., USA, 1982
- [20] Buis, P.: Pneumatic Tires. V.R.L.D. Report No. P084, 1967. Published in Clark, S. K. (Editor): Mechanics of Pneumatic Tires. US Department of Transportation, Washington DC., USA, 1982
- [21] Burghoff, H.-G.; Daiss, M.; Kühner, T.; Nieuwenhuizen, R. und M. Schröder: Ein Schritt ins nächste Jahrtausend – Elektrische und elektronische Innovationen. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift Sonderausgabe „Die neue S-Klasse“, 1998, S. 70 ff.
- [22] Clark, S. K., R. N. Dodge: Development of textile cord load transducer. ORA Report 01193-1-T, University of Michigan, 1968
- [23] Clark, S. K., Mechanics of Pneumatic Tires. US Department of Transportation, Washington DC., USA, 1982
- [24] Continental AG: Simulation der Profilelementverformung von mit Reifensensoren ausgerüsteter Reifen. Interner Bericht 1997
- [25] Cooper, D. H., V. E. Gough, J. H. Hardman: Seitenkraft und Seitenverschiebung in der Berührfläche zwischen Reifen und Straße. ATZ 63 (1961) 2, S 51-56



- [26] Debes, M.; Herb, E.; Müller, R.; Sokoll G. und A. Straub: Dynamische Stabilitäts Control DSC der Baureihe 7 von BMW. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 99 (1997), 1997, S. 134 ff.
- [27] Dieckmann, T.: Der Reifenschlupf als Indikator für das Kraftschlußpotential. Dissertation Universität Hannover, 1992
- [28] Dieckmann, T.: Erkenntnisse aus der bisherigen Entwicklung des schlupfbasierten Karftschlußpotential-Meßsystems. Fachtagung Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Hannover, 21./22.10.1993, VDI-Berichte Nr. 1088
- [29] Eichhorn, U. and J. Roth: Prediction and Monitoring of Tyre/Road-Friction, Proceedings XXIV. FISITA-Congress, London 1992, Paper 925226, S.195
- [30] Eichhorn, U. und J. Roth: Kraftschluß zwischen Reifen und Fahrbahn - Einflußgrößen und Erkennung; VDI-Berichte Nr. 916: Reifen - Fahrwerk - Fahrbahn, Düsseldorf VDI-Verlag 1991, S. 169 ff.
- [31] Eichhorn, U.: Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn - Einflußgrößen und Erkennung. Dissertation TH Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 222, Düsseldorf VDI-Verlag 1993
- [32] Entwurf einer Richtlinie zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuß 4.3 „Rauheit“, 1994
- [33] Fach, M.: Der Darmstädter Reifensensor – Profilelementverformungen und lokale Gleitbewegungen. Vortrag auf dem Workshop: Reifen – Anforderungen an Rohstoffe und Produkt. Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e.V., 25., 26. Mai 1998 Hannover (Invited Paper)
- [34] Fach, M.: Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Fahrzeugtechnik, Heft F21, Bergisch Gladbach 1996
- [35] Fach, M.: Erweiterung der Leistungsfähigkeit des Innentrommelprüfstands, Abschlußbericht zum Forschungsprojekt Nr. 95 532 der BASt, 1995
- [36] Fach, M.: Einfluß der Umgebungstemperatur auf den Naßgriff von Pkw Reifen unterschiedlicher Gummimischungen. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt Nr.: 95531. Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach 1995
- [37] Fach, M.: Kraftschlußverhalten von „Öko“ -Reifen. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt Nr.: 96531. Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach 1996

- [38] Fach, M.; V. Bachmann und B. Breuer: Der Darmstädter Reifensensor im Labor und am Fahrzeug. 2. Darmstädter Reifenkolloquium. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 362, Düsseldorf VDI-Verlag 1998, S. 138 ff.
- [39] Fach, M.; V. Bachmann und B. Breuer: Measurement of Local Slip in the Contact Patch of Passenger Car Tires. Paper 23A, International Tire Exhibition and Conference, September 15-17, Akron, USA, 1998 (Invited Paper)
- [40] Fach, M: Vergleichende Untersuchung des Reibwerts von Pkw-Reifen mit dem Reifenmeßanhänger des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt und im Innentrommelprüfstand der Bundesanstalt für Straßenwesen. *fzd*-Bericht Nr. 250/98
- [41] Farlopulos, C.: Untersuchungen über die Gleitbewegungen in Reifenaufstandsflächen. Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1971
- [42] Fujikawa, T., S. Yamazaki and S. Ogasawara: Measurement of Slip in Contact Patch of tire with Optical Device. JSAE No. 41, Tokyo, 1989
- [43] Gauß, F.: Über Brems- und Führungskräfte zwischen Reifen und Straße. ATZ 63 (1961) 2, S. 41-44
- [44] Gehman, S. D.: Rubber Structure and Properties. Published in Clark, S. K. (Editor): Mechanics of Pneumatic Tires. US Department of Transportation, Washington DC., USA, 1982
- [45] Gengenbach, W.: Der Einfluß des Fahrbahnbelags, der Geschwindigkeit und der Profiltiefe von Reifen auf den Kraftschluß bei Nässe. Automobil-Industrie 4/1970
- [46] Gengenbach, W.: Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn. ATZ 70 (1968) 3, ATZ 70 (1968) 8, ATZ 70 (1968) 9
- [47] Gerresheim, M.: Experimenteller und theoretischer Beitrag zu Fragen des Reifenverhaltens. Dissertation TU München 1975
- [48] Gerresheim, M.: Kräfte und Bewegungen in der Aufstandsfläche geradeausrollender Reifen. Automobil-Industrie Nr. 3, 1975
- [49] Geyer, W.: Beitrag zur Gummireibung auf trockenen und nassen Oberflächen. Automobil Industrie 4/1970
- [50] Gillespie, T.-D.: Pavement Surface Characteristics and their Correlation with Skid Resistance. Joint Road Friction Program, Pennsylvania Dept. of Highways, Pennsylvania State University, Report 12/1965, Pennsylvania, USA, 1965

- [51] Gipser, M.: DNS-Tire 3.0 - die Weiterentwicklung eines bewährten strukturmechanischen Reifenmodells. VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 285, VDI-Verlag Düsseldorf 1996, S. 115 ff.
- [52] Gough, V. E. und S. G. Withehall: Universal Tire Test Machine. FISITA 1962 (Inst. of Mech. Eng. London)
- [53] Görich, H.-J.: System zur Ermittlung des aktuellen Kraftschlußpotentials eines Pkws im Fahrbetrieb. Dissertation TU Karlsruhe 1993; VDI-Berichte Reihe 12, Nr. 181
- [54] Görich, H.-J.; S. Jacobi und U. Reuter: Ermittlung des aktuellen Kraftschlußpotentials eines Pkws im Fahrbetrieb. Fachtagung Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn, Hannover, 21./22.10.1993, VDI-Berichte Nr. 1088
- [55] Grandel, J. und E. Hörz: Gleitbeiwert, maximaler Kraftschlußbeiwert und Bremschlupf in Abhängigkeit von Reifenprofil, Fahrbahnbelag und Fahrbahnzustand. Deutsche Kraftfahrzeugforschung und Straßenverkehrsforschung, Heft 242, 1974
- [56] Grosch, K. A.: The Relation between the friction and visco-elastic properties of rubber. Proceedings of the Royal Society, A 274 No 21, 1963
- [57] Grosch, K. A.: Visko-elastische Eigenschaften von Gummimischungen und deren Einfluß auf das Verhalten von Reifen. Kautschuk + Gummi · Kunststoffe, 42 (1989) 9
- [58] Günther, S., C. Paech: Beitrag zur Untersuchung, Bewertung und Konstruktion von Pkw-Radialreifen. Dissertation Technische Universität Dresden, 1979
- [59] H. L. Hartnagel, D. Arslan, M. Brandt, A. Dehe, K. Mutamba, A. Vogt, B. Breuer, D. K. Hennecke and B. Stoffel, Compound Semiconductor Microsensors for Applications in Mechanical Engineering, Microwave Engineering Europe, pp.37-46, February 1999
- [60] Haken, K.L.: Konzeption und Anwendung eines Meßfahrzeugs zur Ermittlung von Reifenkennfeldern auf öffentlichen Straßen. Dissertation Universität Stuttgart 1993; Inst. für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen; Stuttgart 1993
- [61] Heinrichs, R.: Entwicklung und Realisierung einer Meßeinrichtung zur Bestimmung der Wasserfilmdicke bei Aquaplaningversuchen im Prüfstand, Interner Bericht der BAST, 1992
- [62] Henry, J.J. und K. Saito: Skid-Resistance Measurements with Blank and Ribbed Tires and their Relationship to Pavement Texture. Transportation Research Record 946, Washington, D.C. 1983

- [63] Huinink, H. und C. Schröder: Dynamische Interaktion Bremse-Reifen-Straße. Vortrag auf dem  $\mu$ -Kolloquium, VDI Fortschritt Berichte Reihe 12 Nr. XXX, Düsseldorf 1999
- [64] Hurry, J. A., R. P. Woolley: A New High Range Strain Gage. Rubber Age No 9, 1953
- [65] Huschek, S.: Einfluß der Rauheit der Fahrbahnoberfläche auf Griffigkeit und Lärm-entwicklung. Automobil Industrie 31 (1986) 5
- [66] Isermann, R.: Integrierte Mechanisch-Elektronische Systeme - Aufgaben, Konzepte, Forschungsansätze. VDI-Berichte Nr. 12/179. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993, S. 1-34
- [67] Isermann, R.: Mechatronik. Automatisierungstechnik 43/12. München: R. Oldenbourg Verlag 1995, S. 539-548
- [68] Kalender, U.: Wechselwirkung Reifen/Fahrbahn auf den Kraftschluß bei Nässe und hohen Fahrgeschwindigkeiten bei Verwendung neuester Reifentypen. Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 498, 1986
- [69] Keller, H.: Die Errichtung eines Innentrommelprüfstands für Straßenbeläge, Straße und Autobahn 26, 1975
- [70] Kelley, J.D. und A.G. Speyer: Effect of Tire Construction Variables on Passenger Car Wet Traction. 2nd International Skid Prevention Conference, Transportation Research Record 621, Columbus, Ohio, 1977
- [71] Kern, W. F., K. Hafner, H. Nippold: Über die Auswertung von Verformungsmessungen an Reifen. Kautschuk + Gummi · Kunststoffe, 16 (1963) 11, S 619-627
- [72] Kern, W. F.: Über die Cordbeanspruchung in Reifen. Faserforschung und Textiltechnik 11 (1969) 9
- [73] Kern, W. F.: Über Verformungsmessungen an Kraftfahrzeugreifen mittels spezieller Dehnungsgeber. ATZ 63 (1961) 2
- [74] Kraemer, P.: Zahlenmäßiger Zusammenhang zwischen Rauheit der Straßenoberfläche und ihrer Griffigkeit bei Nässe. Straßen- und Tiefbau, 9/1971
- [75] Kraft, P.: Untersuchungen über die Größe der Berührungsfläche, der Bodendrucke und Horizontalkräfte an rollenden Luftreifen. Dissertation TH Stuttgart, 1947
- [76] Krempel, G.: Experimenteller Beitrag zu Untersuchungen an Kraftfahrzeugreifen, Dis-sertation TH Karlsruhe, 1965

- [77] Kummer, H.W. und W.E. Meyer: Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn. Automobiltechnische Zeitschrift 66 (1964) 9
- [78] Kummer, H.W. und W.E. Meyer: Verbesserter Kraftschluß zwischen Reifen und Fahrbahn - Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie. Automobiltechnische Zeitschrift 69 (1967) 8
- [79] Kummer, H.W.: A unified theory of rubber and tyre friction. Pennsylvania State University, Research Bulletin B94, July 1966
- [80] Laermann, F.-J.: Seitenführungsverhalten von Kraftfahrzeugreifen bei schnellen Radlaständerungen. Dissertation TU Braunschweig 1985; VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 73, Düsseldorf 1986
- [81] Litzka, J. und E. Friedl: Untersuchungen über den maßgebenden Reibungsbeiwert. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten (A), Straßenforschung Heft 376, Wien 1988
- [82] Ludwig, D.: Untersuchung zur Profilelementverformung von Pkw-Reifen auf realer Fahrbahn bei Geradeausfahrt unter besonderer Berücksichtigung von Verschleiß und Reibwert. Dissertation TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 363, Düsseldorf VDI-Verlag 1998
- [83] Martin, H.: Druckverteilung in der Berührungsfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. ATZ 36/9, S. 230-232, 1936
- [84] Meyer, E.; Kummer, H.W.: Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn. ATZ 66/9, 1966, S. 246-250
- [85] Moore, D. F.: The friction and lubrication of elastomers. Pergamon Press, Oxford 1972
- [86] Müller, A.; Achenbach, W.; Schindler, E.; Wohland, Th. und F.-W. Mohn: Das neue Fahrsicherheitssystem Electronic Stability Programm von Mercedes Benz. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 96 (1994), 1994
- [87] N.N.: Mechanics of Pneumatic Tires. Samuel K. Clark (Editor); US Department of Transportation, Washington D.C., 1982
- [88] Neugebauer, J., V. Grubisic: Ermittlung des Verformungsverhaltens von Reifen im Fahrbetrieb. VDI-Berichte Nr. 631, 1987, S. 359-374

- [89] Neugebauer, J., V. Grubisic: Meßwertaufnehmer zur Erfassung von Oberflächendehnungen und der globalen Verformung von Reifen im Fahrbetrieb. ATZ 90 (1988) 2, S. 63-64
- [90] Pacejka, H.B. und T. Takahashi: Pure slip characteristics on flat and on undulated road surfaces. Proceedings of the 1st Int. Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC) Yokohama 1992
- [91] Pacejka, H.: Analysis of Tire Properties. Published in Clark, S. K. (Editor): Mechanics of Pneumatic Tires. US Department of Transportation, Washington DC., USA, 1982
- [92] Pasterkamp, W. R. und H. Pacejka: The Tyre as a Sensor to Estimate Friction. Vehicle System Dynamics 27. Swets & Zeitlinger, 1997
- [93] Persson, B.N.J.: Sliding Friction: Physical Principles and Application, Springer Verlag, Heidelberg, 1997
- [94] Pohl A., L. Reindl und H. Scherr.: Drahtloses Messen mit passiven OFW Sensoren am Beispiel der Überwachung des Reifenluftdrucks. VDI Bericht 1350, Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, VDI-Verlag Düsseldorf 1997, S. 305 ff.
- [95] Rado, Z.: A study of surface texture and its relationship to friction. Dissertation Penn State University, 1994
- [96] Reimpell, J., P. Sponagel: Fahrwerktechnik: Reifen und Räder. Vogel-Buchverlag, Würzburg, 1986
- [97] Reindl, L., F. Müller, C. Ruppel, W. E. Bulst, F. Seifert: Passive surface wave sensors which can be wirelessly interrogated. Patent Application WO 93/13495, 1992
- [98] Reindl, L., V. Mágóri: Funksensorik mit passiven Oberflächenwellen Komponenten. Kolloquium Berührungslose Meßdaten und Leistungsübertragung, Fortschritts-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 515, Düsseldorf VDI-Verlag 1995
- [99] Rieger, H.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Gummireibung Dissertation TU München 1968
- [100] Roth, J. und U. Eichhorn: Tyre/Road-Friction under Real-Road Conditions. Proceedings-3rd EAEC-Congress Straßburg 1991, S. 523
- [101] Roth, J.: Untersuchungen zur Kraftübertragung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn unter besonderer Berücksichtigung der Kraftschlußerkennung am rotierenden Rad. Dis-

- sertation TH Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 195, Düsseldorf VDI-Verlag 1993
- [102] Rupp, A.; Grubisic, V.: Erfassung multiaxialer Reifenverformungen unter definierten Fahrbelastungen. VDI-Bericht 1350, VDI-Verlag Düsseldorf, 1997, S. 329 ff.
- [103] Sachs, T.: Funkabfragbare OFW-Verzögerungsleitung zur Dehnungsmessung. 7. Internationale Fachmesse - Sensor 95, Nürnberg, 1995
- [104] Sacia, S.R.: The Effect of Operating Conditions on the Skid Performance of Tires. 2nd International Skid Prevention Conference, Transportation Research Record 621, Columbus, Ohio, 1977
- [105] Saito, K.; Horiguchi, T.; Kasahara, A.; Abe, H. und J. J. Henry: Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and its Speed Dependency on Pavement Surfaces. 75th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C., 1996
- [106] Schallamach, A.: Elementary effects in contact area of sliding rubber. Physics of tire traction - theory and experiment, D. F. Hays and A. L. Browne, Symposium at the General Motors Research Laboratories, New York - London, 1974
- [107] Schallamach, A.: Gummireibung. Gummi Asbest und Kunststoffe, 28(1975)
- [108] Schulze, K.-H.: Griffigkeit und Rauheit. Handbuch des Straßenbaus; Bd. 1, Hrsg.: Wehner, Schulze, Siedek; Springer, 1979
- [109] Seitz, N.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der in der Aufstandsfläche frei rollender Reifen wirkenden Kräfte und Bewegungen. Dissertation Technische Hochschule München, 1969
- [110] Snowdon, J. D.: Rubber Chem. and Technology Vol. 37 No 1, 1963, p. 370-385
- [111] Sollfrank, E.: Prüfanlage für Straßenbeläge, BBC-Nachrichten, Heft 7, 1975
- [112] Stöcker, J.; P. Hahne; B. Breuer: Sensorreifen mit berührungsloser Daten- und Energieübertragung. Kolloquium - berührungslose Meßdaten- und Leistungsübertragung des SFB 241 IMES, TH Darmstadt 1995, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 515, Düsseldorf VDI-Verlag 1995, S. 10 ff.
- [113] Stöcker, J.; A. Kirschbaum, I. Aller, B. Breuer, M. Glesner und H.-L. Hartnagel: Der „Intelligente Reifen“ - erste Ergebnisse einer interdisziplinären Forschungskooperation, Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 97 (1995) 12, S. 824 ff.

- [114] Stöcker, J.; T. Bachmann, S. Ernesti und B. Breuer: Erkennung inhomogener Kraftschlußverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn am Beispiel Aquaplaning; VDI-Berichte Nr. 1088: Reifen - Fahrwerk - Fahrbahn, Düsseldorf VDI-Verlag 1993
- [115] Supke, J.: Untersuchung lokaler Vorgänge in Pkw-Reifen mittels integrierter Sensorik. Dissertation TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 343, Düsseldorf VDI-Verlag 1997
- [116] Wallentowitz, H.: Integration of Chassis and Traction Control Systems - What is possible - What makes sense - What is under development. AVEC '92 Yokohama 1992.
- [117] Wang, Y. Q., R. Gnadler, R. Schieschke: Einlaufverhalten und Relaxationslänge von Autoreifen. ATZ 96 (1994) 4, S. 214-222
- [118] Weber, R., H. G. Persch: Seitenkraft-Frequenzgänge von Luftreifen - ein Beitrag zum Verhalten bei instationärem Schräglauf. ATZ 76 (1974) 12, S. 404-405
- [119] Weber, R.: Der Aufbau von Seitenkräften am Reifen beim Antreiben und Bremsen. Kautschuk + Gummi · Kunststoffe 38 (1985) 9, S. 801-804
- [120] Weber, R.: Schlupf und Führungskräfte am Reifen. VDI-Berichte Nr. 546, VDI Düsseldorf, 1984, S. 189-201
- [121] Wehner, B.; K.H. Schulze und K. Croce: Untersuchungen auf dem Gebiet der Straßengriffigkeit. Schriftenreihe "Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", Heft 1, 1959
- [122] Wilkinson, C. S.: Study of the factors affecting the friction or tread compounds on ice. India Rubber World, Vol. 128, No. 4, 1953
- [123] Williams, A.R.; R. Bond und J.H. Pennels: The tyre/road interface - its effect on braking. Proceedings of the Institution of mechanical engineers, C 25/76, London 1976
- [124] Williams, M. L., R. F. Landel and J. D. Ferry: The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. Journal of American Chemical Society No 77, 1950.
- [125] Yager, T. und F. Bühlmann: Friction Evaluation of Different Tires used on Several Pavement Test Vehicles. ASTM Symposium on Frictional Interaction of Tires and Pavement, Akron, 1981
- [126] Zachow, D.: 3D Membrane Shell Model in Application of a Tractor and Pkw Tyre. In: Tyre Models for Vehicle Analysis by Böhm, F. und Willumeit, H.-P. 2<sup>nd</sup> International Colloquium Berlin, 1997



- [127] Zanten, A. van; Erhard, R.; Pfaff, G.: „FDR - Die Fahrdynamikregelung von Bosch“. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 96 (1994) 11, 1994, S. 674 ff.
- [128] Zipkes, E.: Das Phänomen ansteigender Griffigkeitskoeffizienten bei hohen Geschwindigkeiten. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 9/1989 und 12/1989

## 7.1 Studien und Diplomarbeiten

Im Rahmen der Arbeit wurden 15 Studien- Diplomarbeiten und Konstruktive Entwürfe betreut.

- Meyer, O.: Reifenuntersuchungen am Reifenlinearprüfstand LINUS. SA 706/96 *fzd*
- Gringinger, U.: Fertigstellung, Homologation und Inbetriebnahme des Reifenmeßanhängers PETRA II. DA 295/97 *fzd*
- Leipner, V.: Inbetriebnahme und TÜV-Abnahme des Reifenmeßanhängers PETRA II. KE 710/96 *fzd*
- Brudler, P.: Konzeption einer Meßeinrichtung zur Erfassung der dynamischen Radkräfte an der Vorderachse eines Pkw Opel Astra. KE am Fachgebiet Aerodynamik und Meßtechnik
- Heid, S.: Konstruktion und Aufbau einer Meßeinrichtung zur Erfassung der dynamischen Radkräfte an der Vorderachse eines Pkw Opel Astra. KE 724/97 *fzd*
- Pflüger, A.: Konstruktive Anpassung einer Mercedes Kraftmeßfelge an die Meßaufgabe mit fzd-Reifensensoren. KE 725/97 *fzd*
- Hammer, M.: Aufbau und Erprobung einer Meßeinrichtung zur Erfassung von lokalen Gleitbewegungen in der Aufstandsfläche von Pkw-Reifen. DA 294/97 *fzd*
- Mechelke, A.: Messungen zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. DA 297/97 *fzd*
- Seewald, G.: Konstruktion einer Vorrichtung zur Kalibrierung von Meßgliedern zur Erfassung der dynamischen Radkräfte. KE am Fachgebiet Maschinenlemente und Konstruktionslehre
- Meyer, O.: Konstruktion einer Einrichtung zur Adaption einer Kalibriervorrichtung an Meßglieder zur Erfassung der dynamischen Radkräfte. KE am Fachgebiet Maschinenlemente und Konstruktionslehre
- Nadal Lorenzo, J.-M.: Einfluß verschiedener Parameter auf den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. DA 300/98 *fzd*

- Fritz, J.: Grundsatzuntersuchungen zur Vorbereitung von Reifensensormessungen auf einem Großprüfstand. SA 737/98 *fzd*
- Lemke, M.: Messungen lokaler Gleitbewegungen in der Aufstandsfläche von Pkw-Reifen. SA 738/98 *fzd*
- Oberle, J.: Entwicklung eines Konzepts für einen Lieferwagen. DA 313/98 *fzd*
- Gruber, S.: Konzeption eines passiven funkabfragbaren OFW Reifensensors. DA am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik

## 7.2 Eigene Veröffentlichungen

### 7.2.1 Publikationen und Fachvorträge

- [1] Fach, M.: Kraftschluß bei Nässe. Vortrag auf der Tagung: Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn, Haus der Technik, Essen 1996
- [2] Glaeser, K.-P.; M. Fach: Kraftschlußmessungen bei Nässe im Innentrommelprüfstand der BASt. Darmstädter Reifenkolloquium. VDI-Berichte Reihe 12 Nr. 285. VDI-Verlag Düsseldorf 1996, S. 24-39
- [3] Breuer, B.; M. Fach: Antworten der Hochschulen auf die globalen Herausforderungen in der Ingenieurausbildung. Neue Wege in der Fahrzeugentwicklung - Neue Herausforderungen an die Automobilingenieure. VDI-Berichte 1343. VDI-Verlag Düsseldorf 1997, S. 177-193
- [4] Glaeser, K.-P. und M. Fach: Der Naßgriff und das Aquaplaningverhalten von Pkw Reifen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik Heft 11, November 1997
- [5] Breuer, B.; D. Ludwig, V. Bachmann und M. Fach: Der Darmstädter Reifensensor - Ein Instrument zur Messung dynamischer Größen im rotierenden Rad. Thema Forschung Heft 1/98, Darmstadt 1998
- [6] Brandt, M.; V. Bachmann, A. Vogt, M. Fach, K. Mayer, B. Breuer und H.-L. Hartnagel: Highly sensitive AlGaAs-GaAs Position Sensors for Measurement of Tire Tread Deformation. Nummer 8 Vol. 34 Electronic Letters April 1998
- [7] Fach, M.: Der Darmstädter Reifensensor – Profilelementverformungen und lokale Gleitbewegungen. Vortrag auf dem Workshop: Reifen – Anforderungen an Rohstoffe und Produkt. Deutsches Institut für Kautschuktechnologie e.V., 25., 26. Mai 1998 Mariitim Stadthotel Hannover

- [8] Bachmann, V.; M. Fach: A Method to enhance Driving Safety by measuring Tire Dynamics. Autotest '98 Barcelona 1998
- [9] Bachmann, V.; M. Fach und B. Breuer: Future Car-Tires as Provider of Information for Vehicle Systems to enhance Primary Safety. SAE Nummer 981944, Costa Mesa Kalifornien, 1998
- [10] Fach, M.; V. Bachmann und B. Breuer: Measurement of Local Slip in the Contact Patch of Passenger Car Tires. Paper 23A, International Tire Exhibition and Conference, September 15-17, Akron Ohio, 1998
- [11] Fach, M.; V. Bachmann und B. Breuer: Der Darmstädter Reifensensor im Labor und am Fahrzeug. 2. Darmstädter Reifenkolloquium. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 362, Düsseldorf VDI-Verlag 1998

## 7.2.2 Forschungsberichte

- [12] Fach, M.: Erweiterung der Leistungsfähigkeit des Innentrommelprüfstands. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt Nr.: 95532. Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach 1995
- [13] Fach, M.: Einfluß der Umgebungstemperatur auf den Naßgriff von Pkw Reifen unterschiedlicher Gummimischungen. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt Nr.: 95531. Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach 1995
- [14] Fach, M.: Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Fahrzeugtechnik, Heft F21, Bergisch Gladbach 1996
- [15] Fach, M.: Kraftschlußverhalten von „Öko“-Reifen. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt Nr.: 96531. Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach 1996
- [16] Fach, M.: Vergleichende Untersuchung des Reibwerts von Pkw-Reifen mit dem Reifenmeßanhänger des Fachgebiets Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt und im Innentrommelprüfstand der Bundesanstalt für Straßenwesen. *fzd*-Bericht Nr. 250/98