

# **Bestimmung des maximalen Kraftschlusses an mit ABV ausgerüsteten Fahrzeugen und Fahrzeugzügen**

## **Auftraggeber:**

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)  
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF)

## **Auftragnehmer:**

IVK Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen  
Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann, Universität Stuttgart

## **Verfasser:**

Stefan Kerber

## **VORWORT**

Zweifellos haben sich automatische Blockierverhinderer (ABV-Systeme) im PKW wie auch im Nutzfahrzeug und in schweren Nutzfahrzeugzügen durch ihren Beitrag zur Fahrzeugsicherheit zum Standard entwickelt. Bei der Typgenehmigung von Fahrzeugen unterliegen sie den Bestimmungen der internationalen Bremsenvorschrift ECE-R 13 Annex 13: Durch den Vergleich eines ABV-geregelten Bremsvorganges mit einem unregulierten Bremsmanöver auf einer Fahrbahn mit geringem Reibwert wird der Gütegrad des zu prüfenden ABV-Systems bestimmt.

Da das unregulierte Bremsmanöver der Ermittlung des maximalen Kraftschlusses als Bezugsgröße dient, ist die Objektivität dieses Bestimmungsverfahrens hinsichtlich des quantitativen Vergleichs verschiedener Systeme in Frage zu stellen. Im Interesse eines objektiven Vergleichs wettbewerblicher ABV-Systeme hat der FAT AK 9 „Fahrodynamik von Nutzfahrzeugen“ unter Einbeziehung von Vertretern der PKW-Hersteller und Zulieferer eine wissenschaftliche Untersuchung zur Ermittlung einer geeigneteren Methode in Auftrag gegeben.

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart hat in einem mehrjährigen Projekt mit praktischen Versuchen und präziseren Auswerteverfahren die Schwachstellen des heutigen Verfahrens deutlich gemacht:

Diese Schwachstellen sind begründet in der Beschreibung von hochdynamischen Fahrvorgängen durch nur eine einzige Kennzahl, nämlich durch den Gütegrad. Als Ergebnis der Forschungsarbeit wurde bei relativ geringem messtechnischem Aufwand ein Parameteridentifikationsverfahren für mathematische Modelle des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes vorgeschlagen. Mit dieser Methode wird der Dynamik von Bremsvorgängen der Typprüfprozeduren, insbesondere aber der Veränderung der Fahrbahngriffigkeit längs der Bremsstrecken Rechnung getragen. Dies geschieht in einem Maße, das die bisherigen Messfehler deutlich reduziert.

Da die Grundlagen für die Objektivierung der Prüfdurchführung und der Prüfergebnisse geschaffen wurden, wurde mit diesem Vorhaben ein Erfolg erzielt. Das Forschungsvorhaben (AiF-FV-Nr. 11519) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert, wofür die FAT dankt.

Des weiteren gilt der Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Wiedemann und seinen Mitarbeitern am IVK, der Ingenieurgemeinschaft Prof. Weber (IPW), Hannover, und den im Arbeitskreis vertretenen Firmen für die praktische und beratende Unterstützung sowie für die erfolgreiche Durchführung des Forschungsvorhabens.

Dieser Abschlussbericht wurde in der FAT-Schriftenreihe als Ausgabe Nr. 170 veröffentlicht.

Frankfurt am Main, im Dezember 2001

**Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND HINTERGRUND</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ERGEBNISSE DER LITERATUR- UND PATENTRECHERCHE</b>	<b>5</b>
2.1	Bestimmung des Kraftschlusses aus Effekten am Gesamtfahrzeug	6
2.2	Bestimmung des Kraftschlusses aus Effekten am Rad	7
2.3	Bestimmung des Kraftschlusses aus Effekten im Reifen	7
2.4	Bestimmung des Kraftschlusses anhand von Parametern	7
<b>3</b>	<b>BESTIMMUNG DES MAXIMALEN KRAFTSCHLUSSBEIWERTES NACH ECE-R13, ANHANG 13</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>Pkw-Messungen</b>	<b>9</b>
3.1.1	Bestimmung der Homogenität der Versuchsbahnen bezüglich Griffigkeit	9
3.1.2	Bestimmung des maximalen Kraftschlussbeiwertes	14
<b>3.2</b>	<b>Lkw-Messungen</b>	<b>15</b>
<b>3.3</b>	<b>Theoretische Untersuchung des Einflusses von Kraftschlusschwankungen auf die erreichbare mittlere Bremsverzögerung</b>	<b>22</b>
<b>3.4</b>	<b>Fazit</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>ALTERNATIVE MODELLANSÄTZE ZUR KRAFTSCHLUSSBESTIMMUNG</b>	<b>25</b>
4.1	Berechnung von $\mu_{\max}$ über die rotatorische Raddynamik	25
4.2	Berechnung von $\mu_{\max}$ mittels mathematischer Reifenmodelle	27
4.3	Vergleich der beiden Verfahren bezüglich Aufwand, Durchführbarkeit und Genauigkeit	29
<b>5</b>	<b>ERMITTLUNG DES KRAFTSCHLUSSVERLAUFS MITTELS MATHEMATISCHER REIFENMODELLE – ERSTE ERGEBNISSE</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Versuchsfahrzeug und Messtechnik</b>	<b>31</b>
<b>5.2</b>	<b>Prinzip der Kraftschlussermittlung mittels mathematischer Reifenmodelle</b>	<b>32</b>
5.2.1	Magic Formula Tyre Model	32
5.2.2	Die Formel nach Burckhardt	34
5.2.3	Ermittlung der Magic Formula-Parameter	35
5.2.4	Ermittlung der Parameter für die Burckhardt-Formel	38

<b>5.3</b>	<b>Erläuterungen zum verwendeten Algorithmus</b>	<b>39</b>
<b>5.4</b>	<b>Berechnete Kraftschlussverläufe</b>	<b>41</b>
<b>5.5</b>	<b>Einflüsse von Parametervariationen auf die berechneten Kraftschlussverläufe</b>	<b>47</b>
<b>5.6</b>	<b>Einfluss einer fehlerbehafteten Schlupfmessung auf die Berechnung des maximalen Kraftschlusses</b>	<b>52</b>
<b>5.7</b>	<b>Potenziale und Grenzen des Verfahrens</b>	<b>54</b>
<b>5.8</b>	<b>Bestimmung der Kraftschlussausnutzung <math>\varepsilon</math></b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>ANHANG</b>	<b>60</b>
<b>8.1</b>	<b>Parametrische Gleichungen zur Näherung der Kraftschluss-Schlupf-Charakteristik</b>	<b>60</b>
<b>8.2</b>	<b>Einfluss der Parametervariationen auf den Verlauf der <math>\mu</math>-Schlupf-Kurven</b>	<b>62</b>
<b>9</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>65</b>

# 1 Einleitung und Hintergrund

Heute werden fast alle Pkw, Lkw und Busse mit Automatischen Blockierverhinderern (ABV) bzw. Antiblockiersystemen (ABS) ausgerüstet, da solche Anlagen enorme Sicherheitsvorteile bieten. So bleibt zum einen die Fahrstabilität bei Vollbremsungen in Verbindung mit Lenkmanövern oder  $\mu$ -Split-Bedingungen (unterschiedlicher Kraftschluss in den beiden Fahrspuren) erhalten. Zum anderen ist auch eine Verkürzung des Bremsweges gegeben, wenn das ABS aufgrund einer guten Regelstrategie den maximalen Kraftschluss nahezu vollständig ausnutzt. Dieser liegt für viele Fahrbahnen höher als der Gleitbeiwert, der bei einer Blockierbremsung auftreten würde.

Die Serienzulassung von Kraftfahrzeugen und Anhängern beinhaltet unter anderem die Genehmigung eines Fahrzeugtyps hinsichtlich der Bremsung, welche nach der Regelung ECE-R13 zu erfolgen hat. In dieser sind im Anhang 13 die Prüfvorschriften für Fahrzeuge mit Automatischen Blockierverhinderern festgelegt. Neben allgemeinen Anforderungen bezüglich der Betriebssicherheit und Zusatzprüfungen hat das Fahrzeug ein bestimmtes Leistungsvermögen des ABS zu erbringen.

Die Leistungsfähigkeit wird anhand der bei einer ABS-Bremsung erzielten Kraftschlussausnutzung  $\varepsilon$  beurteilt. Diese muss bei Bremsungen auf Straßenoberflächen mit einem Kraftschlussbeiwert von höchstens 0,3 und von etwa 0,8 mindestens 75 % betragen. Die Kraftschlussausnutzung ist definiert als der Quotient aus der erzielbaren mittleren Abbremsung bei regelndem ABS über einen festgelegten Geschwindigkeitsbereich und dem Kraftschlussbeiwert  $\mu_{\max}$ . Dieser ist als der Quotient aus der ohne Blockieren der Räder maximal erreichbaren Bremskraft und der dazugehörigen dynamischen Last der gebremsten Achse für jede Achse experimentell zu bestimmen (siehe [1]).

Das bestehende Verfahren weist jedoch Unzulänglichkeiten auf, da es zum einen sehr zeitaufwändig ist und zum anderen der ermittelte Kraftschlussbeiwert die bei der Bremsung vorliegenden Kraftschlussverhältnisse oftmals nicht ausreichend genau wiedergeben kann. Dies führt in der Folge zu einer falschen, nicht selten über 100 % liegenden „Kraftschlussausnutzung“, woraus man direkt schließen kann, dass der ermittelte Kraftschlussbeiwert zu niedrig ist. Weiterhin ist dadurch die Möglichkeit gegeben, dass ein ABS-System, welches tatsächlich weniger als 75 % des wahren maximalen Kraftschlusses ausnutzt, eine Zulassung erhält. Daher ist ein neues Verfahren zur Bestimmung der Kraftschlussausnutzung bei einer geregelten Bremsung zu entwickeln, das bestimmte Anforderungen erfüllen muss [2].

Die wichtigsten Punkte sind:

- Die Versuchsvorrichtung sollte das Testfahrzeug selbst sein.
- Die Versuchsreifen sind die Reifen des Fahrzeugs und keine speziellen Standard-Referenz-Reifen.
- Die Prozedur muss anwendbar sein auf typischer asphaltierter Straße und auf Untergründen, die niedrigen Kraftschluss simulieren.
- Es soll möglich sein,  $\mu_{\max}$  mit angetriebenen und nicht angetriebenen Achsen zu ermitteln.

- Für das Verfahren sollten so wenig Messwertaufnehmer wie möglich installiert werden.
- Der Fehler bei der Bestimmung des  $\mu_{\max}$ -Messwertes soll 5 % nicht überschreiten.

Aufgabe der vorliegenden Untersuchung ist es, das Messverfahren nach ECE-R13 näher zu durchleuchten, die Gründe für dessen Unzulänglichkeiten aufzuzeigen und Verbesserungsmaßnahmen oder, wenn möglich, gänzlich neue Ansätze zur Kraftschlussbestimmung zu erarbeiten.

## 2 Ergebnisse der Literatur- und Patentrecherche

Der Kraftschluss zwischen einem Reifen und einer Fahrbahn kann auf vielfältige Weise bestimmt werden. Im Folgenden sollen in der Literatur und in Patenten vorgestellte Lösungen diskutiert werden. Dabei soll auf Verfahren, die durch die o.g. Anforderungen ausgeschlossen sind, wie zum Beispiel die Messung mit einem speziellen Fahrzeug, Messfelgen oder Laborgeräten, nicht eingegangen werden. Somit sind in erster Linie Veröffentlichungen von Interesse, bei denen es darum geht, die Kraftschlussverhältnisse der Räder eines bewegten Fahrzeugs zu ermitteln.

Der Großteil der Veröffentlichungen, die für die Aufgabenstellung von Interesse sind, stammt aus den letzten zehn Jahren. Die Gründe dafür sind die zunehmende Verbreitung von automatischen Blockierverhinderern und Fahrdynamik-Regelsystemen, die aus der Kenntnis der Kraftschlussverhältnisse eine Verbesserung ihrer Funktion erfahren können, und die Existenz des Europäischen Forschungsprojekts PROMETHEUS (Program for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety), in welchem sich die Europäischen Automobilhersteller, diverse Zulieferer der Automobilindustrie und Forschungsinstitutionen mit den Themen Sicherheit und Effizienz im Europäischen Straßenverkehr auseinandersetzen. Eine der Arbeitsgruppen dieses Programms wurde unter dem Titel „Erkennung der Reibverhältnisse und Fahrzeugdynamik“ formiert. Verschiedene Veröffentlichungen von Mitgliedern dieser Gruppe haben Systeme zur Bestimmung des Kraftschlusses von Kraftfahrzeugen zum Inhalt.

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass zwischen zwei grundsätzlich unterschiedlichen Prinzipien zur Bestimmung des Kraftschlusses differenziert werden kann (siehe **Abbildung 1**):

1. Die Bestimmung des Kraftschlusses ist aus den Effekten, die durch ihn hervorgerufen werden, möglich (direkte Messung). Dies ist allerdings nur praktikabel, wenn der Effekt in klarem Zusammenhang mit dem Kraftschluss steht und messbar ist. Hierbei wird unterschieden zwischen Effekten am Gesamtfahrzeug, am Rad und im Reifen. Das bisher praktizierte Verfahren zur Bestimmung des maximalen Kraftschlusses nach ECE-R13 basiert auf der Messung von Effekten am Gesamtfahrzeug.
2. Der Kraftschluss wird anhand der Parameter bestimmt, die den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn beeinflussen (indirekte Bestimmung). Hierzu müssen allerdings alle relevanten Parameter erfasst werden und die funktionalen Abhängigkeiten bekannt sein.

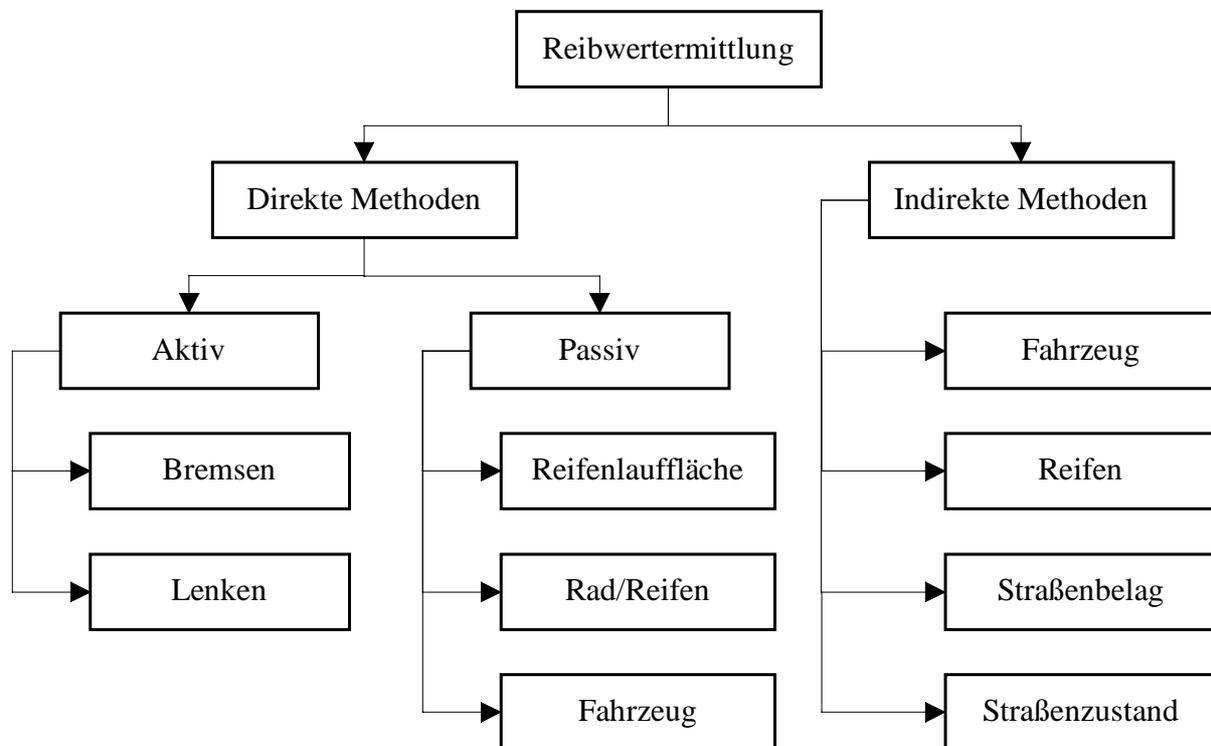
Die wichtigsten Quellen sollen nachfolgend entsprechend dieser Einteilung kurz diskutiert werden.

## 2.1 Bestimmung des Kraftschlusses aus Effekten am Gesamtfahrzeug

Diese Verfahren basieren in der Regel auf Reifen- und Fahrzeugmodellen sowie Wertetabellen. Durch den Vergleich von Bewegungsgrößen wird auf den momentanen Kraftschluss der Räder geschlossen.

Bei Mercedes-Benz wurde eine Funktion in das ABS eines Versuchsfahrzeugs eingebunden, die die Abbremsung eines einzelnen Rades ermöglicht [3]. Aus dem dabei gewonnenen Schlupf und Verzögerungsverlauf können Teile einer Reifenkennlinie gewonnen werden, mit denen die Parameter eines Reifenmodells iterativ bestimmt werden.

Ein Verfahren der Volkswagen AG [4, 24] ermittelt das Kraftschlussmaximum aus der Fahrzeuggesamtbeschleunigung und der Gesamthaftwertausnutzung der einzelnen Räder. Es basiert auf der Annahme, dass die Reifenkennlinien für verschiedene Fahrbah-



**Abbildung 1:** Einteilung der Methoden zur Kraftschlussbestimmung

nen durch Skalieren aus einer zu Grunde gelegten Funktion gewonnen werden können.

Von der Universität Karlsruhe stammt ein System, welches aus den beim Beschleunigen oder Verzögern eines Fahrzeugs gemessenen Bewegungsgrößen die Kräfte an den Rädern bestimmt und aus diesen in Zusammenhang mit dem ermittelten Schlupf an den Rädern über einen Schätzalgorithmus die Kraftschluss-Schlupf-Charakteristik bestimmt [5, 6].

Alle drei Verfahren setzen voraus, dass die Reifencharakteristik mit Hilfe der verwendeten mathematischen Modellierung ausreichend genau wiedergegeben werden kann. Im Anhang sind daher die erwähnten parametrischen Gleichungen zur Darstellung der Kraftschluss-Schlupf-Charakteristiken zusammengestellt.

## 2.2 Bestimmung des Kraftschlusses aus Effekten am Rad

Die meisten Verfahren dieser Gruppe verwenden Kraft- oder Drehmomentsensoren zur Messung der Effekte am Rad. Sie lassen sich nur schlecht auf eine Prüfprozedur übertragen, da die Applikation und Kalibrierung der Sensoren sehr aufwändig ist. Die Verwendung von Messfelgen in einer Prozedur ist mit großen Kosten verbunden und kann insofern Einfluss auf die Ergebnisse nehmen, als dass die Trägheitsmomente der Räder vom Serienzustand des Fahrzeugs abweichen.

An der Universität Hannover wurde im Rahmen von PROMETHEUS ein System zur schlupfbasierten Bestimmung des Kraftschlusspotenzials entwickelt [7,8]. Hierbei wird der Drehzahlunterschied zwischen den Rädern einer angetriebenen und einer nicht angetriebenen Achse sensiert. Mit Hilfe des aus dem Motormanagement gewonnenen Antriebsmoments werden Elemente der Kraftschluss-Schlupf-Kurve ermittelt und hieraus auf die gesamte Charakteristik geschlossen.

Wie bei den Systemen, die Effekte am Gesamtfahrzeug nutzen, sind auch diese Verfahren auf eine ausreichend genaue Modellbildung des Reifenverhaltens angewiesen.

## 2.3 Bestimmung des Kraftschlusses aus Effekten im Reifen

Bei diesen Verfahren kommen spezielle Reifen, die die Sensierung von Effekten im Reifen ermöglichen, zum Einsatz.

An der Technischen Universität Darmstadt wurde ein in Serienreifen applizierbarer Sensor zur Messung der Verformung der Profilelemente im Reifenlatsch entwickelt [9, 10]. Aus den Verformungen kann auf die lokalen Kraftverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn geschlossen werden. Aus dieser Information und dem Drehzustand der Räder können die Kraftschlussverhältnisse ermittelt werden. Es ist jedoch erforderlich, den Zusammenhang zwischen der Profilelementverformung und den Reifenkräften für jeden Reifen experimentell zu ermitteln.

Ähnlich kann der von Continental entwickelte Sidewall-Torsion-Sensor (SWT) [11] zur Bestimmung des Kraftschlusses verwendet werden. Dieser ist jedoch ein Element des Reifens und an diesen gebunden, womit er, solange er noch nicht in allen Serienreifen vorhanden ist, lediglich in Form von speziellen Versuchsreifen zum Einsatz kommen kann.

## 2.4 Bestimmung des Kraftschlusses anhand von Parametern

Verfahren, die den Kraftschluss anhand von sensierten Parametern abschätzen, sind für eine Kraftschlussbestimmung nach ECE-R 13 nicht von Interesse, da hierbei das Reifenverhalten als bekannt vorausgesetzt wird und lediglich Parameter der Gruppen Fahrbahn und Zwischenmedium ausgewertet werden.

In dieser Gruppe sind die an der Technischen Universität Darmstadt entwickelten Verfahren [12, 13] erwähnenswert, da im Rahmen ihrer Entstehung umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss der Parameter von Fahrbahn und Zwischenmedium auf den Kraftschluss durchgeführt wurden.

Eine Kombination aus verschiedenen Verfahren wurde bei Porsche im Rahmen von PROMETHEUS entwickelt [14]. Die Ergebnisse des Systems sind jedoch keine genauen Daten über die Kraftschluss-Schlupf-Charakteristik, sondern eine Klassifizierung der Fahrbahn in die drei Kategorien trocken, nass und winterglatt.

## 3 Bestimmung des maximalen Kraftschlussbeiwertes nach ECE-R13, Anhang 13

### 3.1 Pkw-Messungen

Bei der direkten Bestimmung des maximalen Kraftschlusses für die Beurteilung einer Bremsung mit ABV sind grundsätzlich zwei Methoden denkbar:

1. die Messung von Effekten im Verlauf der zu beurteilenden Bremsung, aus denen die Kraftschlussverhältnisse ermittelt werden können, und
2. die Durchführung von eigenständigen Versuchen zur Bestimmung des Kraftschlussmaximums.

Die zweite Methode setzt voraus, dass sich Fahrbahn, Reifen und Zwischenmedium im Verlauf der für die Versuche erforderlichen Zeit nicht verändern und dass die Einflüsse aus den unterschiedlichen Betriebszuständen am Rad bekannt oder so klein sind, dass sie vernachlässigt werden können.

Des Weiteren muss die gesamte bei den Versuchen zum Einsatz kommende Fahrbahn homogen sein oder die zusätzlichen Versuche müssen auf exakt dem selben Fahrbahnabschnitt durchgeführt werden, auf dem die geregelte Bremsung erfolgt. Inhomogenitäten dieses Abschnitts können jedoch ebenfalls zu Fehlern führen, wenn die Kraftschlussverhältnisse nur auf einem Teil von diesem ermittelt werden.

In der Literatur beschreiben unter anderem Hartmann [15] und Essers et. al. [16] das Ausmaß der gemessenen Inhomogenität von Fahrbahnen. Bei Hartmann wird dies anhand von Blockierbremsungen mit einem mit Serienreifen ausgerüsteten Pkw gezeigt, wohingegen Essers unter anderem Messungen mit einem speziellen Versuchsreifen bei konstantem Bremsschlupf von 10 % durchführte. Diese ergaben einen bis zu 32 % unter dem mittleren Kraftschlusswert liegenden minimalen Kraftschluss.

#### 3.1.1 Bestimmung der Homogenität der Versuchsbahnen bezüglich Griffigkeit

Die oben aufgeführten Ergebnisse waren Anlass, die Versuchsbahnen mit niedrigem Kraftschlussbeiwert auf dem Versuchsgelände der Firma Bosch in Schwieberdingen, auf dem die Versuche für dieses Forschungsvorhaben durchgeführt werden sollen, auf ihre Homogenität bezüglich des Kraftschlusses zu untersuchen.

Als Messgerät diente der Universelle Reibungsmesser II (URM) des Instituts für Verbrennungsmotoren und Krafftfahrwesen der Universität Stuttgart (siehe **Abbildung 2**). Hierbei handelt es sich um einen Lkw, an dem eine Messeinrichtung mit einem Messrad und einem sogenannten Verspannungs- und Seitenkraftkompensationsrad angebracht ist. Mess- und Verspannungsrad waren für diese Messungen über eine homokinetische Welle verbunden, wodurch sich aus den unterschiedlichen Durchmesser der beiden Räder ein annähernd konstanter Schlupf an diesen ergab. Das Verspannungsrad wurde mit einer Radlast von 10000 N und das Messrad mit 3750 N betrieben, wodurch sich beinahe der gesamte erzwungene Schlupf auf das Messrad konzentrierte. Auf diese Art konnten die Fahrbahnen mit einem mit konstantem Schlupf laufenden Rad vermessen werden. Der Versuchsreifen war ein Serienreifen der Dimension 195/65 R 15, der bei dem gewählten Verspannungsrad einen Schlupf von rund 7,5 % aufwies.



**Abbildung 2:** *Universeller Reibungsmesser II (URM II) der Universität Stuttgart*

Die beiden untersuchten Versuchsbahnen wurden von einer stationären Bewässerungseinrichtung mit einem Wasserfilm versehen. Als Fahrbahnen wurden die beiden Niedrigreibungwertbeläge Synthresol und Fliesen bzw. Kacheln ausgewählt, weil davon auszugehen ist, dass sich die Fehlereinflüsse auf die Messprozedur nach ECE-R 13 bei niedrigen Kraftschlussbeiwerten besonders stark auswirken. Die Versuche wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 40 km/h durchgeführt.

Als Ergebnis sind in **Abbildung 3** und **Abbildung 4** die Verläufe des gemessenen Kraftschlusses für eine Fahrspur über dem Weg aufgetragen. Gezeigt sind jeweils 2 bzw. 3 Einzelmessungen und der Mittelwert (schwarzer Kurvenverlauf) aus diesen Messungen. Zunächst fällt auf, dass die Synthresolbahn relativ inhomogen ist, also Schwankungen der Griffigkeit aufweist. Besonders der Peak bei ca. 20 m Streckenlänge bedarf einiger erklärender Worte. Hier ist der Belag der Synthresolstrecke auf einer Fläche von mehreren Quadratmetern vollständig abgenutzt, so dass der darunter liegende Asphalt zum Vorschein kommt. Gegen Ende wird der Belag der Bahn, die überwiegend für Bremsversuche genutzt wird, naturgemäß wieder besser, womit sich der dort ansteigende Verlauf des Kraftschlusses erklären lässt. Für die Fliesenbahn ergibt sich ein etwas anderes Bild. Sie ist in ihrem Kraftschlussverlauf deutlich homogener als die Synthresolbahn, doch auch hier sind die Schwankungen noch relativ groß, was durch die Skalierung des Diagramms jedoch etwas kaschiert wird. **Abbildung 5** und **Abbildung 6** zeigen die Griffigkeiten der beiden Versuchsstrecken für jeweils fünf Fahrspuren des Messfahrzeugs als Farbverlaufdiagramm. Niedrige Kraftschlussbeiwerte sind dunkel, hohe Kraftschlussbeiwerte hell dargestellt. Hier lässt sich sehr gut erkennen, dass Inhomogenitäten des Kraftschlusses nicht nur in Längs-, sondern auch in Querrichtung auftreten. Dadurch wird das Problem der Ermittlung des maximalen Reibbeiwertes noch zusätzlich erschwert, da bei einem Zweispurfahrzeug unterschiedliche Kraftschlüsse links und rechts vorliegen können.

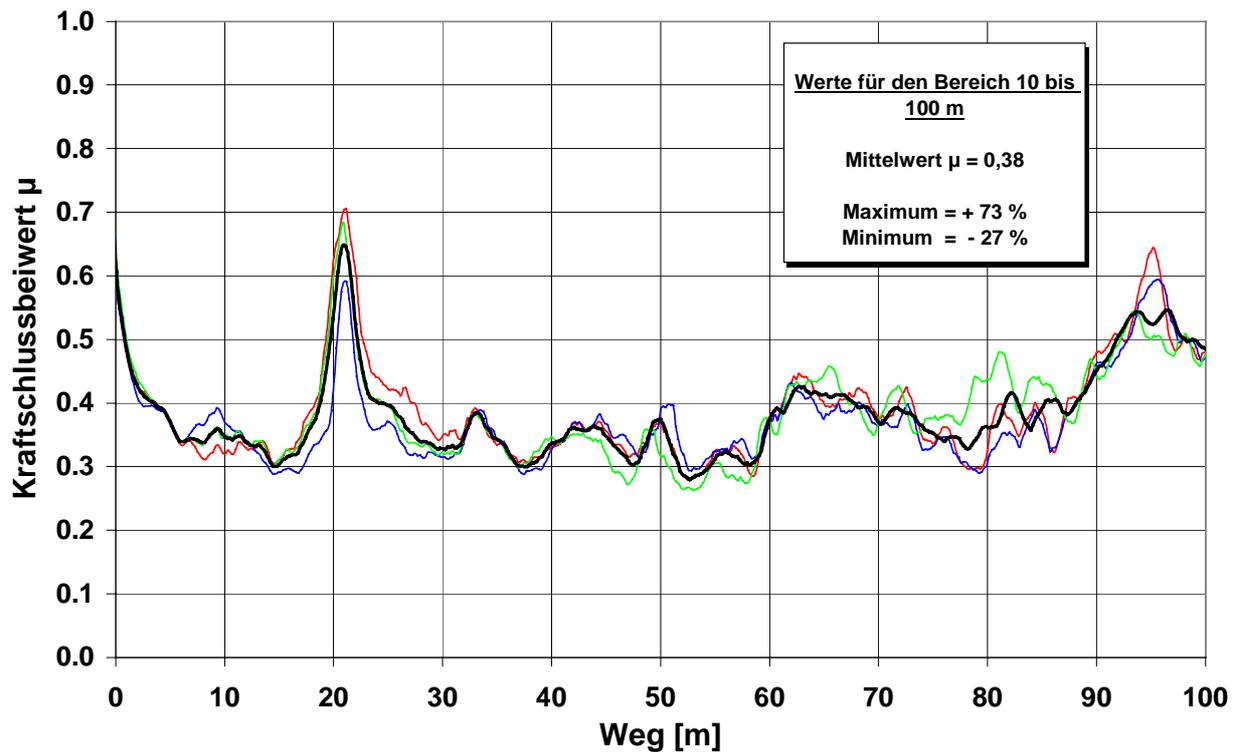


Abbildung 3: Kraftschlussverlauf der Synthresolbahn (eine Spur, Einzelmessungen farbig, Mittelwert schwarz)

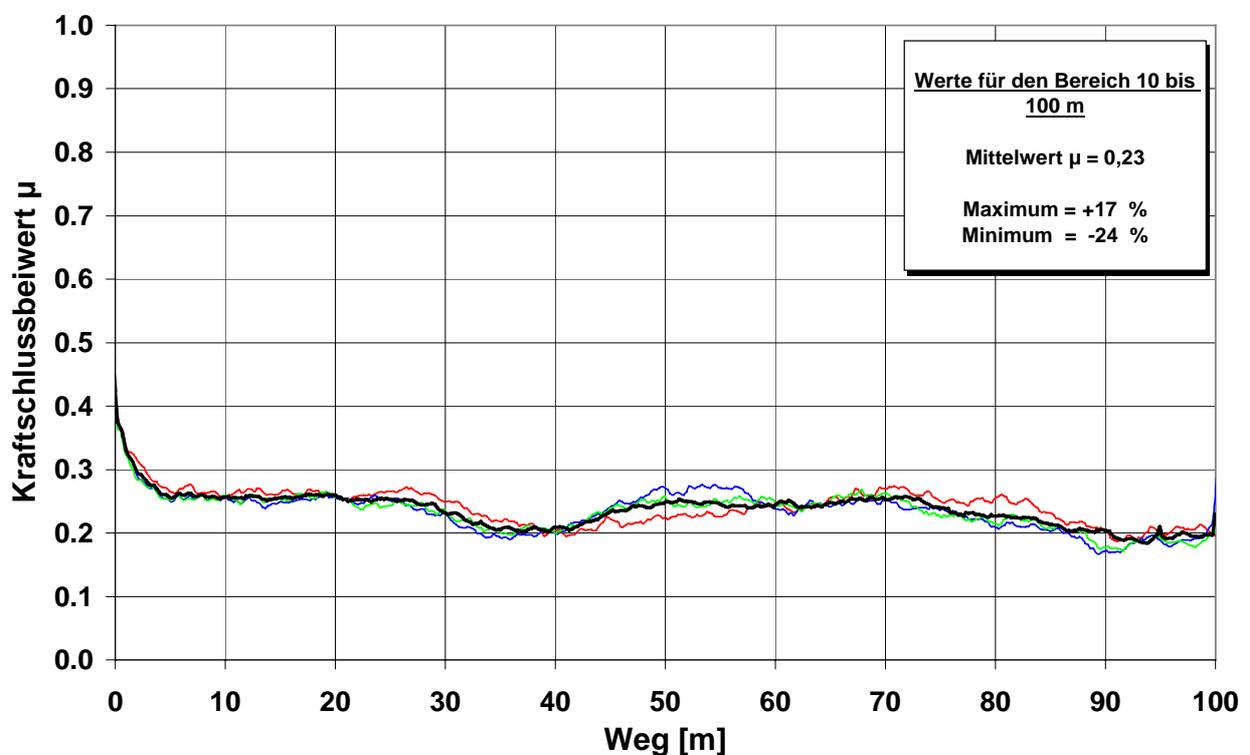
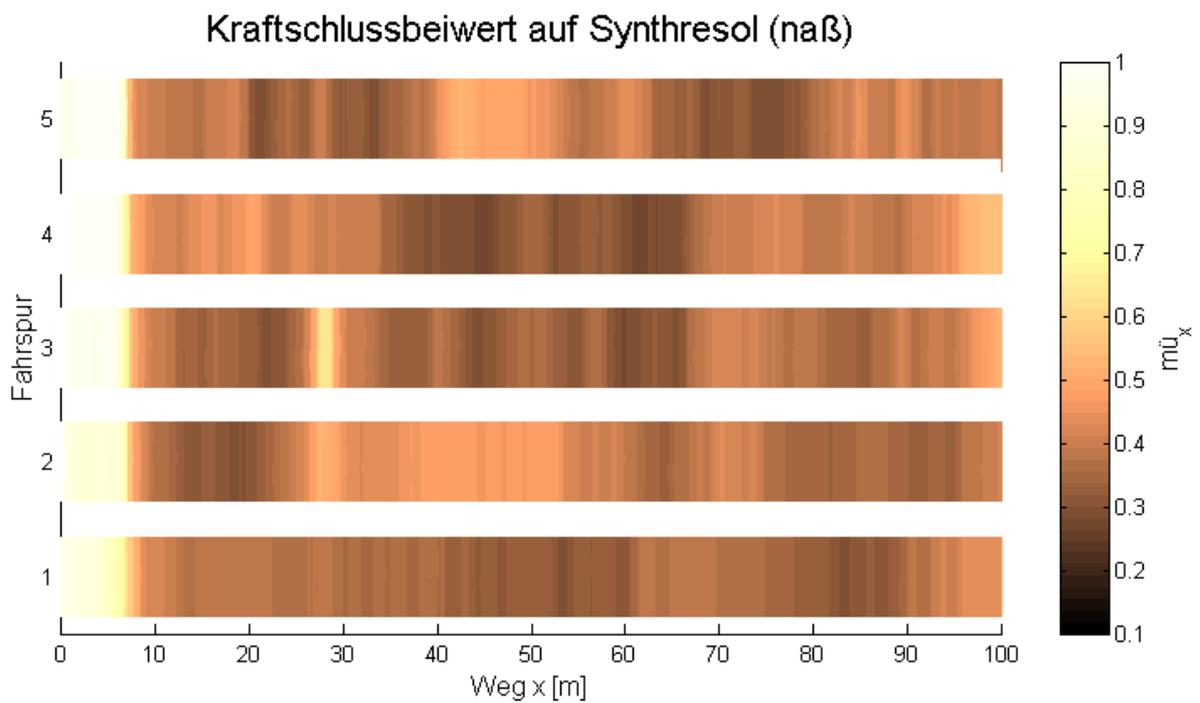
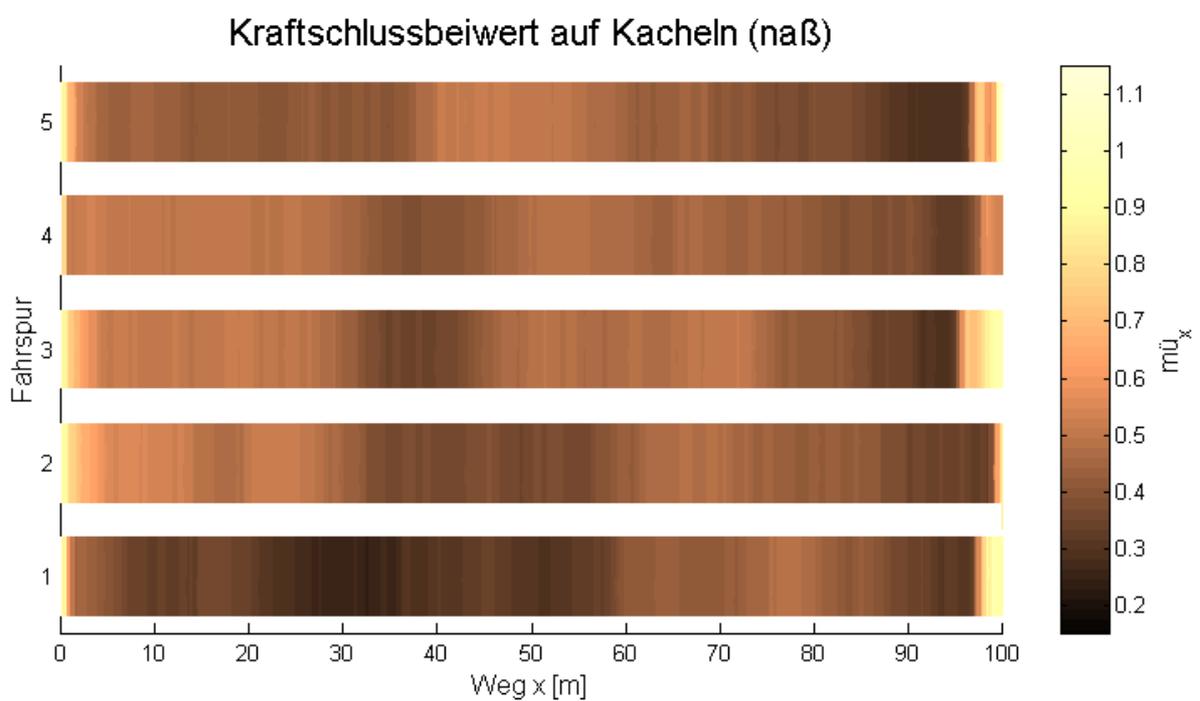


Abbildung 4: Kraftschlussverlauf der Fliesenbahn (eine Spur, Einzelmessungen farbig, Mittelwert schwarz)



**Abbildung 5:** Kraftschlussverlauf der Synthresolbahn (5 Spuren)



**Abbildung 6:** Kraftschlussverlauf der Fliesenbahn (5 Spuren)

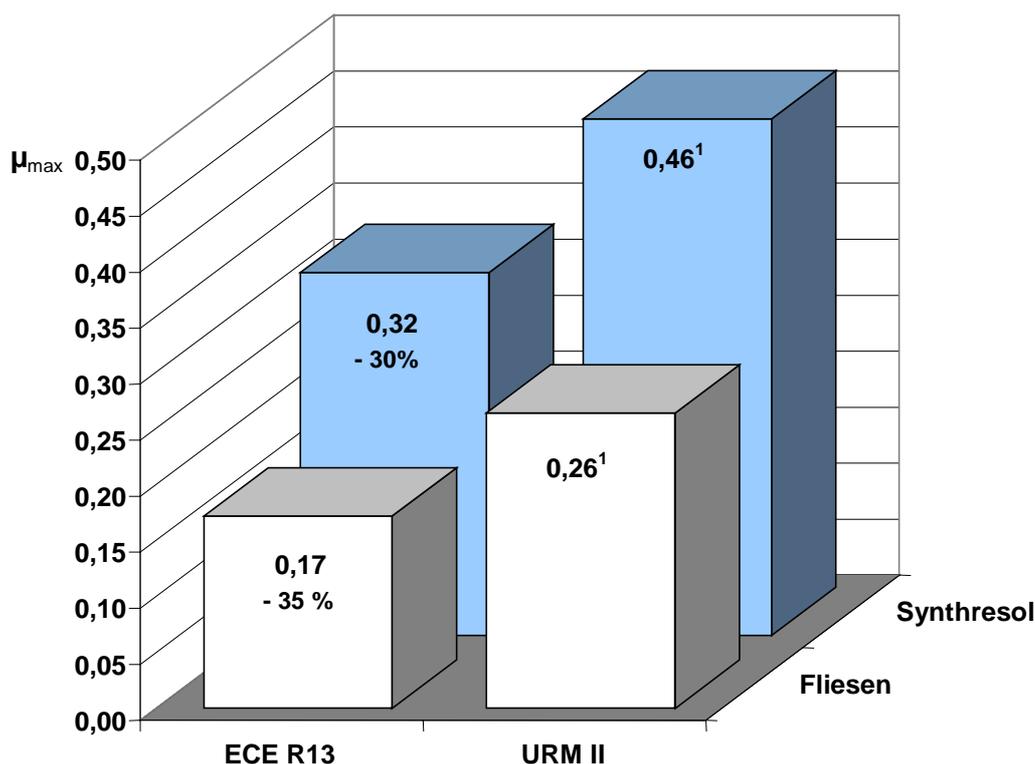
Bei der Bestimmung des maximalen Kraftschlusses nach ECE-R 13 wird die Messstrecke mit konstanter Bremskraft durchfahren. Da die Kraftschluss-Schlupf-Kurve nach dem Überschreiten des Maximums i. Allg. abfällt, wird ein Rad an der Stelle des geringsten auf der Bahn vorkommenden Kraftschlusses blockieren. Daher kann mit diesem Verfahren lediglich der kleinste maximale Kraftschluss einer Reifen-Fahrbahn-Kombination ermittelt werden. Folglich wird man für die beiden untersuchten Fahrbahnen maximale Kraftschlusswerte ermitteln, die, wenn die Größe der Fläche des minimalen Kraftschlusses zum Blockieren eines Rades ausreicht, in etwa 25-27 % kleiner sind als die jeweiligen mittleren Werte des maximalen Kraftschlusses. Für die in der Einleitung geforderte Genauigkeit eines Messverfahrens von 5 % bedeutet dies, dass, wenn das bisherige Verfahren bestehen bliebe, die Griffigkeit der Prüfstrecke um maximal 2,5 % um einen gedachten Mittelwert schwanken dürfte. Weitere URM II-Messungen auf verschiedenen Teststrecken haben jedoch gezeigt, dass die Kraftschlusschwankungen generell viel größer sind als 5 %, und zwar unabhängig vom Fahrbahnbelag (siehe **Tabelle 1**). Damit lässt sich schon nach diesen Untersuchungen feststellen, dass eine Abänderung oder Verbesserung der bestehenden Messprozedur nach ECE-R 13 nicht ausreicht, sondern dass, wenn möglich, ein neues Verfahren entwickelt werden sollte.

Fahrbahn	Mittelwert $\mu$	Maximalwert $\mu$	Minimalwert $\mu$
Blaubasalt Iveco-Ulm	0,72	+ 21 %	- 23 %
Fliesen Bosch-Boxberg	0,12	+ 12 %	- 14 %
Kopfsteinpflaster Bosch-Boxberg (Bahn 4)	0,67	+ 20 %	- 21 %
Kopfsteinpflaster Bosch-Boxberg (Bahn 7)	0,56	+ 25 %	- 25 %

**Tabelle 1:** Kraftschlusschwankungen für verschiedene Versuchsstrecken

### 3.1.2 Bestimmung des maximalen Kraftschlussbeiwertes

Nachdem die Kennfelder der für das Forschungsprojekt benutzten Pkw-Reifen mit dem Messfahrzeug URM II ermittelt waren, wurde der maximale Kraftschlussbeiwert für die beiden Versuchsstrecken mit einem dafür präparierten Fahrzeug nach der Vorschrift bestimmt. Die dabei ermittelten Kraftschlussbeiwerte sollen den jeweiligen maximalen Kraftschlussbeiwerten<sup>1</sup> entsprechen, weichen von diesen allerdings um rund 30 % bzw. 35 % nach unten ab (**Abbildung 7**). Dies ist theoretisch darauf zurückzuführen, dass kurzzeitige Einbrüche der zwischen Reifen und Fahrbahn übertragbaren Längskraft auftreten, die durch Griffigkeits- und Radlastschwankungen hervorgerufen werden. Diese Einbrüche führen offensichtlich zu einer starken Vergrößerung des Bremsschlupfes. In diesem Schlupfbereich nimmt die Längskraft ab, so dass auch ein anschließendes Ansteigen der Griffigkeit bzw. der Radlast nicht mehr ausreicht, genügend Längskraft zwischen Reifen und Fahrbahn zu übertragen. Mit den nach ECE-R 13, Anhang 13 ermittelten Kraftschlussbeiwerten beträgt die tatsächlich nach den Prüfkriterien erforderliche Kraftschlussausnutzung der geregelten Bremsungen nicht 75 %, sondern lediglich 53 % bzw. 49 % der mit dem URM II ermittelten maximal möglichen Abbremsung.



**Abbildung 7:** Vergleich Kraftschlussbeiwerte ECE-R 13 und URM II

<sup>1</sup> Die maximalen Kraftschlussbeiwerte der URM II-Messungen ergeben sich aus den Mittelwerten der Streckenabschnitte, auf denen die Bremsungen nach ECE-R13 durchgeführt wurden.

## 3.2 Lkw-Messungen

Nach den Untersuchungen mit einem Pkw kam die Frage auf, ob die Fehlereinflüsse bei der Ermittlung des maximalen Kraftschlussbeiwertes nach der ECE-Norm mit einem Lkw aufgrund der größeren Reifenaufstandsflächen und Massenträgheitsmomente der Räder andere bzw. geringere Auswirkungen haben. Daher wurde die Messprozedur mit einem unbeladenen, zweiachsigen Lkw (Leergewicht ca. 8 t) auf dem Bosch-Testgelände in Schwieberdingen durchgeführt, wobei zu den beiden bekannten Fahrbahnbelägen noch eine Blaubasaltbahn, ebenfalls bewässert, ins Versuchsprogramm aufgenommen wurde.

Zur Evaluierung der ermittelten Werte wurde die Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. Weber GmbH Hannover (IPW) beauftragt, die Kraftschlusseigenschaften des verwendeten Nutzfahrzeugreifens auf den jeweiligen Strecken festzustellen. Dabei kam ein Messzug für große Nfz-Reifen zum Einsatz. Nötig wurde dies, da mit dem institutseigenen Messfahrzeug URM II keine Lkw-Reifen vermessen werden können. Im Gegensatz zu diesem kann das Fahrzeug der Fa. IPW jedoch keinen gleichbleibenden Längsschlupf am Messrad erzeugen, so dass der Kraftschlussverlauf der Versuchsstrecken durch Befahren mit konstantem Schräglaufwinkel ermittelt wurde. Der dabei gemessene Verlauf des Seitenkraftbeiwertes  $\mu_s$  entspricht qualitativ und auch quantitativ etwa dem des Längskraftbeiwertes.

Die bei diesen Untersuchungen erzielten Ergebnisse bestätigen die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Messungen mit dem URM II. Zwar wurde wegen der Breite des IPW-Messzuges nur eine Fahrspur je Fahrbahn vermessen, die charakteristischen Kraftschlussverläufe von Synthresol- und Fliesenbahn zeigen jedoch eine recht gute Übereinstimmung mit den URM-Messungen. Dies gilt sowohl für die „langwelligen“ Kraftschlusschwankungen als auch für die Sensierung singulärer Ereignisse, wie z.B. der Reibwertsprung beim Überrollen eines defekten Belagabschnittes auf der Synthresolstrecke. Explizit erwähnt wird von der Fa. IPW die gute Reproduzierbarkeit der Messungen.

Das Versuchsprogramm bestand nicht nur aus der Aufzeichnung des Seitenkraftbeiwertes  $\mu_s$ , sondern auch aus den Programmteilen „Stationäres Schwenken“ und „Bremsen“. Beim stationären Schwenken wurde der Schräglaufwinkel des Messrades kontinuierlich erhöht, während der Programmteil „Bremsen“ aus der Aufnahme von  $\mu$ -Schlupf-Kurven bestand. Als Quintessenz der beiden Messprogramme lässt sich Folgendes zusammenfassen: Die unterschiedlich starken Kraftschlusschwankungen der drei Versuchsstrecken spiegeln sich auch in diesen Messungen wider. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Fliesenbahn, im Gegensatz zu den beiden anderen Bahnen, kein ausgeprägtes Maximum in der  $\mu$ -Schlupf-Kurve aufweist.

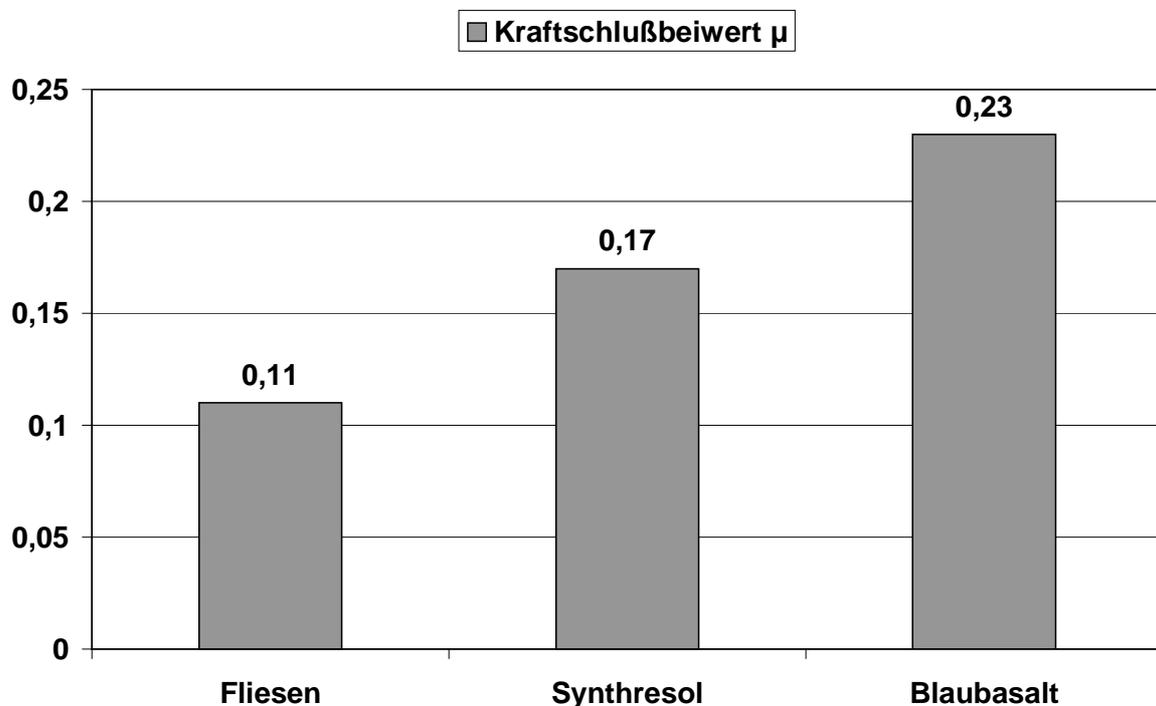
Die vorliegende Zusammenfassung beschränkt sich auf die Darstellung der Diagramme Seitenkraftbeiwert als Funktion der Streckenlänge. Eine komplette Übersicht über die durchgeführten Messungen kann dem gesonderten Versuchsbericht der Fa. IPW [23] entnommen werden.

**Abbildung 8** zeigt die nach ECE-R 13 ermittelten Kraftschlussbeiwerte. Ein Vergleich mit den Verläufen in **Abbildung 9**, **Abbildung 10** und **Abbildung 11** bestätigt die oben getroffene Aussage, dass der nach der Messprozedur ermittelte Wert generell im Be-

reich des niedrigsten auf der Messstrecke vorkommenden Kraftschlussbeiwertes liegt. Die Werte korrelieren recht gut mit denen der Pkw-Messungen, sofern man berücksichtigt, dass Nutzfahrzeugreifen hauptsächlich auf hohe Laufleistung ausgelegt werden und nicht auf möglichst gute Haftung.

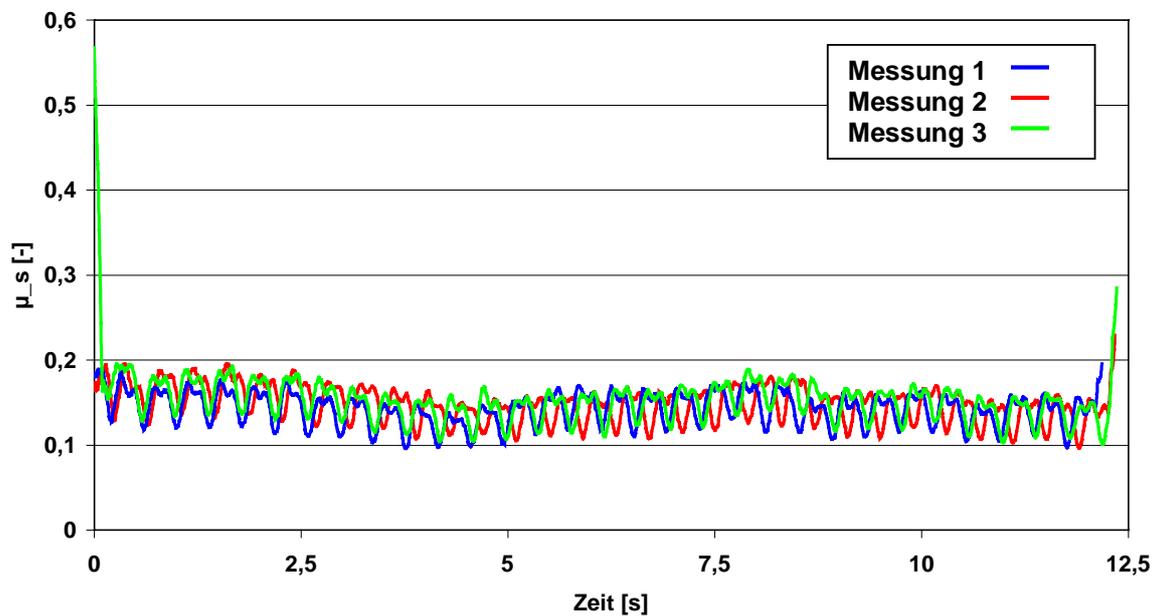
Mit den Kraftschlussbeiwerten ergeben sich die in **Abbildung 12** dargestellten Kraftschlussausnutzungen des ABS-Systems. Für die beiden relativ inhomogenen Fahrbahnbeläge Synthresol und Blaubasalt erhält man (physikalisch unsinnige) Ausnutzungsgrade von über 100 %. Dass dies hauptsächlich durch Griffigkeitsschwankungen der Strecken verursacht wird, lässt sich bei Betrachtung einiger ausgewählter Messschriebe für die Fahrzeug- bzw. Radgeschwindigkeit über der Zeit erkennen (siehe **Abbildung 13**, **Abbildung 14** und **Abbildung 15**).

Auf der homogenen Fliesenbahn lassen sich die Räder über weite Strecken in hohe Schlupfbereiche bringen, ohne dass es zum Blockieren kommt. Begünstigt wird dies dadurch, dass dieser Fahrbahnbelag kein ausgeprägtes Maximum der  $\mu$ -Schlupf-Kurve aufweist. Die Diagramme der beiden anderen Fahrbahnen sehen deutlich unregelmäßiger aus, da Kraftschluss- sowie Radlastschwankungen ein Herantasten an die Blockiergrenze der jeweiligen Achse verhindern. Ähnliches lässt sich aus den Zeitschrieben für Bremsungen mit regelndem ABS herauslesen, siehe **Abbildung 16 - 18**. Während der sehr gleichmäßige ABS-Regelzyklus bei der Fliesenbahn auf eine relativ homogene Strecke hindeutet, zeigt sich diese Regelmäßigkeit bei den Diagrammen für Blaubasalt und Synthresol nicht mehr. Dies liegt daran, dass sich das ABS-System auf den ständig schwankenden Kraftschluss einzustellen versucht, indem es den Bremsdruck variiert.



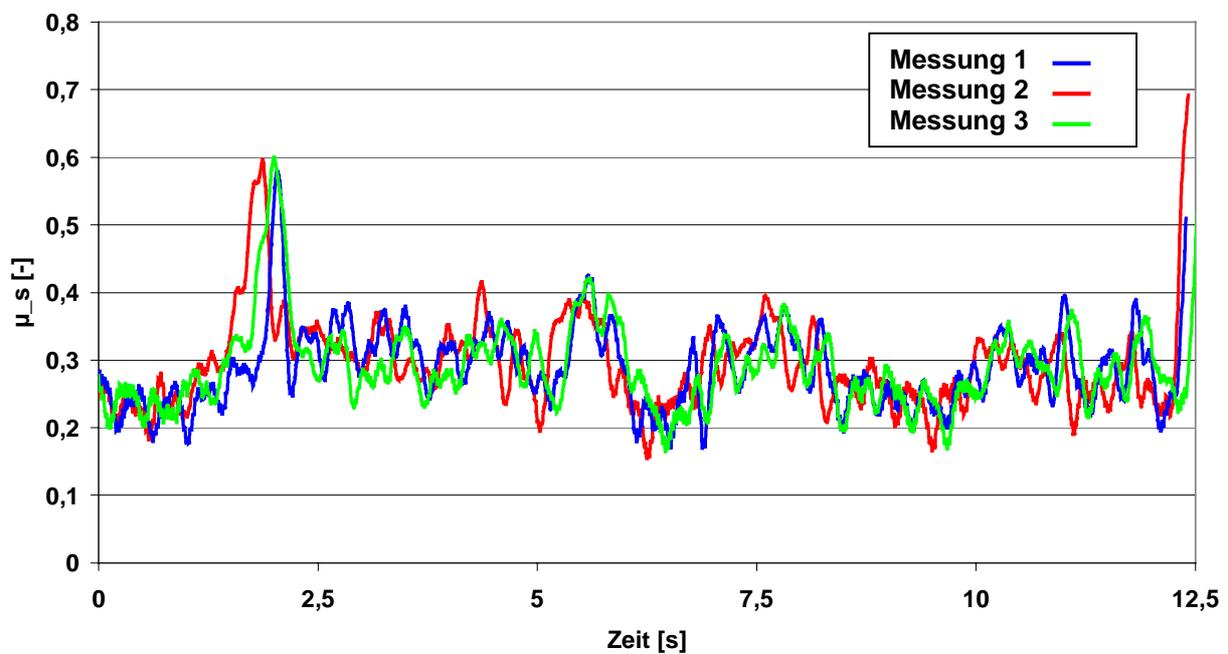
**Abbildung 8:** Nach ECE-R 13 ermittelte maximale Kraftschlussbeiwerte

*Fliesen nass /  $\alpha = 7,5^\circ$  /  $F_z = 25$  kN /  $v = 30$  km/h*



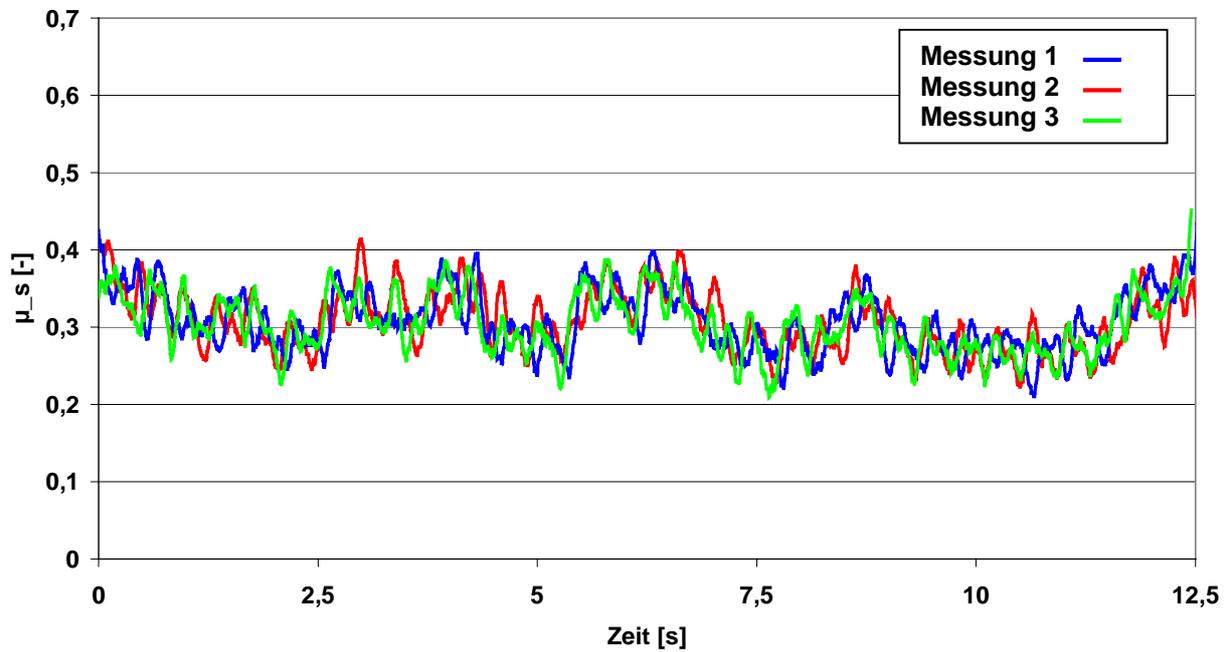
**Abbildung 9:** Kraftschlussverlauf der Fliesenbahn (3 Einzelmessungen)

*Synthresol nass /  $\alpha = 7,5^\circ$  /  $F_z = 25$  kN /  $v = 30$  km/h*

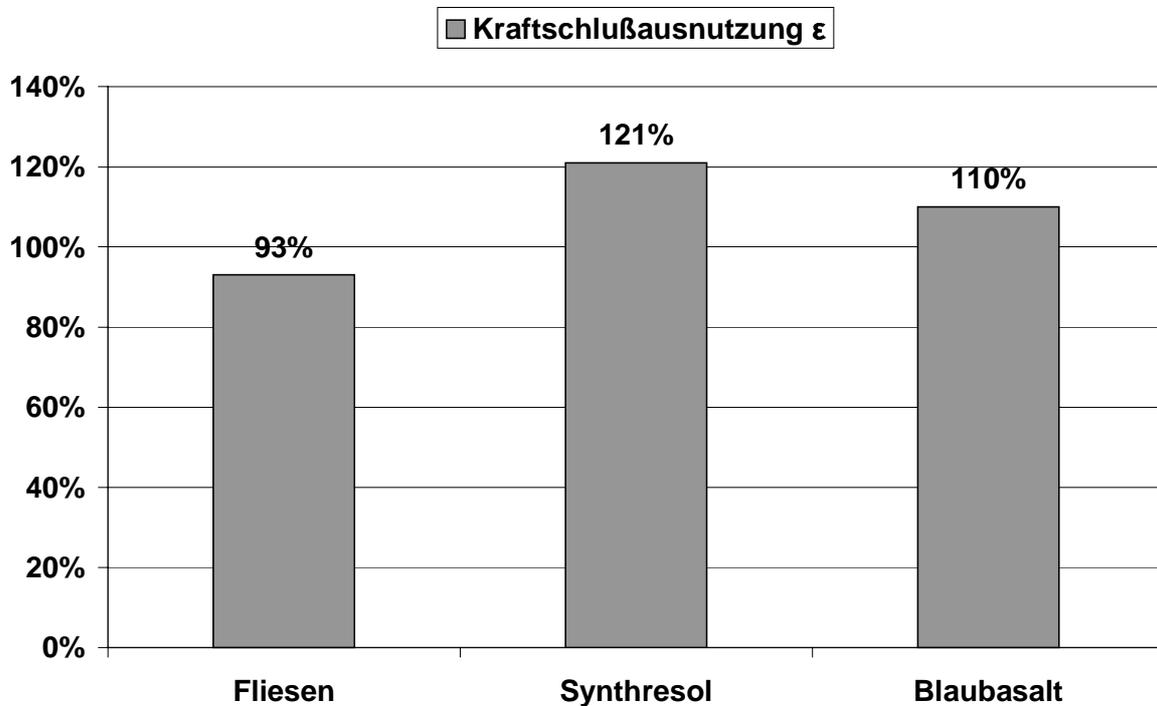


**Abbildung 10:** Kraftschlussverlauf der Synthresolbahn (3 Einzelmessungen)

*Blaubasalt nass /  $\alpha = 7,5^\circ$  /  $F_z = 35 \text{ kN}$  /  $v = 30 \text{ km/h}$*



**Abbildung 11:** *Kraftschlussverlauf der Blaubasaltbahn (3 Einzelmessungen)*



**Abbildung 12:** *Ermittelte Kraftschlußausnutzungen des ABS-Systems*

### Fliesenbahn, Vorderachse gebremst (p=const.)

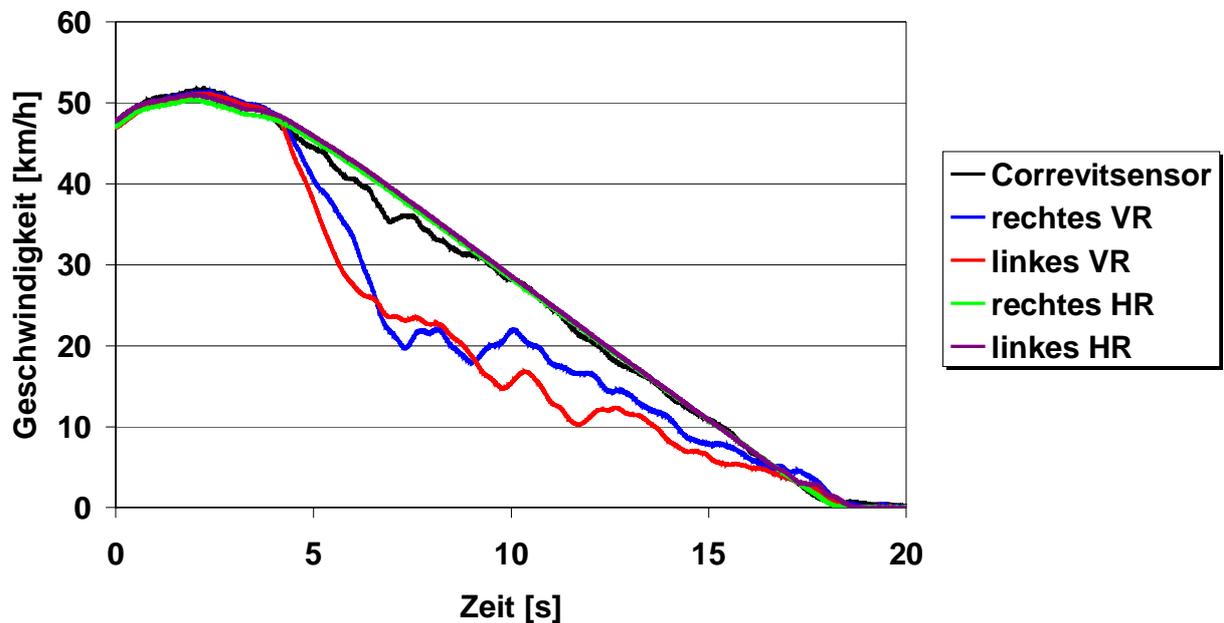


Abbildung 13: Verlauf der Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten bei gebremster Vorderachse auf der Fliesenbahn

### Synthresolbahn, Vorderachse gebremst (p=const.)

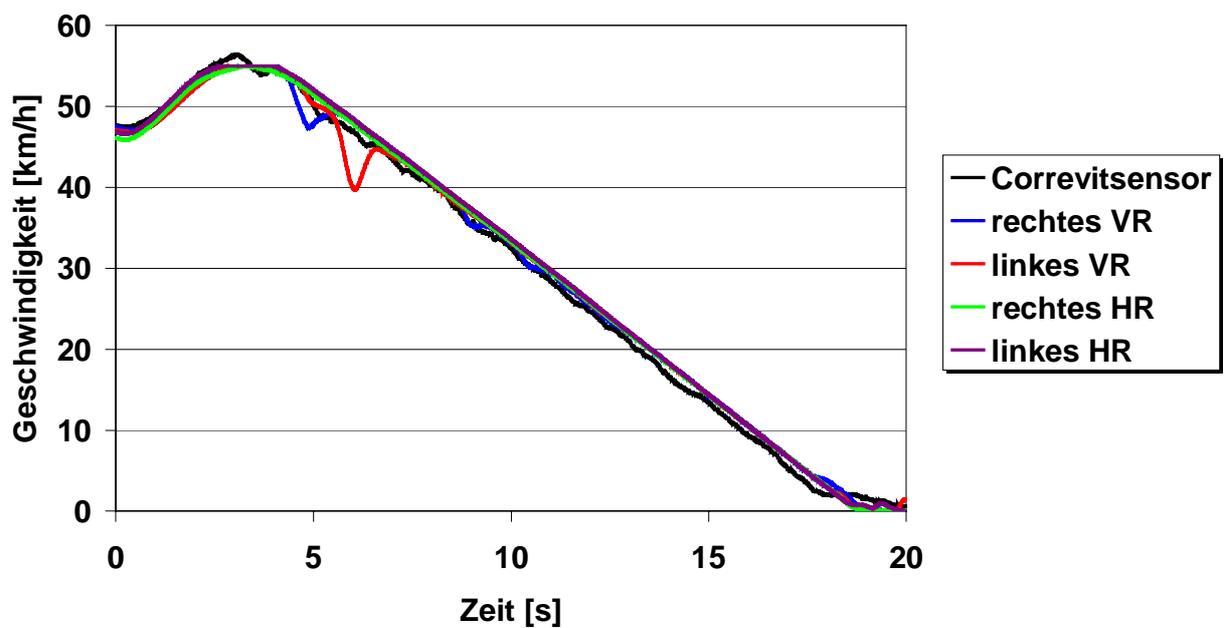


Abbildung 14: Verlauf der Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten bei gebremster Vorderachse auf der Synthresolbahn

### Blaubasaltbahn, Vorderachse gebremst (p=const.)

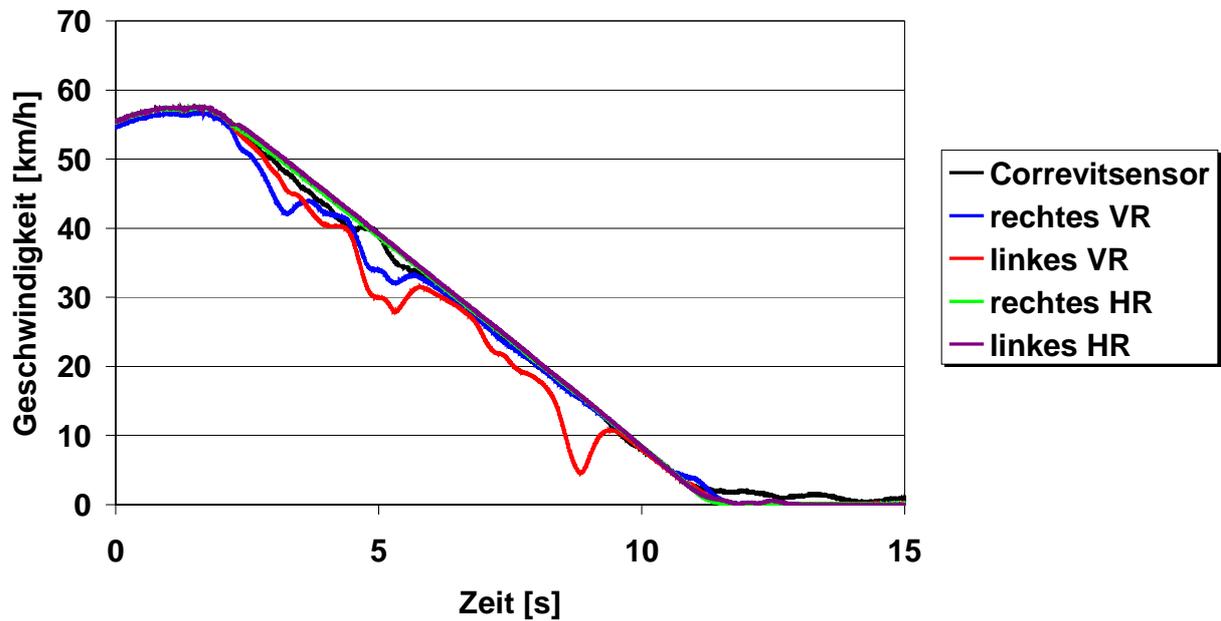


Abbildung 15: Verlauf der Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten bei gebremster Vorderachse auf der Blaubasaltbahn

### Fliesenbahn, ABS-Bremmung

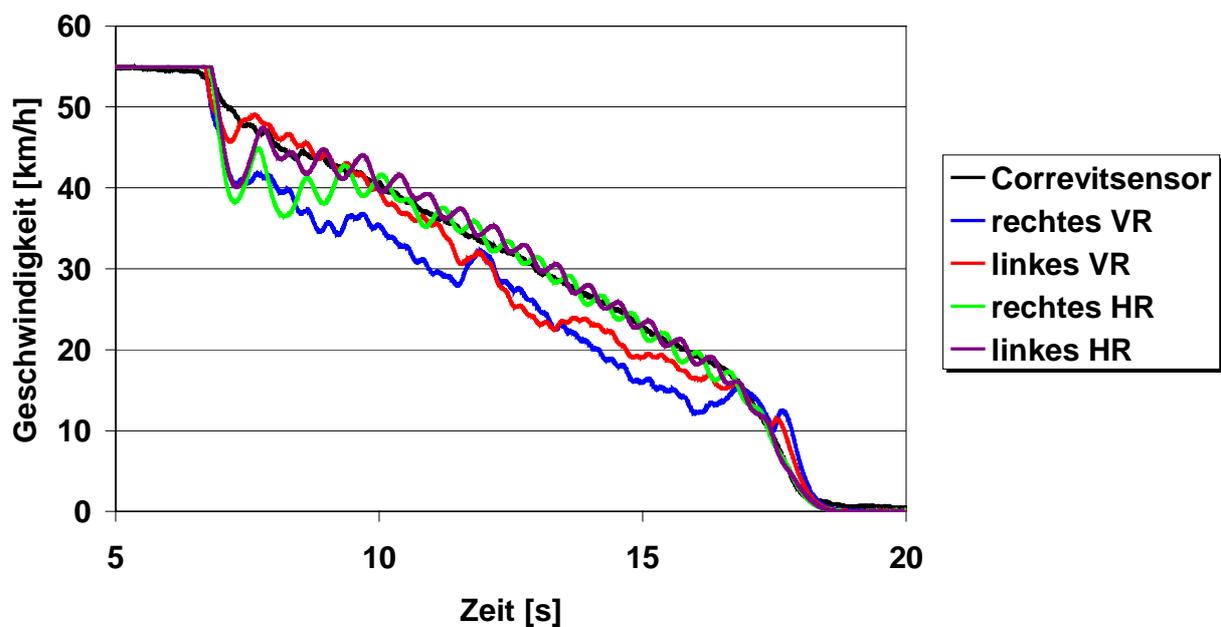


Abbildung 16: Verlauf der Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten bei einer ABS-Bremmung auf der Fliesenbahn

### Synthresolbahn, ABS-Bremmung

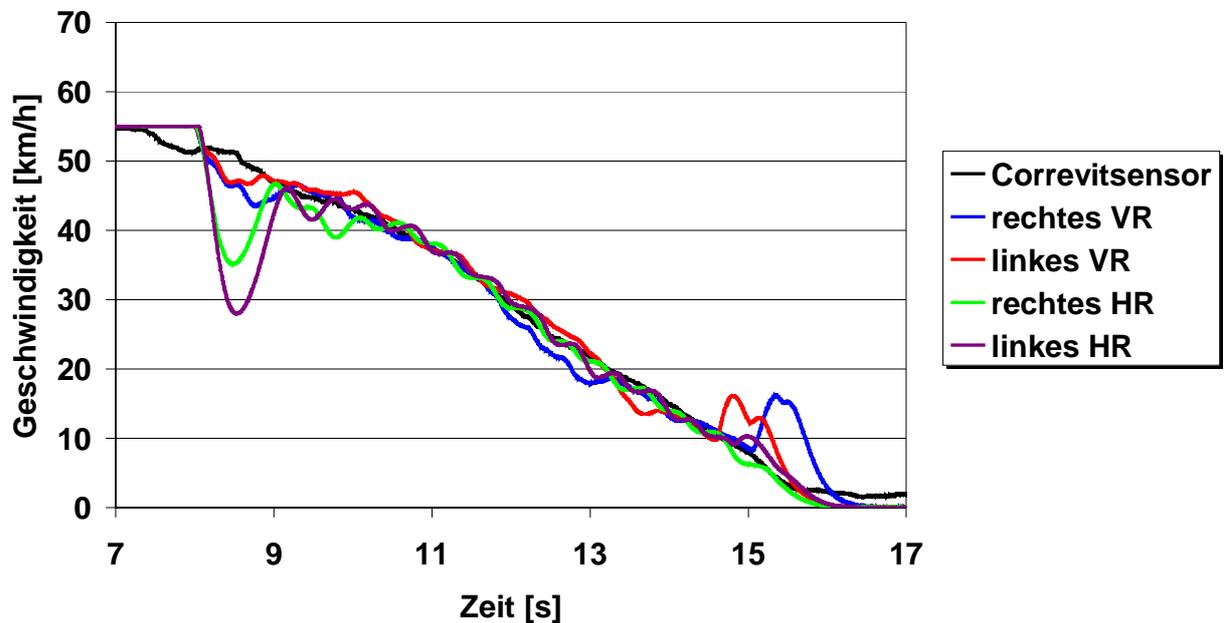


Abbildung 17: Verlauf der Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten bei einer ABS-Bremmung auf der Synthresolbahn

### Blaubasaltbahn, ABS-Bremmung

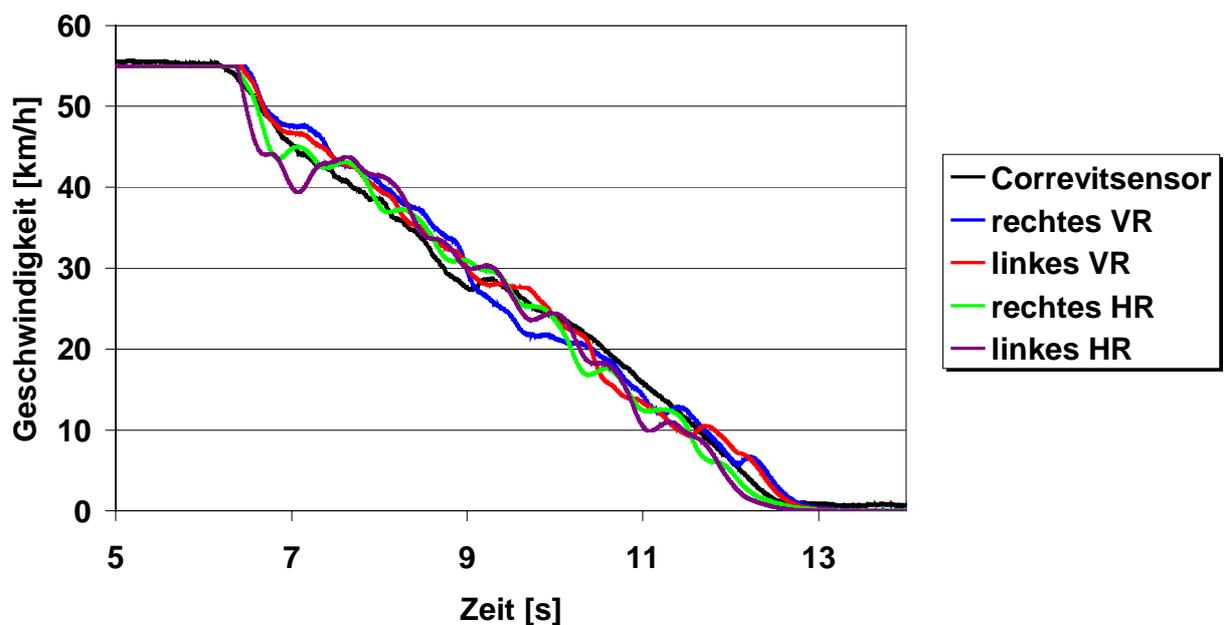


Abbildung 18: Verlauf der Fahrzeug- und Radgeschwindigkeiten bei einer ABS-Bremmung auf der Blaubasaltbahn

### 3.3 Theoretische Untersuchung des Einflusses von Kraftschlusschwankungen auf die erreichbare mittlere Bremsverzögerung

Die Prüfprozedur nach ECE-R13 geht davon aus, dass die Prüffahrbahn eine homogene Griffigkeit aufweist. Wenn aber die Prüfstrecke – wie oben gezeigt – in Längsrichtung inhomogen ist, so ist eine Abhängigkeit zwischen Startpunkt des Bremsversuchs und der erzielbaren Abbremsung zu erwarten. Diese Abhängigkeit wurde sowohl für die Synthresol- als auch für die Fliesenbahn theoretisch ermittelt, wobei die mit dem URM II und Pkw-Reifen gemessenen Kraftschlussverläufe zu Grunde lagen. Hierzu wurde der Bremsbeginn in 10m-Schritten variiert. Die Geschwindigkeit betrug bei Bremsbeginn 55 km/h. Zur Auswertung der mittleren Abbremsung wurde der Geschwindigkeitsbereich zwischen 45 und 15 km/h herangezogen. Unterschieden wurden folgende zwei Fälle: Die erzielbare Abbremsung variiert über der Strecke so, dass sie jeweils

- dem momentan verfügbaren Kraftschlussbeiwert oder
- 75 % des jeweils momentan verfügbaren Kraftschlussbeiwertes

entspricht.

**Abbildung 19** und **Abbildung 20** zeigen die Ergebnisse. Die farbigen Punkte repräsentieren den Startpunkt der Bremsung und die dabei erzielte Abbremsung. Die berechneten Abbremsungen schwanken erwartungsgemäß deutlich, wobei Abweichungen bis +50 % gegenüber dem im Durchschnitt ermittelten Wert erreicht werden. Bei geringerer Ausnutzung des Kraftschlusses ergeben sich größere Schwankungen. Dies ist auf den Kraftschlussanstieg am Ende der Messstrecken zurückzuführen. Diese Abschnitte werden nur bei geringerer Kraftschlussausnutzung aufgrund des verlängerten Bremsweges überfahren. Zur Veranschaulichung sind in **Abbildung 19** die jeweiligen Bremswege, die den Auswertebereich des ECE-Verfahrens darstellen, als waagerechte Linien eingetragen. Die **Tabelle 2** gibt noch einmal einen detaillierteren Überblick über die maximalen Abweichungen der jeweiligen Werte für die Abbremsung, die sich bei Variation des Startpunktes der Bremsung ergeben. Abschließend lässt sich zu diesen Untersuchungen sagen: Die Prozedur zur Ermittlung der Kraftschlussausnutzung nach ECE-R13 liefert einen  $\mu_{\max}$ -Wert, der, wie schon mehrfach erwähnt, im Bereich des niedrigsten auf der Messstrecke vorkommenden Wertes liegt. Ein gutes ABS-System kann jedoch auf eine sich ändernde Griffigkeit bis zu einem gewissen Grad reagieren. Da jede Fahrbahn stochastisch verteilte Inhomogenitäten aufweist und zudem die ABS-Bremsung wegen des kürzeren Bremsweges nicht auf dem gleichen Teilstück wie die Kraftschlussermittlung durchgeführt werden kann, wird man mit dem bestehenden Verfahren in den meisten Fällen eine zu hohe, nicht selten über 100 % liegende Kraftschlussausnutzung ermitteln.

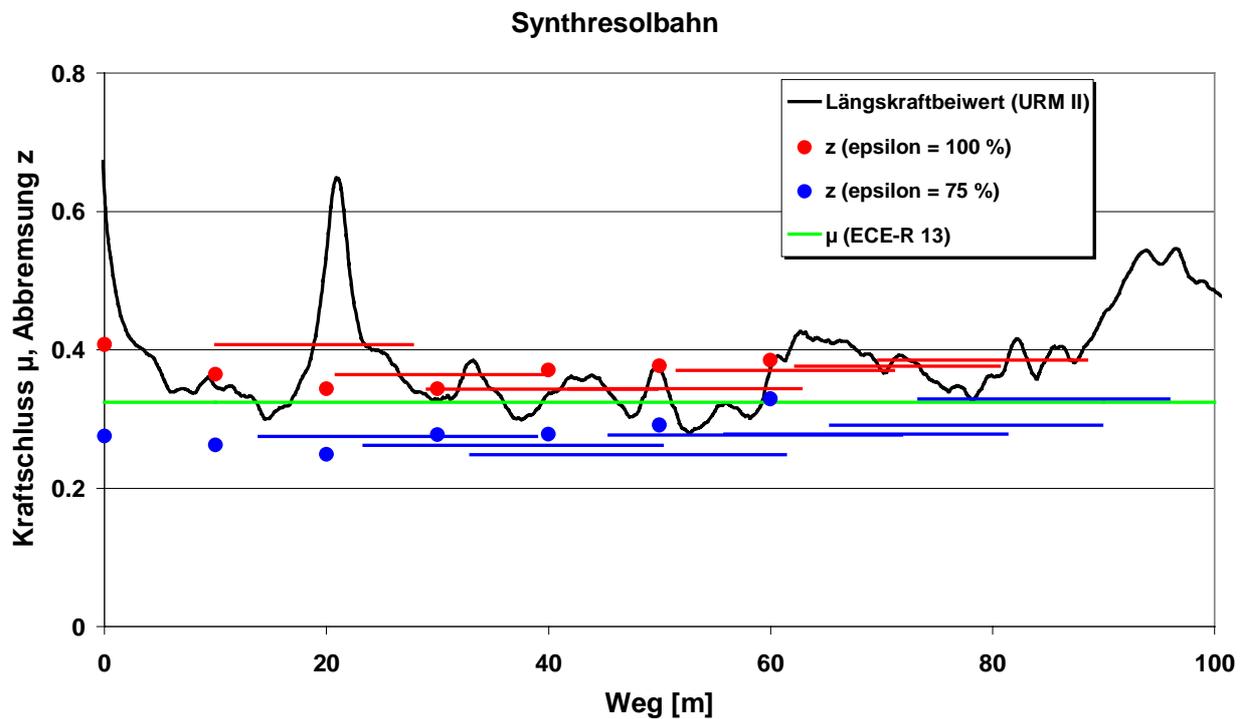


Abbildung 19: Theoretischer Einfluss des Startpunktes der Bremsung auf die erzielbare mittlere Abbremsung auf der Synthresolbahn

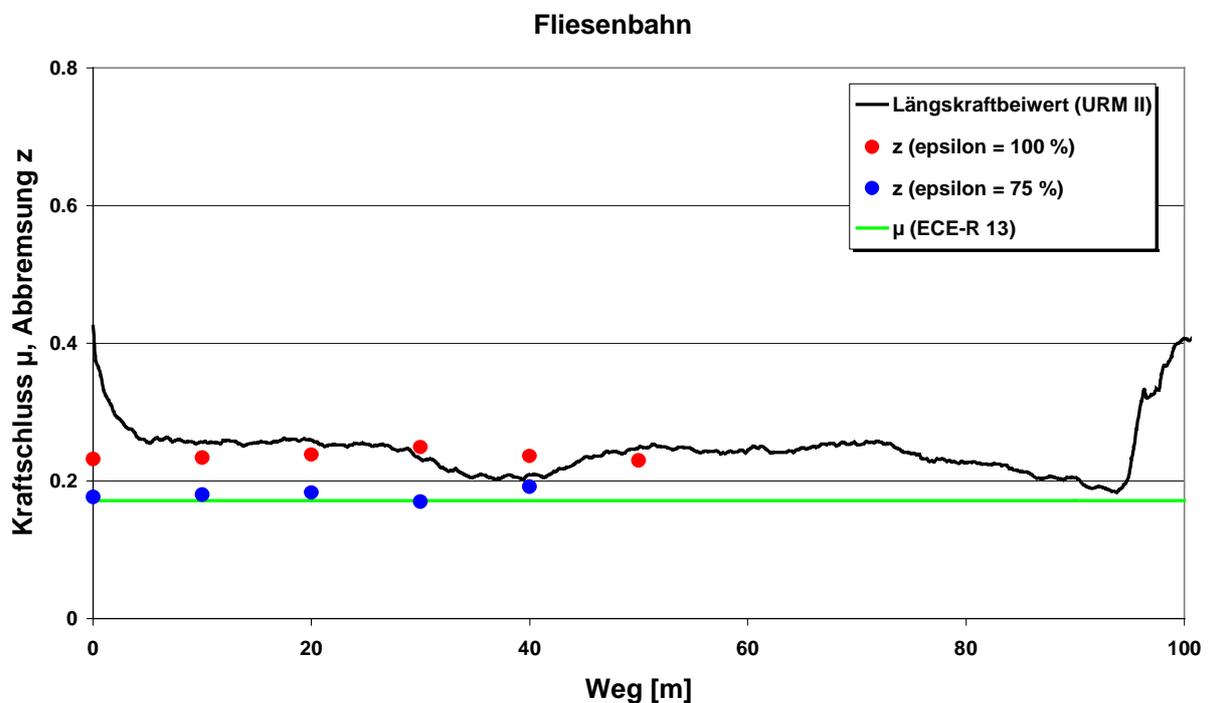


Abbildung 20: Theoretischer Einfluss des Startpunktes der Bremsung auf die erzielbare mittlere Abbremsung auf der Fliesenbahn

Bahn	Kraftschlussausnutzung	Abbremsung		
		arithm. Mittelwert	Minimalwert	Maximalwert
Synthresol	100 %	0,40	-14 %	+31 %
	75 %	0,31	-20 %	+50 %
Fliesen	100 %	0,24	-5 %	+16 %
	75 %	0,20	-17 %	+48 %

**Tabelle 2:** *Arithmetische Mittelwerte und Schwankungsbreite der theoretisch möglichen Abbremsungen bei verschiedenen Kraftschlussausnutzungsgraden*

### 3.4 Fazit

- Der Hauptgrund für einen zu niedrigen nach ECE-R 13 ermittelten Kraftschlussbeiwert sind Griffigkeitsschwankungen der Fahrbahn; Radlastschwankungen aufgrund von Streckenunebenheiten spielen zwar ebenfalls eine Rolle, sie sind jedoch nicht, wie ursprünglich angenommen, die Hauptursache.
- Alle Fahrbahnen des öffentlichen Straßennetzes weisen stochastische Inhomogenitäten des Kraftschlusses auf; daher sollte auch die Bestimmung der Kraftschlussausnutzung eines ABS-Systems nicht auf einer speziellen, besonders homogenen Versuchsbahn erfolgen.
- Ein von der bisherigen Prozedur abweichendes Messverfahren, das den Verlauf des Kraftschlusses entlang der Prüfstrecke berücksichtigt, wäre von großem Vorteil.

## 4 Alternative Modellansätze zur Kraftschlussbestimmung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, dass alle realen Fahrbahnen Kraftschlusschwankungen aufweisen und man die Kraftschlussausnutzung eines ABS-Systems nicht mit einem über der Streckenlänge als konstant angenommenen Kraftschlussbeiwert ermitteln kann. Daher werden hier nur Methoden vorgestellt, die die Möglichkeit bieten, den Kraftschlussverlauf der Messstrecke angenähert abzubilden und darüber hinaus den Anforderungen aus Kapitel 1 genügen.

### 4.1 Berechnung von $\mu_{\max}$ über die rotatorische Raddynamik

Die **Abbildung 21** zeigt ein einfaches Einradmodell. Die Reibkraft  $F_x$  in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn hängt ab von der Normalkraft  $F_N$  und vom Reibkoeffizienten  $\mu$ , der seinerseits eine Funktion des Schlupfes darstellt:

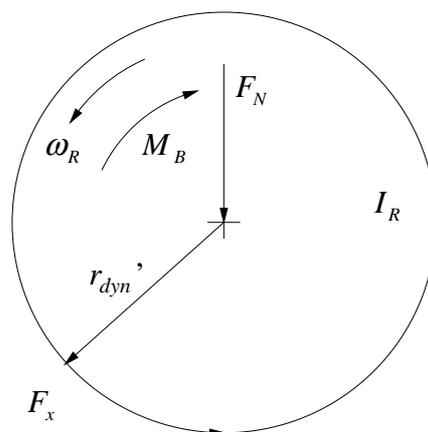
$$F_x = \mu(s) \cdot F_N$$

Das Momentengleichgewicht des gebremsten Rades ergibt sich zu

$$\begin{aligned} I_R \cdot \dot{\omega}_R &= F_x \cdot r_{dyn}' - M_B \\ &= \mu(s) \cdot F_N \cdot r_{dyn}' - M_B \end{aligned}$$

wobei  $I_R$  das Massenträgheitsmoment des Rades um die Drehachse,  $M_B$  das Bremsmoment,  $r_{dyn}'$  den Abstand zwischen Drehachse und Latschebene und  $\dot{\omega}_R$  die Radwinkelbeschleunigung darstellt. Der Kraftschlussbeiwert lässt sich dann folgendermaßen berechnen:

$$\mu(s) = \frac{I_R \cdot \dot{\omega}_R + M_B}{F_N \cdot r_{dyn}'}$$



**Abbildung 21:** Einfaches Einradmodell des gebremsten Rades

Die Durchführung dieses Verfahrens sähe in der Praxis dann so aus, dass man ein einzelnes Rad bis zum kurzzeitigen Blockieren abbremst und seine Drehbeschleunigung misst. Massenträgheitsmoment und dynamischer Radradius müssen bekannt sein, während die Normalkraft näherungsweise mit einem vereinfachten Fahrzeugmodell und der Verzögerung ermittelbar ist. Das Bremsmoment ist in erster Näherung proportional dem leicht zu messenden Bremsdruck, wobei die Abhängigkeit des Bremsmomentes vom Bremsdruck ( $M_B = f(p_B)$ ) natürlich bestimmt werden muss.

Eine weitere, eventuell besser geeignete Möglichkeit zur Bestimmung des Kraftschlussbeiwertes ergibt sich beim Wiederanlaufen des blockierten Rades nach Lösen der Bremse. Das Bremsmoment, das wohl den größten Unsicherheitsfaktor darstellt, fällt in diesem Fall weg und der Kraftschluss lässt sich wieder aus dem Momentengleichgewicht ableiten:

$$I_R \cdot \dot{\omega}_R = \mu(s) \cdot F_N \cdot r_{dyn}$$

$$\Rightarrow \mu(s) = \frac{I_R \cdot \dot{\omega}_R}{F_N \cdot r_{dyn}}$$

Eine Überschlagsrechnung zeigt, dass der Anlaufvorgang nur sehr kurze Zeit dauert und ein nicht zu unterschätzendes Problem somit die Messung der Radwinkelbeschleunigung darstellt. Beim Wiederanlaufen aus der Blockade durchläuft das Rad die komplette  $\mu$ -Schlupf-Kurve „rückwärts“, wobei sich der Kraftschluss und somit die Drehbeschleunigung ständig ändert. Es müssen also hochauflösende Drehwinkelgeber zum Einsatz kommen, um den interessierenden maximalen Wert zu messen. Denkbar wäre, dass zur Erhöhung des Massenträgheitsmoments und damit zur zeitlichen Streckung des Anlaufvorgangs ein Zusatzgewicht am Rad angebracht wird.

Die Durchführung eines der beiden Verfahren oder einer Kombination aus beiden im Rahmen der ECE-R13 hätte folgenden Umfang bezüglich der Versuchsvorbereitung:

- Bestimmung des Massenträgheitsmoments eines Rades inklusive eventueller Anteile des Antriebsstrangs
- Ermittlung des Zusammenhangs  $M_B = f(p_B)$
- Bestimmung der statischen Radlast und der Schwerpunktshöhe
- Ermittlung des dynamischen Radhalbmessers
- Umbau der Betriebsbremsanlage so, dass nur noch ein Rad gebremst werden kann
- Einbau eines hochauflösenden Drehwinkelgebers, eines Längsbeschleunigungsaufnehmers und der dazugehörigen Messtechnik

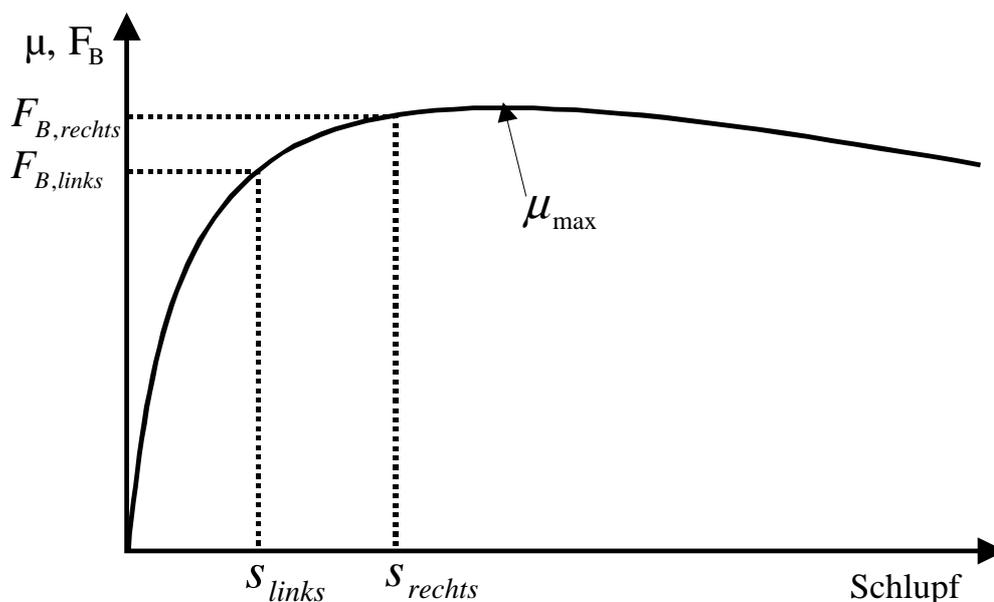
## 4.2 Berechnung von $\mu_{\max}$ mittels mathematischer Reifenmodelle

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei diesem Verfahren sieht folgendermaßen aus: Man führt eine Vollbremsung mit regelndem ABS durch und misst gleichzeitig die Fahrzeugverzögerung sowie den Schlupf an allen Rädern. Aus der Verzögerung lassen sich die Gesamtbremskraft und die dynamischen Achslasten berechnen, sofern die Lage des Schwerpunktes hinreichend genau bekannt ist. Anschließend ermittelt man mit Hilfe mathematischer Modelle (siehe Abschnitt 5.2.1 ff. bzw. 7.1) eine gemeinsame  $\mu$ -Schlupf-Kurve (siehe auch Abbildung 29 und Abschnitt 5.3), für die die Summe der Längskräfte bei den gemessenen Schlupfwerten gleich der Gesamtbremskraft ist. Aus der mathematischen Beschreibung der Kurve lässt sich dann der Maximalwert einfach bestimmen (siehe **Abbildung 22**).

Voraussetzung für das Verfahren ist allerdings, dass die Modellparameter bekannt sind, was wiederum bedingt, dass man das grundsätzliche Kraftschlussverhalten der verwendeten Reifen auf der befahrenen Fahrbahn und bei den herrschenden Randbedingungen kennen muss.

Die Genauigkeit des Verfahrens lässt sich verbessern, indem die Abhängigkeit des Verlaufs einer  $\mu$ -Schlupf-Kurve von der Radlast berücksichtigt wird. Dies kann dadurch geschehen, dass für Vorder- und Hinterachse des Fahrzeugs bzw. bei Fahrzeugzügen für jede einzelne Achse eine eigene Kraftschluss-Schlupf-Kurve berechnet wird.

Die Durchführung dieses Verfahrens erfordert einen vergleichsweise geringen Aufwand, da die Werte, die zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines ABS-Systems notwendig sind, gleichzeitig aus nur einer geregelten Bremsung berechnet werden können. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass man den Kraftschlussverlauf entlang des Bremsweges erhält, indem man für viele gemessene Schlupfwerte die dazugehörigen Kurven ermittelt und jeweils das Maximum bestimmt.



**Abbildung 22:** Beispielhafte Darstellung der Anpassung einer  $\mu$ -Schlupf-Kurve an gemessene Schlupfwerte

Die in Kapitel 1 geforderte Messgenauigkeit des Verfahrens bedingt eine hinreichend genaue Messung des Bremsschlupfes. Hierfür sind die serienmäßigen ABS-Drehzahlsensoren des Fahrzeugs jedoch nicht geeignet, da die Elastizitäten der Radaufhängung durch das pulsierende Bremsmoment bei einer ABS-geregelten Bremsung eine starke Verfälschung der Raddrehzahlsignale bewirken. Besser sind gesonderte Drehgeber an jedem einzelnen Rad, die jedoch nicht am Radträger befestigt werden dürfen.

Die Durchführung dieses Verfahrens im Rahmen der ECE-R13 hätte folgenden Umfang:

- Montage der hochauflösenden Drehgeber an allen Rädern
- Montage eines Geschwindigkeitssensors (korrelationsoptisch oder Peiseler-Rad)
- Montage eines Längsbeschleunigungssensors
- Applikation der dazugehörigen Messtechnik zur Datenaufzeichnung
- Bestimmung der Schwerpunktlage und des dynamischen Reifenhalbmessers

Die Berechnung des maximalen Kraftschlusses bzw. seines Verlaufs erfolgt dann offline durch ein geeignetes Programm.

### 4.3 Vergleich der beiden Verfahren bezüglich Aufwand, Durchführbarkeit und Genauigkeit

Das Verfahren der Kraftschlussbestimmung über die rotatorische Raddynamik, im Folgenden auch als „erstes Verfahren“ bezeichnet, bietet den Vorteil, dass sich das Maximum der realen  $\mu$ -Schlupf-Kurve der Reifen-Fahrbahn-Kombination direkt messen lässt. Im Gegensatz zu dem zweiten vorgestellten Messverfahren muss also keine Abschätzung des Verlaufs der Kraftschluss-Schlupf-Charakteristik erfolgen.

Nachteilig hingegen ist zunächst einmal, dass der Kraftschlussbeiwert nur für einzelne Punkte der Prüfstrecke ermittelt werden kann. Um einen Überblick über den Verlauf des Kraftschlusses entlang der Bahn zu bekommen, müssen viele Messfahrten durchgeführt werden. Diese Anzahl lässt sich jedoch verringern, wenn der Zyklus aus Abbremsen und Wiederanlaufen des Rades während einer Messfahrt mehrfach durchgeführt wird. Außerdem ist die Stelle der Messung durch Wahl des Bremspunktes beeinflussbar, was bei inhomogenen Fahrbahnen von Vorteil sein kann. Will man z.B. den Kraftschlussbeiwert einer optisch auffälligen Fläche der Prüfbahn ermitteln, so ist dies relativ einfach möglich, während man mit dem bisherigen ECE-Verfahren immer nur das Minimum des Kraftschlusses innerhalb der Messstrecke bestimmen kann.

Die besprochene Methode hat einen prinzipbedingten Nachteil, den alle Verfahren haben, bei denen die Ermittlung des Kraftschlusses und die Bestimmung der Kraftschlussausnutzung in zwei verschiedenen Messreihen geschieht. Dem Fahrer wird es nämlich kaum gelingen, die Vergleichsbremung mit regelndem ABS in der exakt gleichen Fahrspur wie die Messfahrten durchzuführen. Dieser Umstand kann zu Verfälschungen des Ergebnisses führen, da in Kapitel 2 gezeigt wurde, dass reale Fahrbahnen nicht nur in Fahrtrichtung inhomogen sind, sondern auch quer dazu.

Ein zusätzlicher Aufwand bezüglich der Versuchsvorbereitung ergibt sich durch den benötigten funktionalen Zusammenhang von Bremsmoment und Bremsdruck, der sich zudem infolge von Kraftschlussschwankungen zwischen Bremsbelag und Brems Scheibe ändern kann. Die Ermittlung des Massenträgheitsmoments eines Rades und eventueller Anteile des Antriebsstrangs stellt einen weiteren Unsicherheitsfaktor dar. Bringt man jedoch, wie bereits erwähnt, eine Zusatzmasse mit bekanntem Trägheitsmoment am Messrad an, so wird zum einen der relative Fehler geringer, zum anderen lässt sich das Massenträgheitsmoment des Rades einfacher bestimmen, indem man einmal mit Zusatzmasse und einmal ohne misst.

Der Hauptvorteil der Kraftschlussbestimmung durch Approximation einer  $\mu$ -Schlupf-Kurve (zweites Verfahren) besteht darin, dass man die Kraftschlussausnutzung mittels einer ABS-geregelten Bremsung direkt ermitteln kann. Es sind also keine Vergleichsbremungen nötig, so dass das o.g. Problem der bei verschiedenen Messungen voneinander abweichenden Fahrspuren entfällt. Des Weiteren ist das Verfahren mess- und versuchstechnisch weniger aufwändig.

Als Nachteil ist die Berechnung des  $\mu_{\max}$ -Wertes durch einen Algorithmus zu nennen. Das Verfahren kann damit nur so gut sein wie das ihm zu Grunde liegende mathematische Modell. Explizit erwähnt werden sollte, dass die Rechenvorschrift kein aufwändiges Reifenkennfeld beinhaltet, sondern nur das grundsätzliche Reifenlängsverhalten wiedergibt. Dies kann jedoch prinzipbedingt nur angenähert geschehen. Der Restfehler be-

zöglich der letztendlich interessierenden Kraftschlussausnutzung der Bremsanlage wird aber vermutlich kleiner als die geforderte Genauigkeit von fünf Prozent sein.

Das Fazit dieses Vergleichs lässt sich wie folgt ziehen: Das Verfahren, das den Kraftschlussbeiwert über die Raddynamik ermittelt, hat einen hohen Zeitaufwand bezüglich der Vorbereitung und Durchführung der Messungen. Bei der zweiten Methode besteht der Nachteil in der indirekten Bestimmung des maximalen Kraftschlusses durch eine mathematische Annäherung des realen Reifenverhaltens. Die Vorteile sind hier jedoch evidenter als bei dem ersten Verfahren.

Auf Grund der beschriebenen Eigenheiten der beiden Messverfahren wurde beschlossen, sich zunächst auf das Verfahren der mathematischen  $\mu_{\max}$ -Berechnung zu konzentrieren und eine erste Potenzialabschätzung unterschiedlicher mathematischer Modelle durchzuführen. Weiterhin sollten erste Sensitivitätsanalysen den Umfang der zur theoretischen Absicherung des Verfahrens erforderlichen Sensitivitätsanalysen aufzeigen.

## 5 Ermittlung des Kraftschlussverlaufs mittels mathematischer Reifenmodelle – erste Ergebnisse

### 5.1 Versuchsfahrzeug und Messtechnik

Als Versuchsfahrzeug diente eine Mercedes-Limousine der Baureihe W124, die auch schon bei der Messprozedur nach ECE-R13 verwendet wurde. Für diesen Zweck wurde der Wagen mit entsprechender Messtechnik ausgerüstet. Zur Ermittlung der Fahrzeuglängsverzögerung kam eine kreiselstabilisierte Plattform zum Einsatz, die bei ausgebauter Rücksitzbank auf dem Kardantunnel und somit in der Nähe des Fahrzeugschwerpunkts montiert war. Die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, die zur Berechnung des Reifenschlupfs benötigt wird, wurde mit Hilfe eines korrelationsoptischen Geschwindigkeitssensors (Correvitsensor) bestimmt.

Bei der Aufnahme der Raddrehzahlen waren einige Besonderheiten zu beachten. Um im Rahmen dieser ersten Potenzialabschätzung möglichst schnell aussagefähige Ergebnisse zu erhalten, wurde zunächst beschlossen, die Signale der serienmäßigen Drehzahlsensoren der ABS-Anlage abzugreifen, obwohl es dabei prinzipbedingt zu Verfälschungen kommt. Da das Versuchsfahrzeug jedoch mit einem 3-Kanal-ABS ausgerüstet ist, welches die Hinterraddrehzahlen nicht einzeln, sondern nur gemittelt erfasst, mussten an den Hinterrädern separate Drehgeber angebracht werden (siehe **Abbildung 23**). Die Drehgeber waren über Teleskopstangen, die als Verdrehschutz dienten, mit der Karosserie verbunden. Die Vorderraddrehzahlen wurden, wie ursprünglich geplant, durch Abgreifen der ABS-Sensorsignale ermittelt. Dazu war es jedoch nötig, die sinusförmigen Rohsignale mittels einer elektronischen Schaltung (sog. Schmitt-Trigger) in rechteckförmige TTL-Impulse umzuwandeln.

Die Signale der Vorderradsensoren (96 Impulse/Umdrehung) und die der Hinterradsensoren (1000 Impulse/Umdrehung) wurden einem mit einer Zählerkarte bestückten PC zugeführt. Auf diese Weise konnten die Radwinkelgeschwindigkeiten durch Messung der Zeiten zwischen aufeinander folgenden Impulsen berechnet werden.

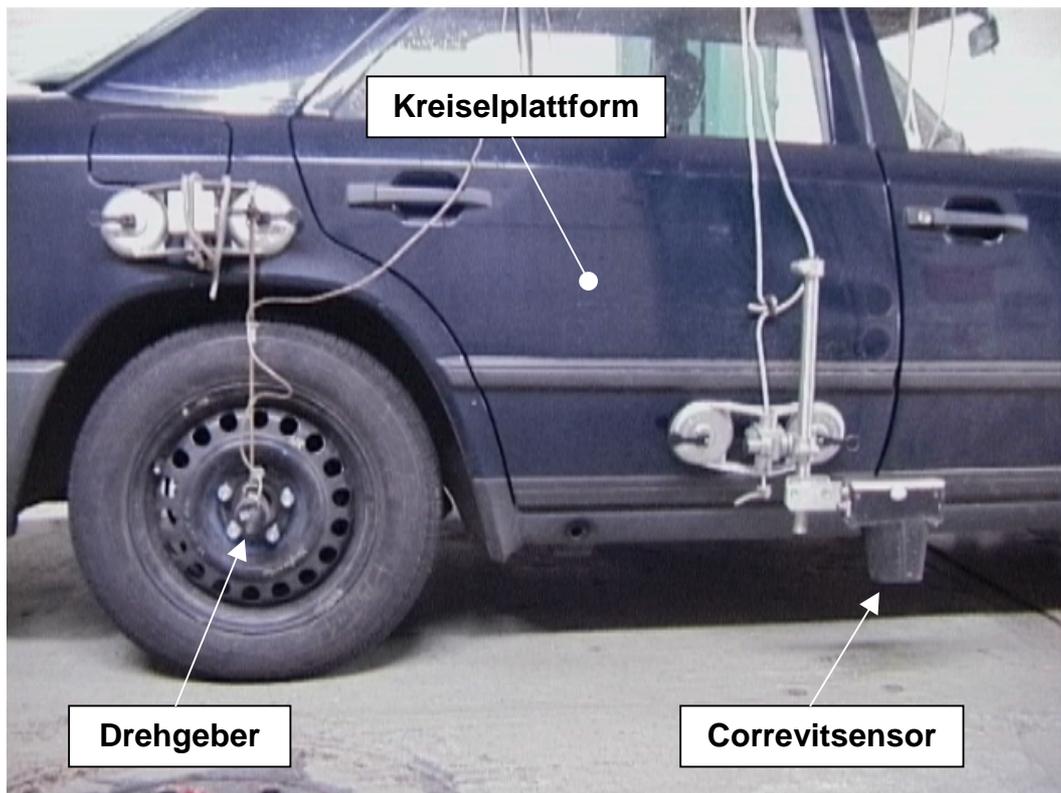


Abbildung 23: Versuchsfahrzeug mit Messtechnik

## 5.2 Prinzip der Kraftschlussmittlung mittels mathematischer Reifenmodelle

Von den im Anhang aufgeführten Formeln eignen sich theoretisch drei, die Magic Formula nach Pacejka, die Burckhardt-Formel und die Haken-Formel zur Kraftschlussberechnung, da alle diese Reifenmodelle den kompletten Schlupfbereich (0 bis 100 %) abdecken. Die Formel nach Haken wurde hier nicht verwendet, da sie sich in der praktischen Anwendung als weniger gut geeignet erwies. Es sei jedoch erwähnt, dass mit der Haken-Formel ähnliche Ergebnisse wie mit der Magic Formula zu erwarten sind, da die Abbildung von realen Reifenkennlinien bei beiden Modellen zu fast identischen Kurvenverläufen führt.

### 5.2.1 Magic Formula Tyre Model

Die sog. „Magic Formula“ ist ein semiempirisches mathematisches Reifenmodell, d.h. sie stellt die Abhängigkeit zwischen Reifenumfangskräften bzw. –momenten und den jeweiligen Schlupfgrößen in einen formelmäßigen Zusammenhang. Sie wurde maßgeblich von H.B. Pacejka an der Technischen Universität Delft entwickelt und kann als Standardreifenmodell in der industriellen und akademischen Forschung angesehen werden. Die für dieses Modell gewählte mathematische Beschreibung hat nicht nur den Vorteil, alle Reifencharakteristika (Umfangs- und Seitenkräfte sowie Rückstellmomente) auf relativ einfache Weise genau beschreiben zu können, sondern sie ist auch so aufgebaut, dass einzelne Koeffizienten physikalisch interpretiert werden können. Die Formel lautet:

$$\mu(s) = D \cdot \sin(C \cdot \arctan(B \cdot s - E(B \cdot s - \arctan(B \cdot s))))$$

wobei  $\mu$ , wie allgemein üblich, den Kraftschlussbeiwert und  $s$  den Reifenschlupf repräsentiert.

Diese mathematische Funktion beschreibt eine Kurve, die durch den Koordinatenursprung  $x = y = 0$  geht, ein Maximum erreicht und dann gegen eine horizontale Asymptote läuft. Die in der Formel vorkommenden Koeffizienten der Reifenkennlinie haben folgende Bedeutung (siehe auch **Abbildung 24**):

Der Maximalwert, bei einer realen  $\mu$ -Schlupf-Kurve üblicherweise mit  $\mu_{\max}$  bezeichnet, wird durch den Faktor  $D$  wiedergegeben, während das Produkt  $BCD$ , auch mit  $K$  bezeichnet, die Steigung aus dem Ursprung angibt. Für den hier nur interessierenden Fall des Zusammenhangs zwischen Längskraft und Längsschlupf stellt das Produkt  $BCD$  die sogenannte Längskraftsteifigkeit dar.  $C$  bestimmt die Grenzen des Arguments der Sinus-Funktion und legt damit fest, ob die Kurve eine typische Umfangskraft-, Seitenkraft- oder Rückstellmomentencharakteristik beschreibt. Für Umfangskraftkurven liegt  $C$  um den Wert 1,65. Da  $D$  durch den Maximalwert festgelegt wird und  $C$  durch die Form der Kurve, kann nur noch  $B$  (als Teil des Produkts  $BCD$ ) die Längskraftsteifigkeit beschreiben.  $E$  gestattet eine Veränderung der Krümmung der Kurve bei gleichbleibendem Maximalwert und Anfangssteigung und bestimmt somit den Schlupf  $s_m = s(\mu_{\max})$ , bei dem der Maximalwert erreicht wird:

$$E = \frac{B \cdot s_m - \tan\left(\frac{\pi}{2C}\right)}{B \cdot s_m - \arctan(B \cdot s_m)}$$

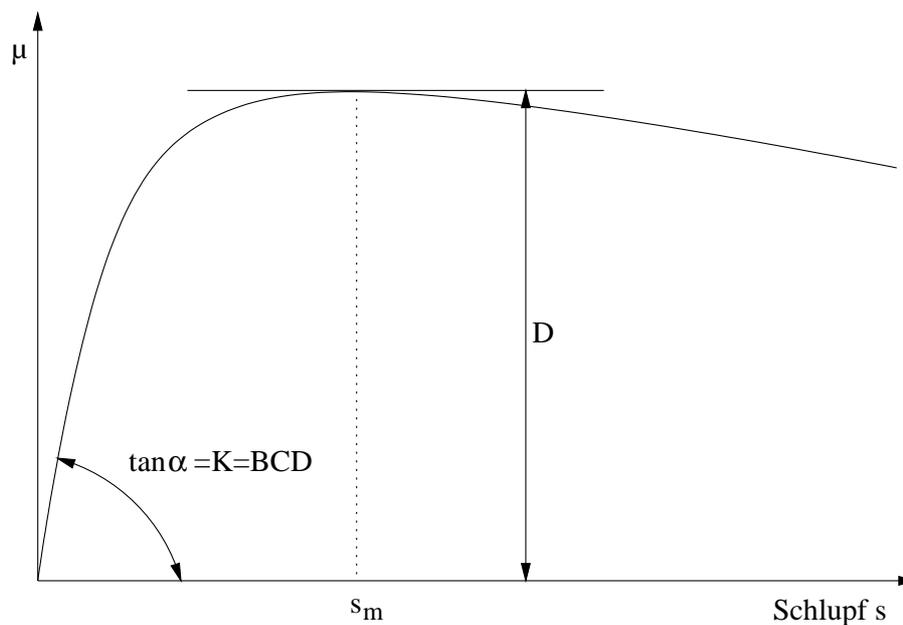
Der asymptotische Wert von  $\mu$ , gegen den die Kurve im Unendlichen (nicht für  $s=100\%$ ) strebt, ergibt sich zu:

$$\mu_s = D \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot C\right)$$

Das bei Umfangskraftkurven charakteristische Verhältnis von Gleitbeiwert (bei 100 % Schlupf) zu Maximalwert wird bei der Magic Formula demnach durch die Faktoren  $E$  und, in geringerem Maße,  $C$  festgelegt. Beeinflusst wird das Verhältnis auch durch Änderung des Wertes für die Anfangssteigung  $K$ , da sich in diesem Fall der Wert  $B$  und somit auch  $E$  ändert.

Die einzelnen Koeffizienten lassen sich zusammenfassend folgendermaßen interpretieren:

$B$  = Steifigkeitsfaktor       $C$  = Formfaktor  
 $D$  = Maximalwertfaktor       $E$  = Krümmungsfaktor



**Abbildung 24:** Bedeutung der Magic Formula Parameter

### 5.2.2 Die Formel nach Burckhardt

In [19] wird eine Näherungsgleichung vorgestellt, mit der sich gemessene Reifenkennlinien ebenfalls angenähert darstellen lassen. Die Gleichung lautet:

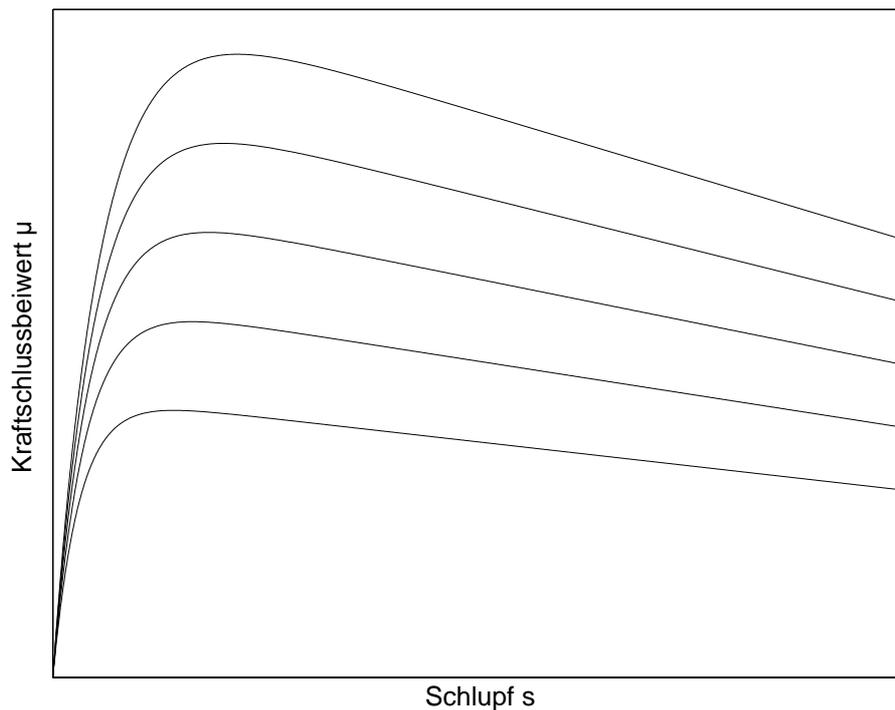
$$\mu(s) = C_1 \cdot (1 - e^{-C_2 \cdot s}) - C_3 \cdot s$$

Der Kurvencharakter der Formel nach Burckhardt basiert im Gegensatz zur Magic Formula nicht auf trigonometrischen Funktionen, sondern auf einer Exponentialfunktion. Außerdem besitzt sie nicht vier Koeffizienten, sondern nur drei. Diese drei Parameter lassen sich durch Lösen eines entsprechenden Gleichungssystems eindeutig bestimmen. Zur Aufstellung des Gleichungssystems müssen folgende Werte bekannt sein:

- der maximale Kraftschlussbeiwert  $\mu_{\max}$ ,
- der Gleitbeiwert  $\mu_{\text{gleit}}$  bei 100 % Schlupf,
- der optimale Bremsschlupf  $s_m$ , bei dem der maximale Kraftschlussbeiwert  $\mu_{\max}$  erreicht wird.

Die Bestimmung der Modellparameter ist in diesem Fall einfacher, da die Burckhardt-Formel keinen die Anfangssteigung bzw. Längskraftsteifigkeit beschreibenden Koeffizienten besitzt. Die Längskraftsteifigkeit ist durch die drei o.g. Werte eindeutig bestimmt.

Der Nachteil ist der, dass die Funktion reale Reifenkennlinien weniger genau als die Pacejka-Formel abbildet, insbesondere im instabilen Bereich der  $\mu$ -Schlupf-Kurve ( $s > s_m$ ), wo sie vom Maximalwert zum Gleitwert linear abfällt (siehe **Abbildung 25**).

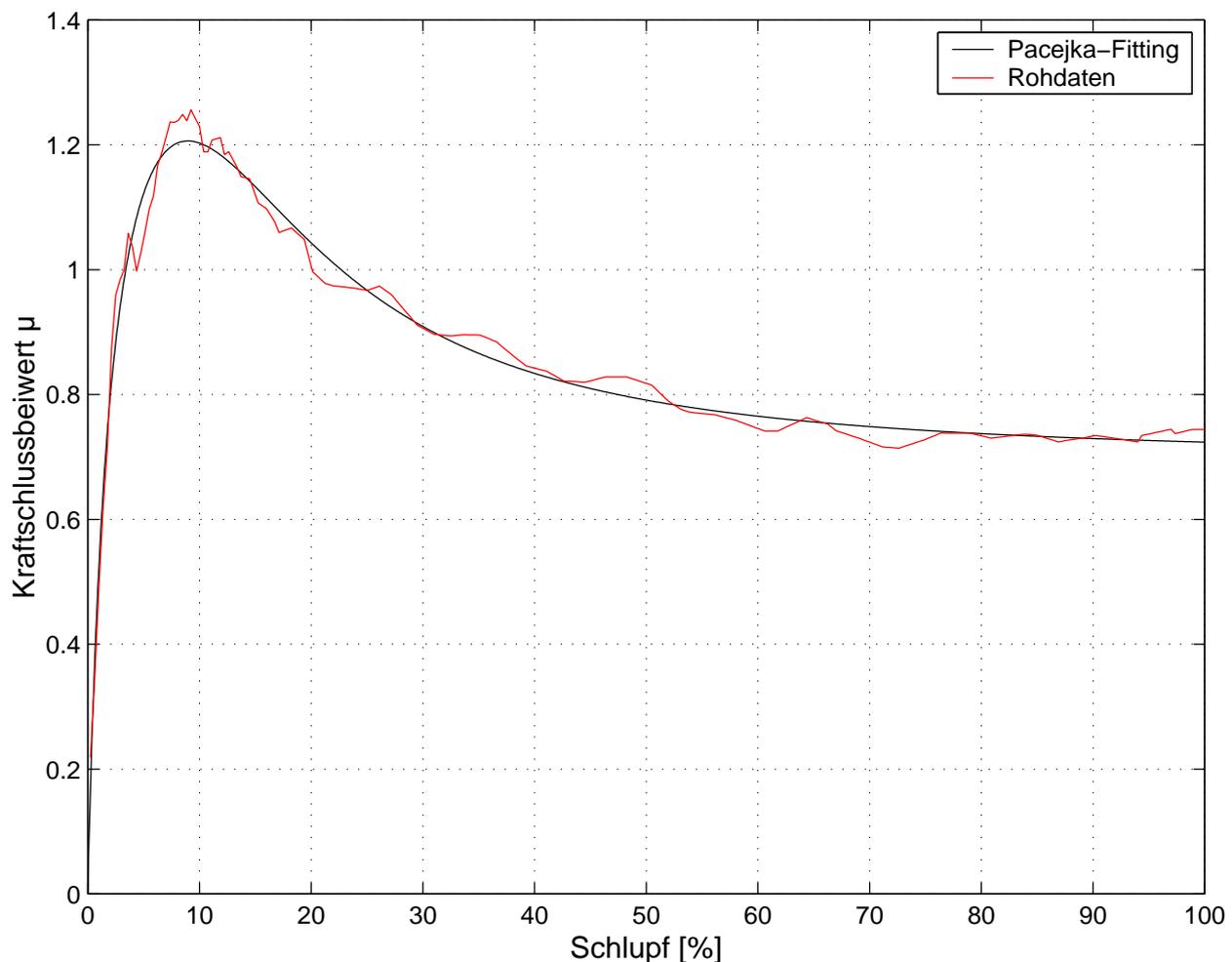


**Abbildung 25:** *Prinzipieller Funktionsverlauf der Burckhardt-Formel*

### 5.2.3 Ermittlung der Magic Formula-Parameter

Um die grundsätzliche Eignung des vorgeschlagenen Verfahrens zur Bestimmung des Kraftschlussverlaufs in dieser ersten Potenzialabschätzung zu zeigen, wurden die benötigten Magic Formula-Parameter aus realen Reifenkennfeldern extrahiert. Bei einer Nutzung des Verfahrens zur Fahrzeugzulassung stehen solche Kennfelder nicht zur Verfügung, weshalb in einem späteren Kapitel gesondert auf das Problem der Parameterbestimmung eingegangen wird.

Zur Ermittlung der hier benutzten Reifenkennfelder wurde ein Reifen des gleichen Typs wie diejenigen des Versuchsfahrzeugs mit dem institutseigenen Messfahrzeug URM II vermessen. Es wurden mehrere  $\mu$ -Schlupf-Kurven bei konstanter Radlast von 3500 N auf dem selben Straßenabschnitt aufgenommen, auf dem später die Bremsversuche durchgeführt wurden. Mit den so gewonnenen Rohdaten konnte anschließend ein Parameterfitting der Magic Formula durchgeführt werden, d.h. die Koeffizienten der Pacejka-Formel wurden mit einem entsprechenden Programm so angepasst, dass der Funktionsverlauf den Messdaten möglichst gut, im Sinne kleinster Fehlerquadrate, entspricht. Die **Abbildung 26** veranschaulicht dies beispielhaft für eine Messung.



**Abbildung 26:** *Fitting der Magic Formula mit den aus den URM II-Messungen erhaltenen Rohdaten*

Aus mehreren solchen Diagrammen ergaben sich folgende gemittelte Werte:

- Anfangssteigung  $K = BCD = 36$  [ $\mu/100$  %]
- Höchstwert  $D = \mu_{\max} = 1,2$
- Schlupf bei  $\mu_{\max}$ :  $s_m = 9$  %

Der Faktor  $C$  wurde, wie schon erwähnt, immer konstant auf dem Wert 1,65 gehalten. Damit waren die Pacejka-Koeffizienten  $B$ ,  $C$ ,  $D$  und  $E$  für diesen einen Fall ( $\mu_{\max} = 1,2$  bei 9 % Schlupf) und somit die Grundform der Kraftschluss-Schlupf-Kurve für diese Reifen-Fahrbahn-Kombination bekannt.

Die Änderung der Parameter bei sich änderndem Kraftschlussniveau erfolgte in dem noch zu erläuternden Algorithmus auf der Basis folgender Überlegungen:

Es ist bekannt, dass Kraftschluss-Schlupf-Kurven eines gegebenen Reifens bei unterschiedlichen Reibwertniveaus eine gewisse Selbstähnlichkeit besitzen, d.h. sie lassen sich durch eine entsprechende Skalierung ineinander überführen [4]. In einigen Veröf-

fentlichungen (z.B. [9], [12], [21]) wird von der Annahme ausgegangen, dass die Längskraftsteifigkeit bei gleichbleibendem Reifendruck näherungsweise als konstant, also unabhängig vom Kraftschlussmaximum angenommen werden kann. Andere Veröffentlichungen hingegen berichten von einer Abhängigkeit der Längssteife vom Kraftschlussmaximum (z.B. [4], [22]). Einigkeit herrscht nur darüber, dass  $\mu$ -Schlupf-Kurven auf Untergründen mit sehr niedrigem Griffigkeitsniveau bereits bei kleinen Schlupfwerten degressives Verhalten zeigen, was durch lokale Gleitvorgänge im Reifenlatsch bedingt wird. Der Einfachheit halber wurde für die ersten Untersuchungen eine konstante Längskraftsteifigkeit angenommen. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurde bei den hier gezeigten Messungen eine Radlastabhängigkeit der Reifenlängssteife, die aber sehr wohl gegeben ist, weil bei höherer Radlast und gleichbleibendem Kraftschluss (und damit größerer Längskraft) der Anteil des Deformationsschlupfes (Verformung der Profilblöcke) größer wird.

Eine weitere Annahme betrifft die Abhängigkeit des optimalen Bremsschlupfes  $s_m$ , bei dem das jeweilige Kraftschlussmaximum auftritt, von eben diesem Maximalwert. Durch Auswertung von veröffentlichten Reifenkennlinien konnte ein linearer bis quadratischer, tendenziell eher quadratischer Zusammenhang festgestellt werden. Für die ersten Berechnungen wurde deshalb ein parabelförmiger Verlauf der Lage der Kraftschlussmaxima angenommen, siehe **Abbildung 27**.

Der Parabelparameter  $a$  ergibt sich bei Kenntnis eines  $\mu_{\max}$ - bzw.  $D$ -Wertes und des dazugehörigen Schlupfwertes nach folgender Gleichung:

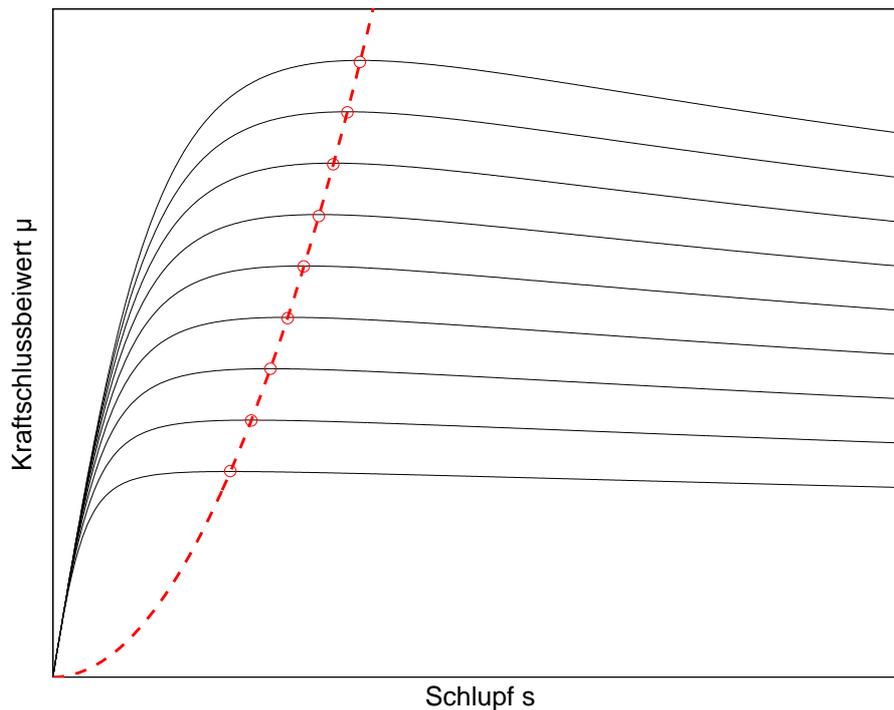
$$a \cdot s_m^2 = D \Rightarrow a = \frac{D}{s_m^2}$$

Damit erhält man die Abhängigkeit des optimalen Schlupfwertes vom Kraftschlussmaximum zu:

$$s_m(D) = \sqrt{\frac{D}{a}}$$

Die Bestimmung der Pacejka-Parameter in Abhängigkeit vom Kraftschlussmaximum  $D$  stellt sich somit wie folgt dar:

- Anfangssteigung  $K$  und Parabelparameter  $a$  sind bekannt
- $C = 1,65 = \text{konst.}$
- $B = \frac{K}{CD}$
- $s_m = \sqrt{\frac{D}{a}}$
- $E = \frac{B \cdot s_m - \tan\left(\frac{\pi}{2C}\right)}{B \cdot s_m - \arctan(B \cdot s_m)}$



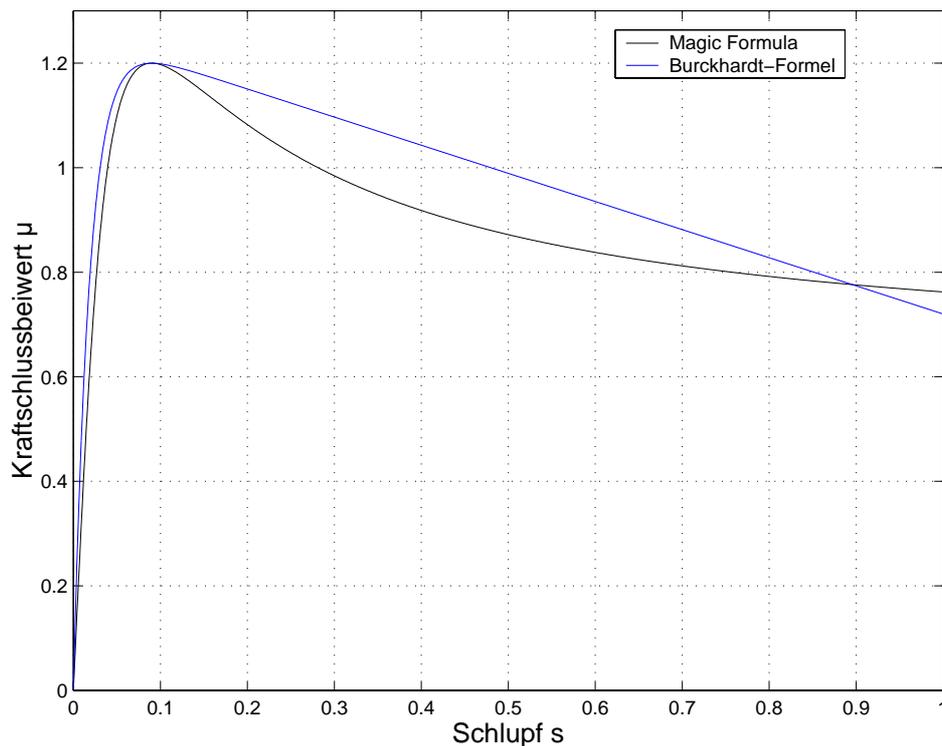
**Abbildung 27:** Parabelförmige Abhängigkeit der Kraftschlussmaxima vom optimalen Schlupf

#### 5.2.4 Ermittlung der Parameter für die Burckhardt-Formel

Die Ermittlung der Burckhardt-Parameter erfolgte im Prinzip auf gleiche Art und Weise, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben. Aus den Reifenkennfeldern waren  $\mu_{\max}$  und der dazugehörige Schlupfwert bekannt, zusätzlich wurde das Verhältnis von Gleitbeiwert zu Maximalwert mit 0,6 festgelegt. Für die Abhängigkeit des optimalen Schlupfes vom Kraftschlussmaximum wurde ebenfalls der quadratische Zusammenhang, der schon bei der Magic Formula zum Einsatz kam, verwendet.

Da bei der Formel nach Burckhardt, wie bereits erwähnt, keine explizite Bestimmung der Anfangssteigung erforderlich ist, genügen diese Angaben zur Aufstellung eines entsprechenden nichtlinearen Gleichungssystems, durch dessen Lösung sich die Burckhardt-Parameter eindeutig bestimmen lassen.

In **Abbildung 28** ist der Funktionsverlauf der parametrisierten Burckhardt-Formel im Vergleich zur Magic Formula dargestellt. Es zeigt sich, dass nicht nur im instabilen Bereich, sondern auch links vom Maximalwert z.T. deutliche Unterschiede auftreten, da die Burckhardt-Formel einen steileren Anstieg aus dem Ursprung aufweist.



**Abbildung 28:** Vergleich der Funktionsverläufe von Magic Formula und Burckhardt-Formel

### 5.3 Erläuterungen zum verwendeten Algorithmus

Zur Berechnung des maximalen Kraftschlusses bzw. des Kraftschlussverlaufs müssen folgende Fahrzeugdaten bekannt sein:

- Fahrzeugmasse;
- statische Vorder- und Hinterachslast;
- Verhältnis Schwerpunktshöhe zu Radstand;
- dynamischer Reifenhalbmesser.

Für eine möglichst genaue Schlupfmessung sollte berücksichtigt werden, dass der dynamische Reifenhalbmesser auf Grund der beim Bremsen auftretenden Achslastverlagerung an Vorder- und Hinterachse unterschiedlich groß ist. Bei den hier vorgestellten Messungen wurden deshalb mit dem Universellen Reibungsmesser zwei Werte für den dynamischen Reifenhalbmesser ermittelt, und zwar bei solchen Radlasten, wie sie auch bei einer Vollbremsung mit dem Versuchsfahrzeug zu erwarten sind.

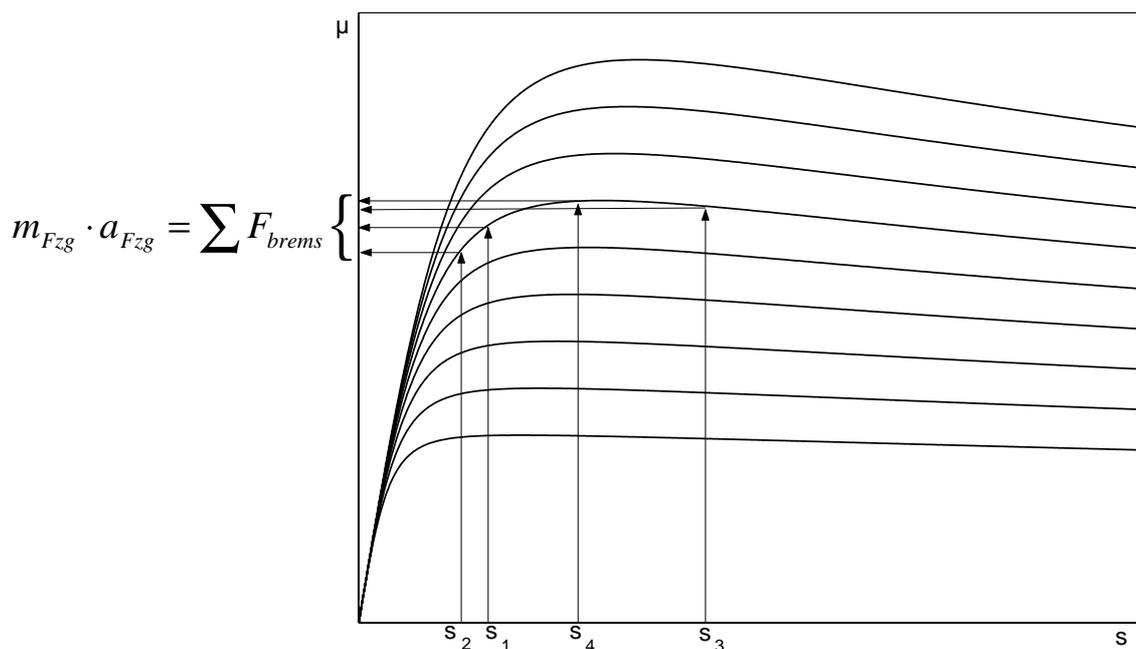
Die während einer ABS-geregelten Bremsung gemessenen Größen sind

- die Fahrzeuglängsverzögerung,
- die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit
- und die Radwinkelgeschwindigkeiten.

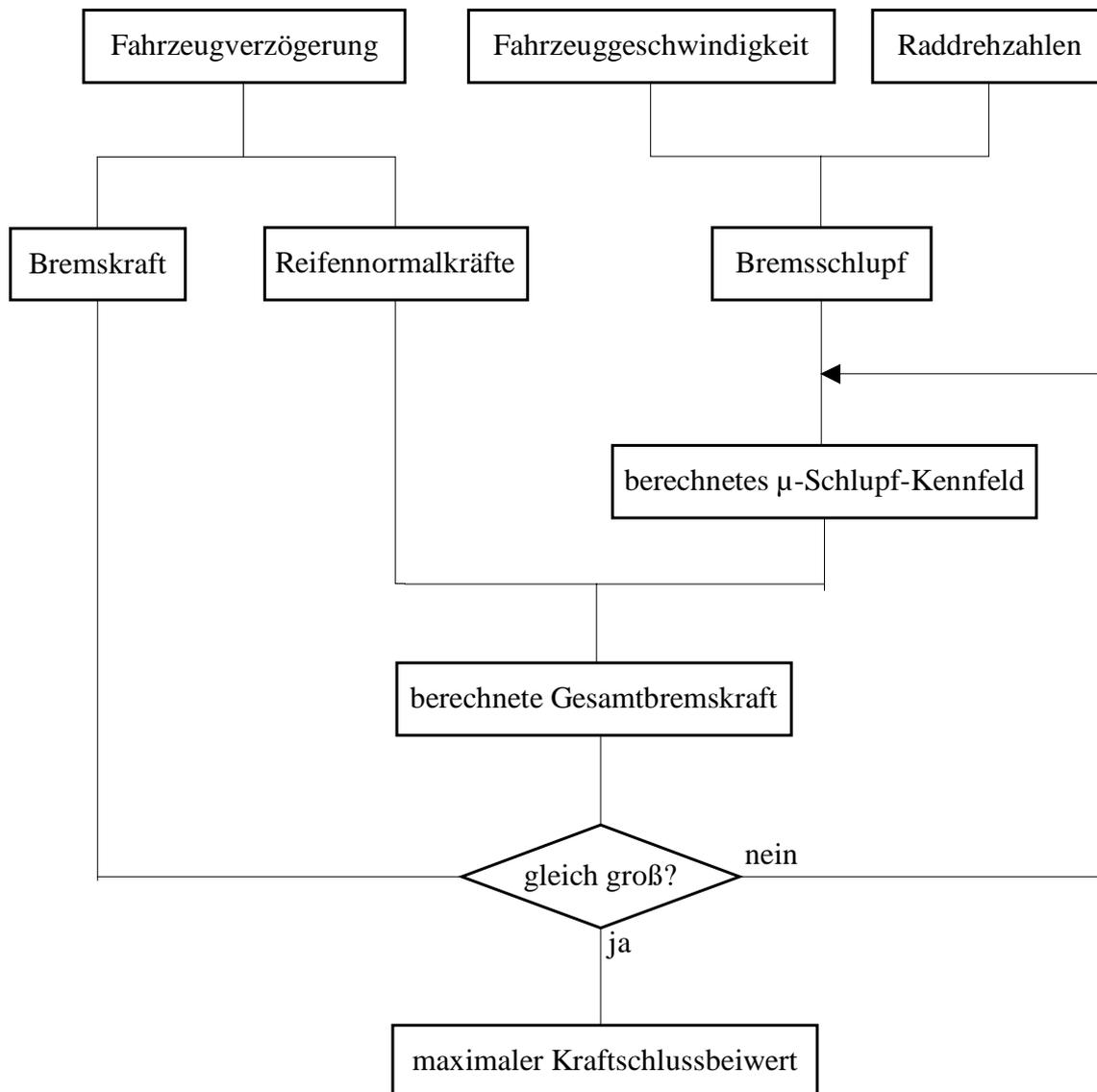
Aus der Fahrzeugverzögerung werden die Gesamtbremskraft und die Reifennormalkräfte berechnet, wobei angenommen wird, dass sich die Achslasten zu jeweils gleichen Teilen auf die linken und rechten Fahrzeugräder verteilen. Die einzelnen Radwinkelgeschwindigkeiten in Verbindung mit der Fahrzeuggeschwindigkeit ergeben die Bremschlupfwerte an allen Rädern. Die ermittelten Schlupfwerte werden in eine  $\mu$ -Schlupf-Kurve, deren Maximum sich aus der Fahrzeugverzögerung ableitet, eingesetzt und unter Verwendung der Radlasten in Bremskräfte umgerechnet.

Anschließend wird die Summe der berechneten Bremskräfte mit der Gesamtbremskraft, die sich aus der gemessenen momentanen Fahrzeugverzögerung ergibt, verglichen. Wenn die beiden Kräfte nicht übereinstimmen, wird durch lineare Interpolation ein neuer  $\mu_{\max}$ -Wert samt dazugehöriger  $\mu$ -Schlupf-Kurve errechnet und die Iterationsschleife solange durchlaufen, bis das Abbruchkriterium „Gleichheit von berechneter und gemessener Gesamtbremskraft“ erfüllt ist, siehe **Abbildung 29**.

Diese Prozedur wird für alle während der Bremsung digital erfassten Messwerte durchgeführt, so dass man schließlich den Verlauf des maximalen Kraftschlussbeiwertes über der Bremsstrecke erhält. In **Abbildung 30** ist der beschriebene Algorithmus als Flussdiagramm dargestellt.



**Abbildung 29:** Grundidee des Algorithmus zur Kraftschlussbestimmung



**Abbildung 30:** Flussdiagramm zur Veranschaulichung des Algorithmus zur Kraftschlussbestimmung

## 5.4 Berechnete Kraftschlussverläufe

Um eine erste Potenzialabschätzung des Verfahrens durchführen zu können, wurden mit dem Versuchsfahrzeug einige ABS-geregelte Bremsungen durchgeführt und ausgewertet.

Zunächst wurde mit dem institutseigenen Messfahrzeug URM II der Griffigkeitsverlauf des Fahrbahnstücks aufgenommen, um Vergleichswerte für die berechneten Verläufe zu haben. Der URM II bietet dazu die Möglichkeit, das Messrad mit einem im Durchmesser größeren Verspannrad zu koppeln und ihm so einen konstanten Bremsschlupf aufzuzwingen. Der Schlupf betrug in diesem Fall ca. 9-10 %, was in etwa dem Wert ent-

spricht, bei dem der verwendete Reifen sein Kraftschlussmaximum erreicht (siehe Abschnitt 5.2.3).

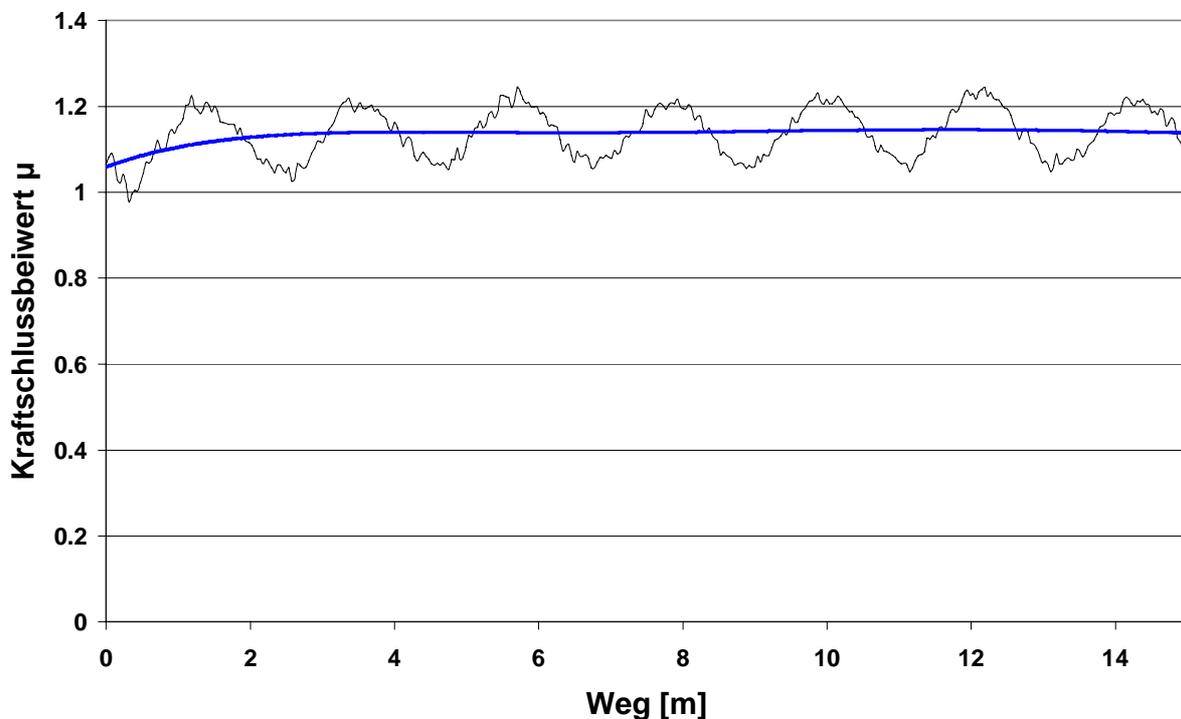
Das Ergebnis der Griffigkeitsmessung für einen Streckenabschnitt von 15 m ist in **Abbildung 31** dargestellt. Man erkennt, dass die Fahrbahn bezüglich des Kraftschlussniveaus mit einem durchschnittlichen  $\mu$ -Wert von über 1,1 relativ hoch liegt.

Die **Abbildungen 32 bis 35** zeigen im Vergleich dazu Kraftschlussverläufe, die aus Messdaten berechnet wurden, wobei erwähnt sei, dass die Synchronisation von URM- und Pkw-Messungen durch eine fahrzeugseitig angebrachte Reflexionslichtschranke und einen an der Strecke stehenden Reflektor erfolgte. Dargestellt sind in den Diagrammen die Ergebnisse bei Verwendung der beiden beschriebenen mathematischen Ansätze für jeweils zwei Bremsungen, um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen. Auffällig ist, dass die mit den Reifenmodellen berechneten  $\mu$ -Werte zu Beginn des ausgewerteten Bereichs großen Schwankungen unterliegen, die jedoch im mittleren Bereich stark zurückgehen. Man erkennt auch, dass die Burckhardt-Formel zu etwas glatteren Verläufen führt, die aber vom absoluten Niveau her geringfügig niedriger liegen als die mit der Pacejka-Formel ermittelten. Die **Abbildung 36** zeigt deutlich, dass der entwickelte Algorithmus die einzelnen  $\mu$ -Schlupf-Kurven so bestimmt, dass die aus den gemessenen Schlupfwerten berechnete Bremskraft mit der aus der Fahrzeugverzögerung ermittelten Gesamtbremskraft übereinstimmt.

Die Gründe für die starken Schwankungen der Kraftschlussverläufe sind folgende:

- Dadurch dass die Vorderraddrehzahlen mittels der serienmäßigen ABS-Sensoren erfasst wurden, ergibt sich ein systematischer Fehler in der Schlupfmessung. Die Sensoren sind am Radträger befestigt, welcher wiederum über diverse Fahrwerkslenker mit der Karosserie verbunden ist. Durch eine konstruktionsbedingte Drehelastizität der gesamten Radaufhängung messen die Drehzahlsensoren bei ansteigendem Bremsmoment eine scheinbare Verringerung der Raddrehgeschwindigkeit, wodurch im Endeffekt ein zu hoher Schlupfwert berechnet wird. Umgekehrt wird bei sich lösender Bremse durch das Entspannen der Radaufhängung ein zu kleiner Schlupfwert ermittelt. Ein gemessener Schlupf, der deutlich größer als der wahre Wert ist, wird auf Grund der Regelphilosophie eines ABS-Systems mit hoher Wahrscheinlichkeit rechts vom Maximum in der  $\mu$ -Schlupf-Kurve liegen, also dort, wo der Gradient der Kurve nicht sehr groß ist, was nur geringe Auswirkungen auf die algorithmisch bestimmte Kurve hat. Ist der angenommene Wert jedoch kleiner als der reale Wert, befindet man sich meist links vom Maximum im Bereich großer Gradienten. In diesem Bereich hat ein kleiner Fehler große Änderungen des zugehörigen Kraftschlussbeiwertes zur Folge. Der Algorithmus ermittelt in einem solchen Fall eine  $\mu$ -Schlupf-Kurve mit unrealistisch hohem Maximalwert (siehe **Abbildung 37**).
- Die karosserie seitige Befestigung der Fahrwerkslenker mit Gummilagern führt nicht nur zu einer Drehelastizität, sondern auch zu einer Längselastizität der Radaufhängungen. In Verbindung mit der Drehelastizität der Reifen, bedingt durch die begrenzte Steifigkeit der Reifenseitenwände, resultiert dies in einem verzögerten Aufbau der Beschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt bei stark schwellenden Längskräften. Es besteht also eine zeitliche Phasenverschiebung zwischen der im Schwerpunkt gemessenen Verzögerung und den an den Reifen angreifenden Bremskräften.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die Kraftschlussverläufe geglättet, indem ein Fitting eines Polynoms höheren Grades im Sinne kleinster Fehlerquadrate mit den Daten durchgeführt wurde. **Abbildung 38** zeigt die geglätteten Verläufe zusammen mit der URM-Messung. Auf Grund der Schwankungen der berechneten Griffigkeitsverläufe weichen die gefitteten Kurven zunächst relativ stark vom Referenzverlauf ab, nähern sich diesem gegen Ende jedoch wieder an. In diesem Bereich betragen die größten Abweichungen ca. 10 %. Auffällig ist, dass alle berechneten Verläufe im Bereich von zwei bis acht Meter deutlich zu tief liegen. Erklären lässt sich dies mit der Tatsache, dass die Reifenkennfelder mit dem URM II nur für eine mittlere Radlast ermittelt wurden. Bei einer Vollbremsung auf einer Fahrbahn mit hohem Kraftschluss treten an der Vorderachse jedoch viel höhere Radlasten auf, so dass die angenommenen Werte für Längssteifigkeit etc. nicht mehr gelten.



**Abbildung 31:** Kraftschlussverlauf der Versuchsfahrbahn (URM II-Messung)

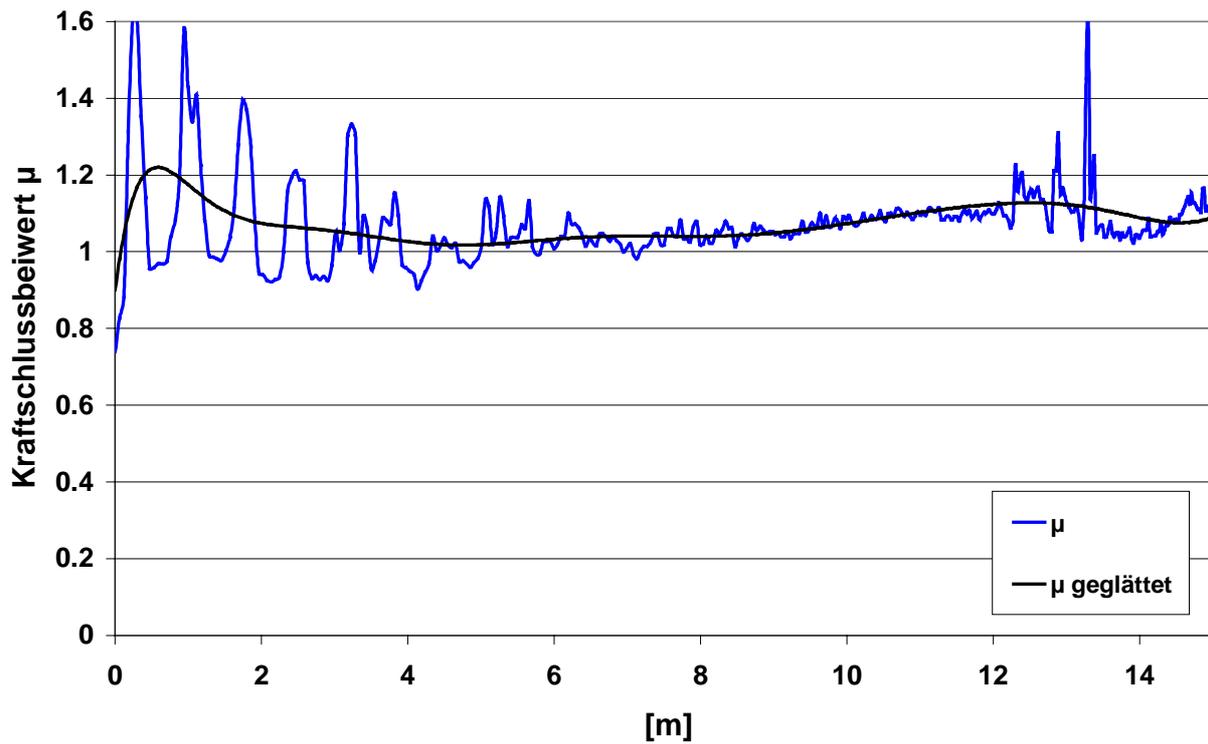


Abbildung 32: Mit der Magic Formula berechneter Kraftschlussverlauf (Bremsung 1)

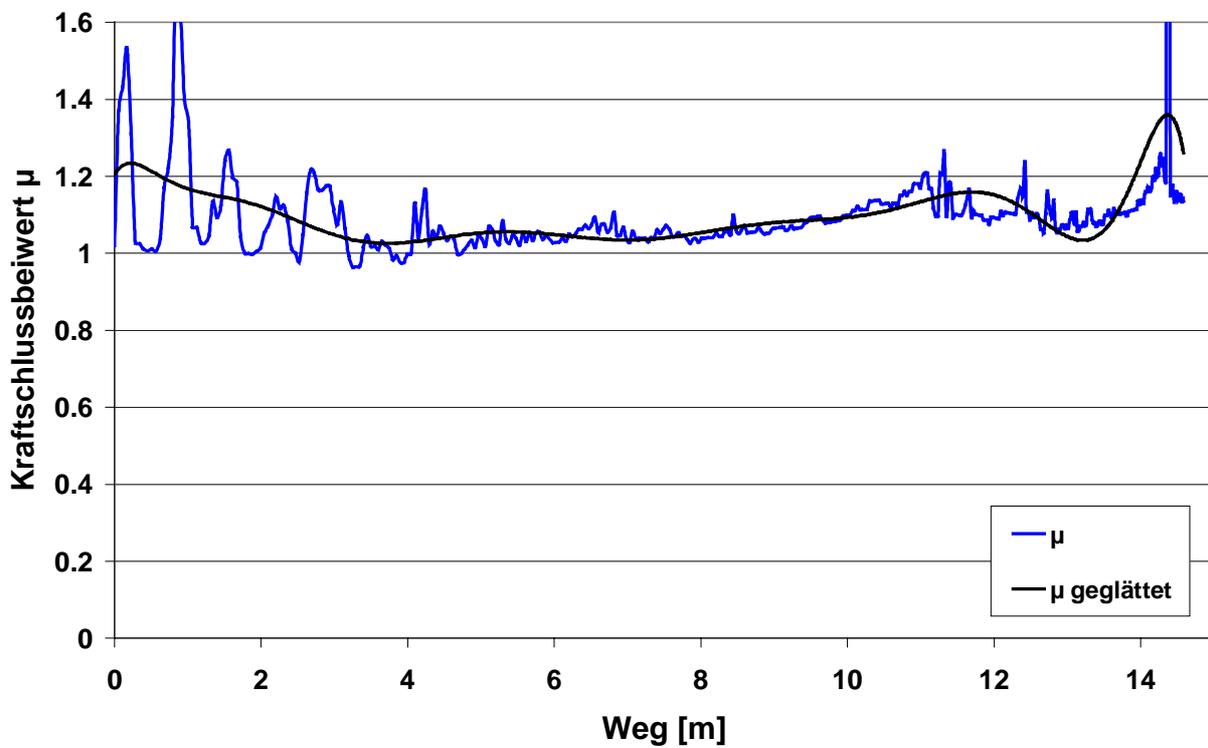


Abbildung 33: Mit der Magic Formula berechneter Kraftschlussverlauf (Bremsung 2)

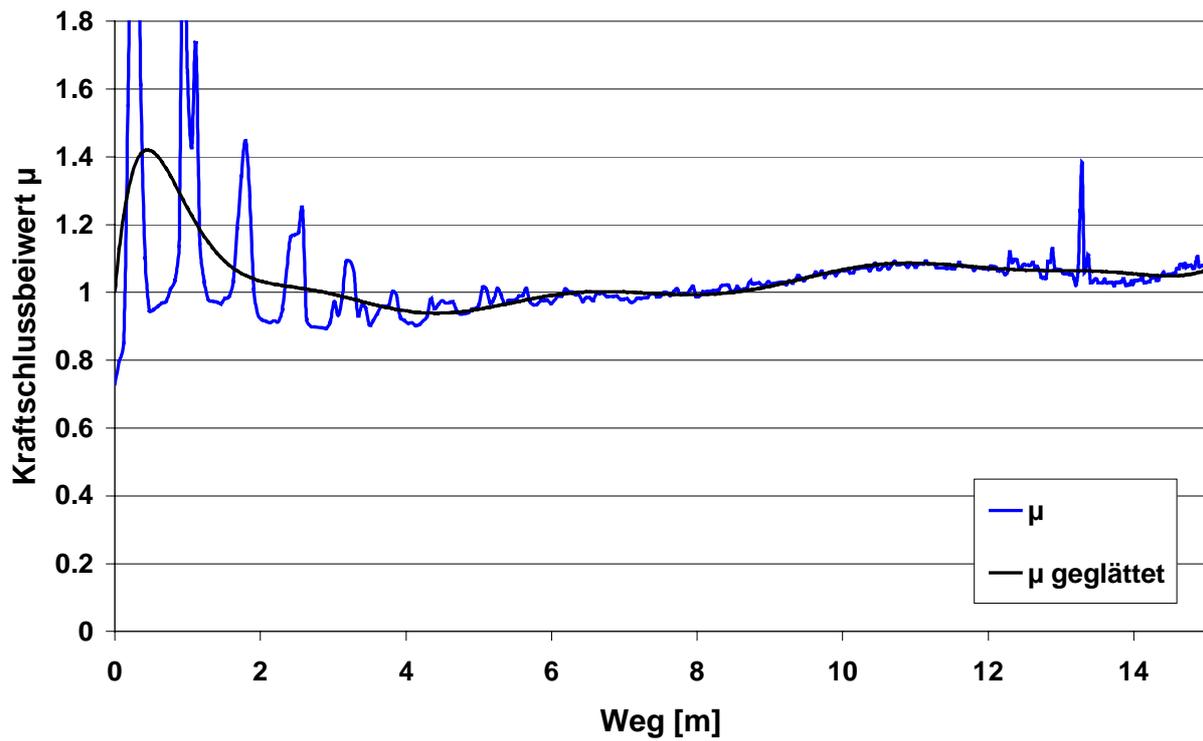


Abbildung 34: Mit der Burckhardt-Formel berechneter Kraftschlussverlauf (Brems. 1)

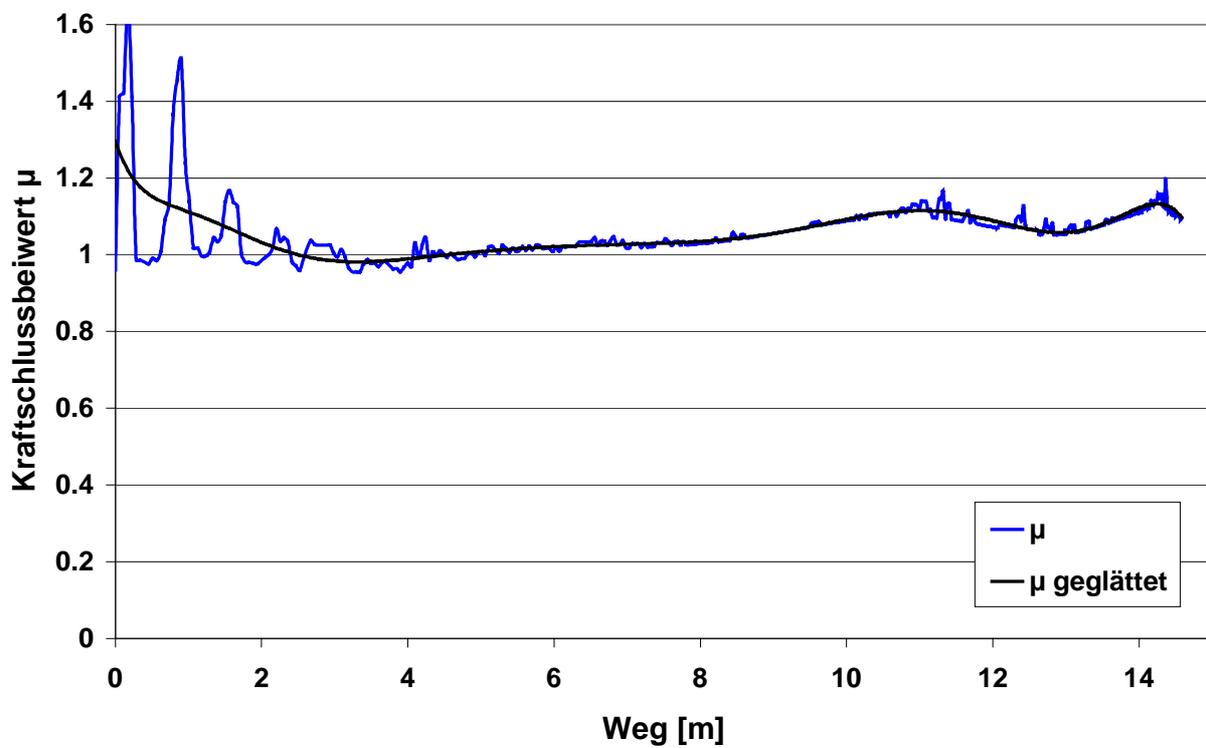
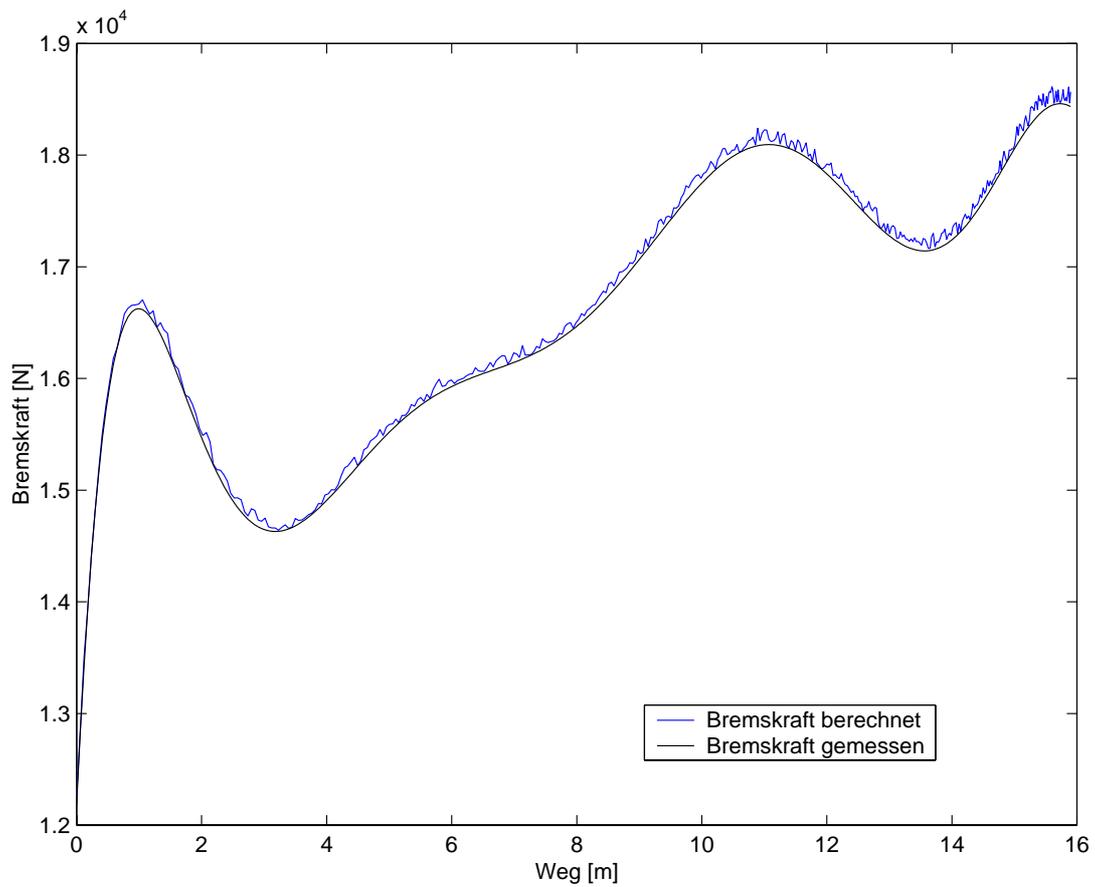
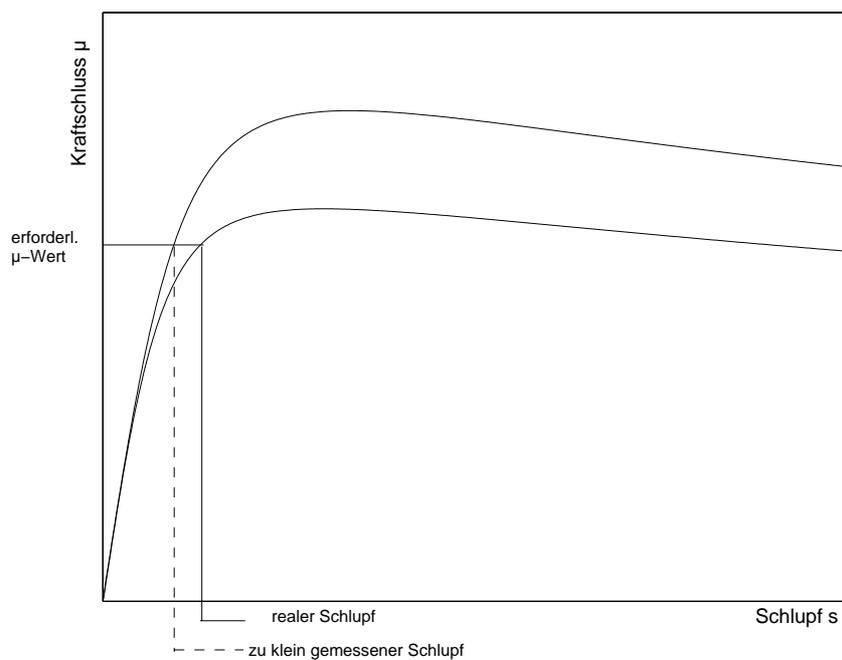


Abbildung 35: Mit der Burckhardt-Formel berechneter Kraftschlussverlauf (Brems. 2)



**Abbildung 36:** Vergleich von gemessener und berechneter Bremskraft



**Abbildung 37:** Einfluss eines zu niedrig gemessenen Schlupfwertes auf die vom Algorithmus ermittelte  $\mu$ -Schlupf-Kurve

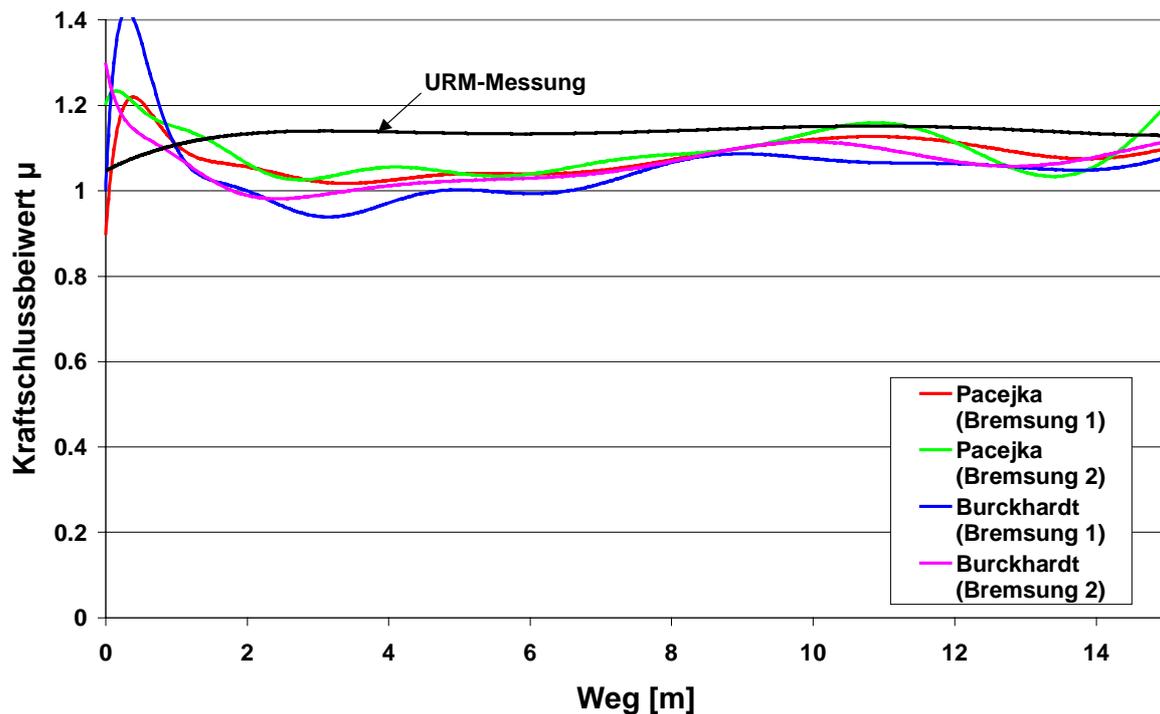


Abbildung 38: Vergleich der berechneten Kraftschlussverläufe mit dem Referenzverlauf

## 5.5 Einflüsse von Parametervariationen auf die berechneten Kraftschlussverläufe

Die berechneten Kraftschlussverläufe zeigen, dass die aus den gemessenen Reifenkennfeldern gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Kraftschlusscharakteristik der verwendeten Reifen grundsätzlich richtig sind. Die Reifenparameter sind mit einem speziell dafür konzipierten Messfahrzeug ermittelt worden (siehe Abschnitt 5.2.3). Auf Grund des komplexen Reifenaufbaus, der Abhängigkeit von äußeren Einflüssen und Messunsicherheiten sind auch derart aufwändige Messungen mit gewissen Restfehlern behaftet. Die Praxistauglichkeit erfordert ein einfaches Verfahren zur Abschätzung der Reifenparameter allein mit dem Versuchsfahrzeug. Dabei sind gewisse Unsicherheiten bezüglich der Parameter zu erwarten. Aus diesen Gründen wurden die für eine  $\mu$ -Schlupf-Kurve maßgebenden Parameter in gewissen Grenzen variiert, um die Einflüsse auf die berechneten Kraftschlussverläufe zu untersuchen.

Für die Berechnungen mit der Magic Formula wurden folgende Standardparameter verwendet (siehe Abschnitt 5.2.3):

- Anfangssteigung  $K = 36$  [ $\mu/100$  %]
- optimaler Schlupf  $s_m = 9$  %
- parabelförmige Abhängigkeit der Kraftschlussmaxima vom optimalen Schlupf

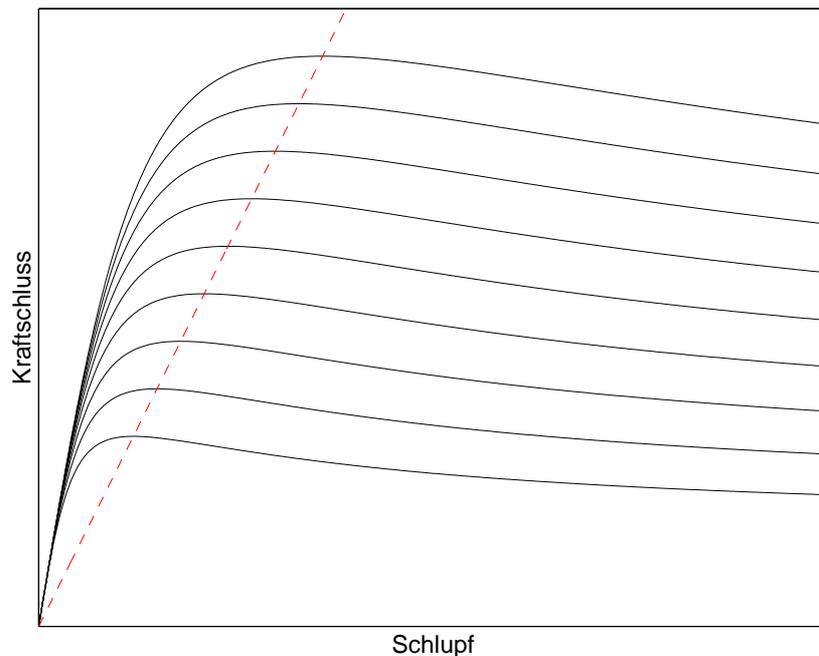
Folgende Variationen wurden durchgeführt:

- Anfangssteigung  $K = 42$   
 $K = 30$

- optimaler Schlupf  $s_m = 12\%$   
 $s_m = 15\%$

(Durch Variation des Wertes für den optimalen Schlupf ändert sich der Parabelparameter  $a$ )

- lineare Abhängigkeit der Kraftschlussmaxima vom optimalen Schlupf (siehe **Abbildung 39**)



**Abbildung 39:** Lineare Abhängigkeit der Kraftschlussmaxima vom optimalen Schlupf

Die Standardparameter für die mit der Burckhardt-Formel durchgeführten Berechnungen waren:

- optimaler Schlupf  $s_m = 9\%$
- parabelförmige Abhängigkeit der Kraftschlussmaxima vom optimalen Schlupf
- Verhältnis Gleitbeiwert zu Maximalwert  $\mu_{\text{gleit}}/\mu_{\text{max}} = 0,6$

Durchgeführte Variationen:

- optimaler Schlupf  $s_m = 12\%$
- lineare Abhängigkeit der Kraftschlussmaxima vom optimalen Schlupf
- Verhältnis Gleitbeiwert zu Maximalwert  $\mu_{\text{gleit}}/\mu_{\text{max}} = 0,7$

Erwähnt sei, dass eine Berechnung mit dem optimalen Schlupfwert  $s_m = 15\%$  hier nicht möglich war, da der Algorithmus in diesem Fall nicht konvergierte.

Die Ergebnisse sind in den **Abbildungen 40 bis 45** dargestellt. Der Einfluss der Parametervariationen auf den Verlauf der  $\mu$ -Schlupf-Kurven ist im Anhang dargestellt.

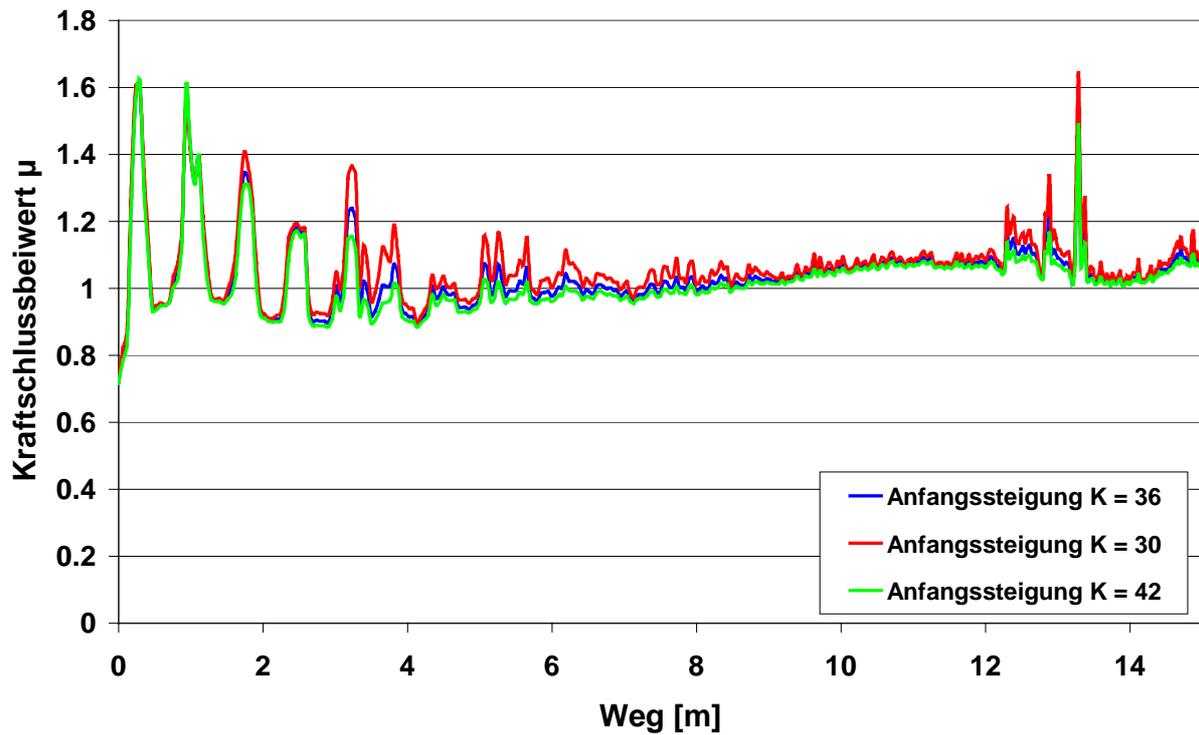


Abbildung 40: Mit der Magic Formula berechnete Kraftschlussverläufe bei Variation der Anfangssteigung

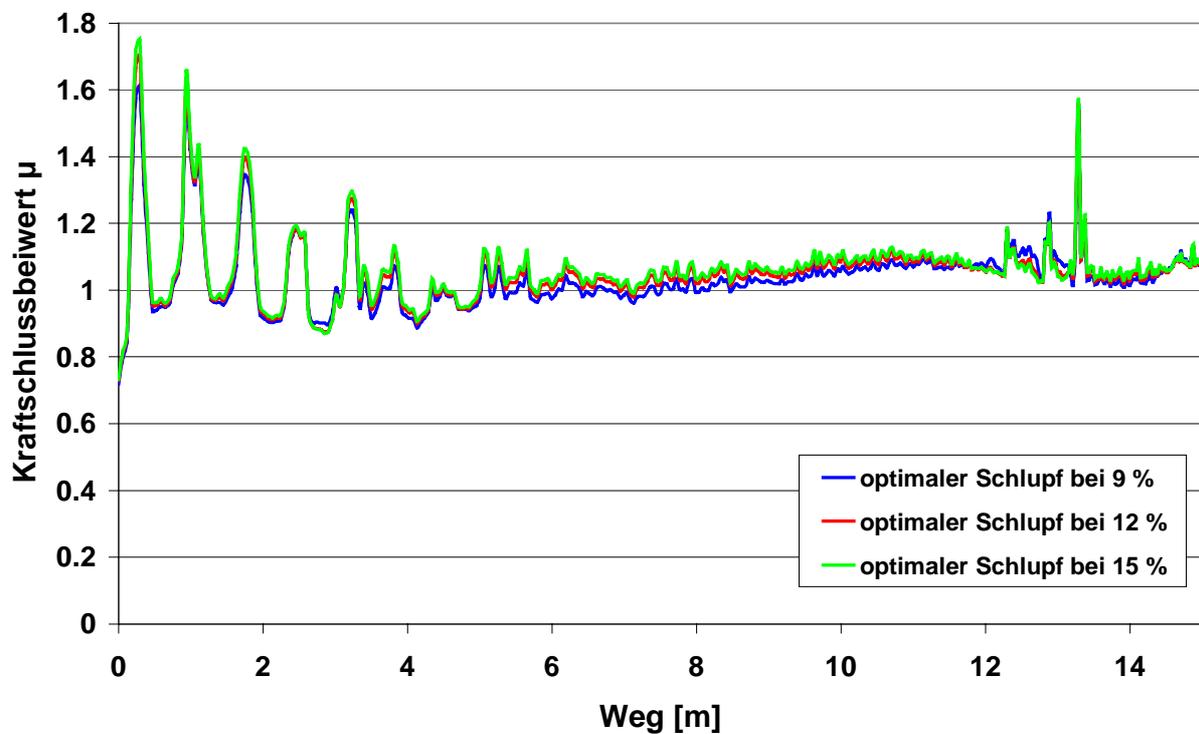


Abbildung 41: Mit der Magic Formula berechnete Kraftschlussverläufe bei Variation des Wertes für den optimalen Schlupf

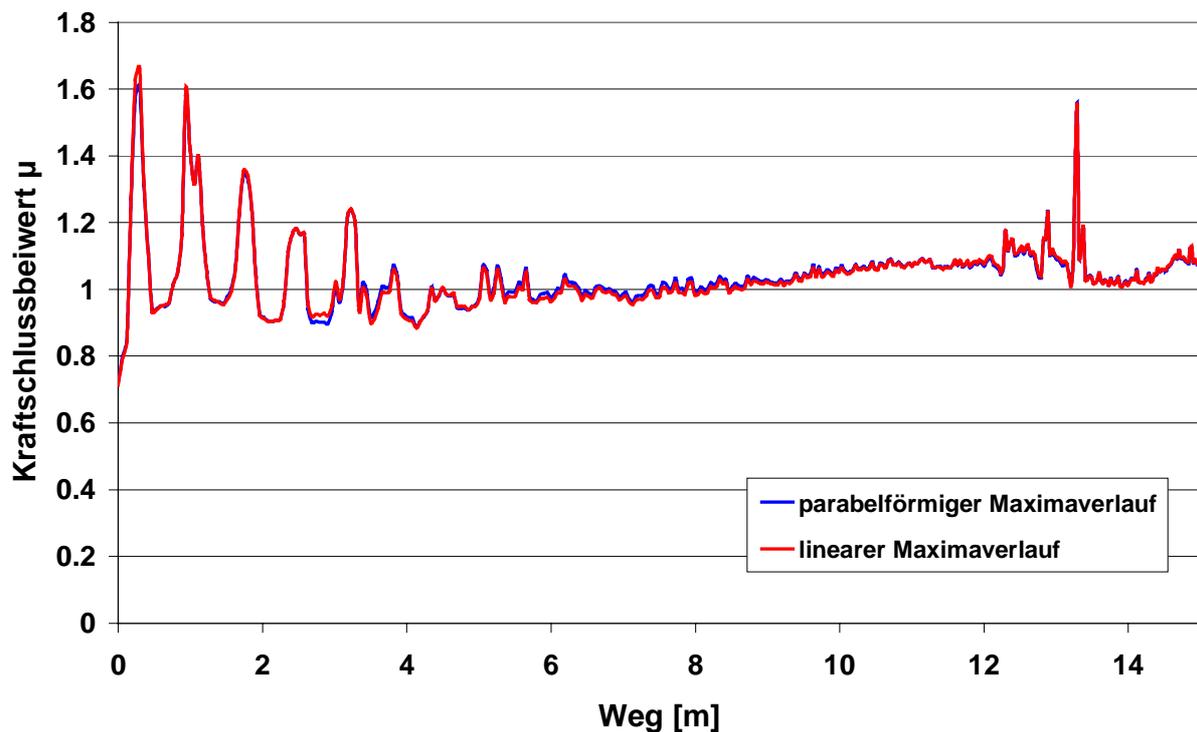


Abbildung 42: Mit der Magic Formula berechnete Kraftschlussverläufe bei parabelförmiger und linearer Abhängigkeit der Kraftschlussmaxima vom optimalen Schlupf

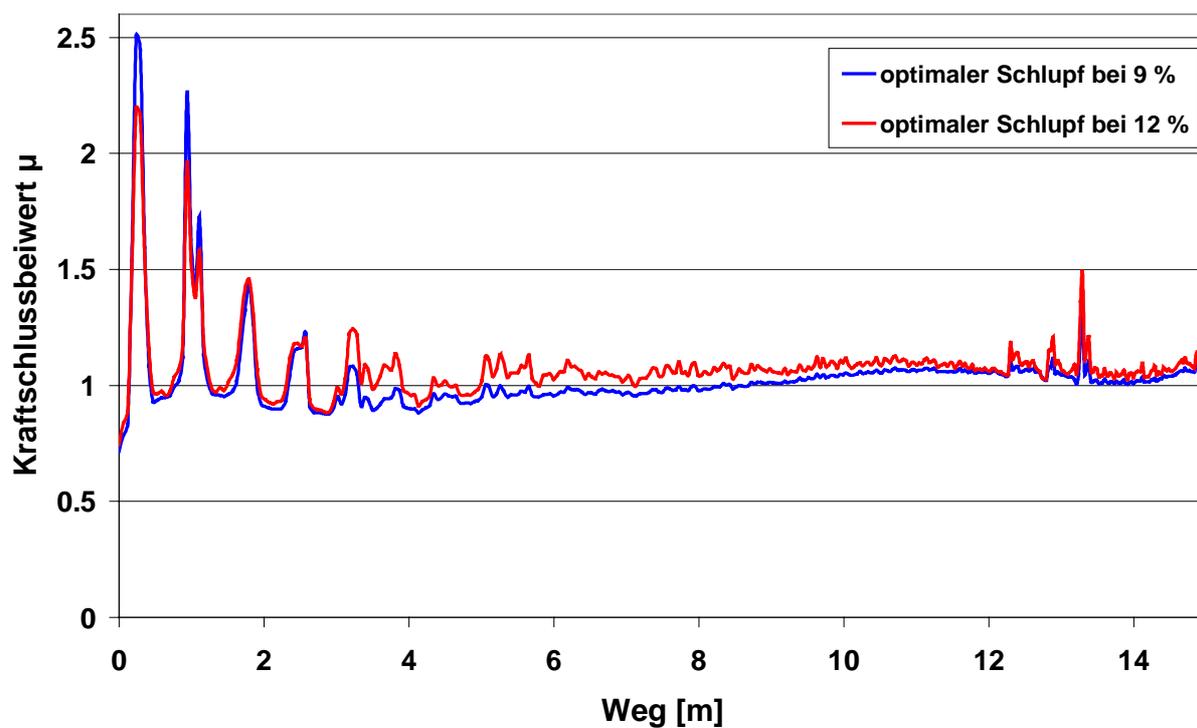


Abbildung 43: Mit der Burckhardt-Formel berechnete Kraftschlussverläufe bei Variation des Wertes für den optimalen Schlupf

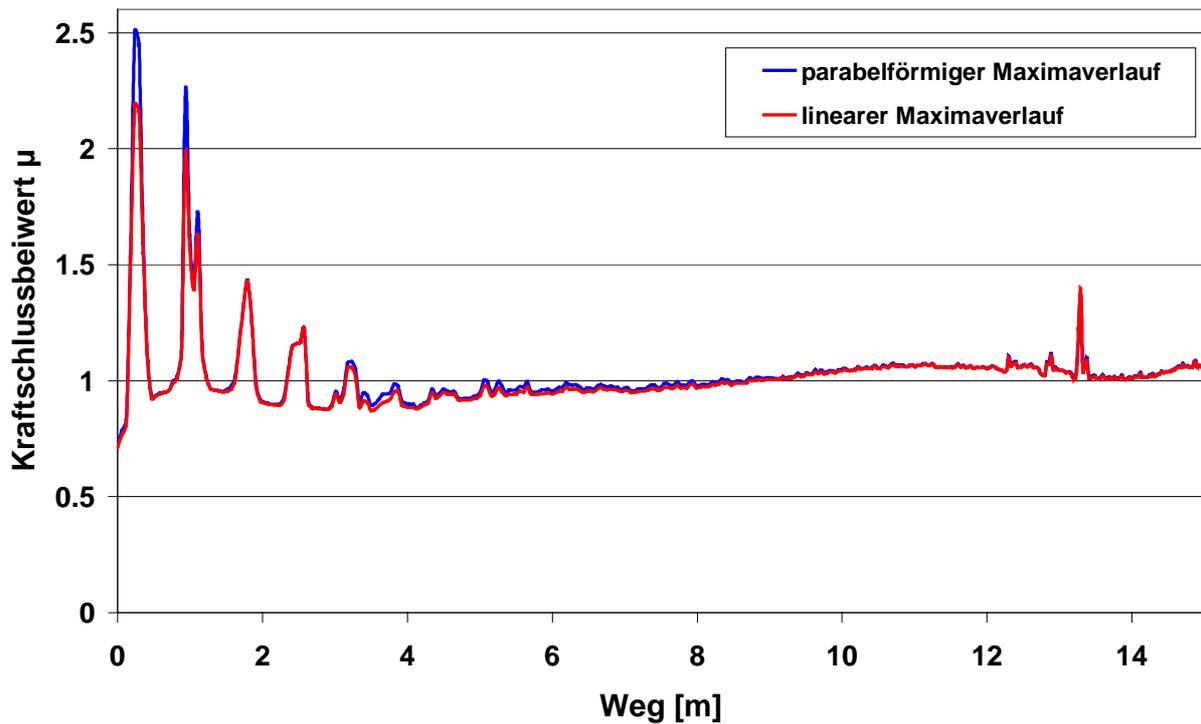


Abbildung 44: Mit der Burckhardt-Formel berechnete Kraftschlussverläufe bei parabel-förmiger und linearer Abhängigkeit der Kraftschlussmaxima vom opti-malen Schlupf

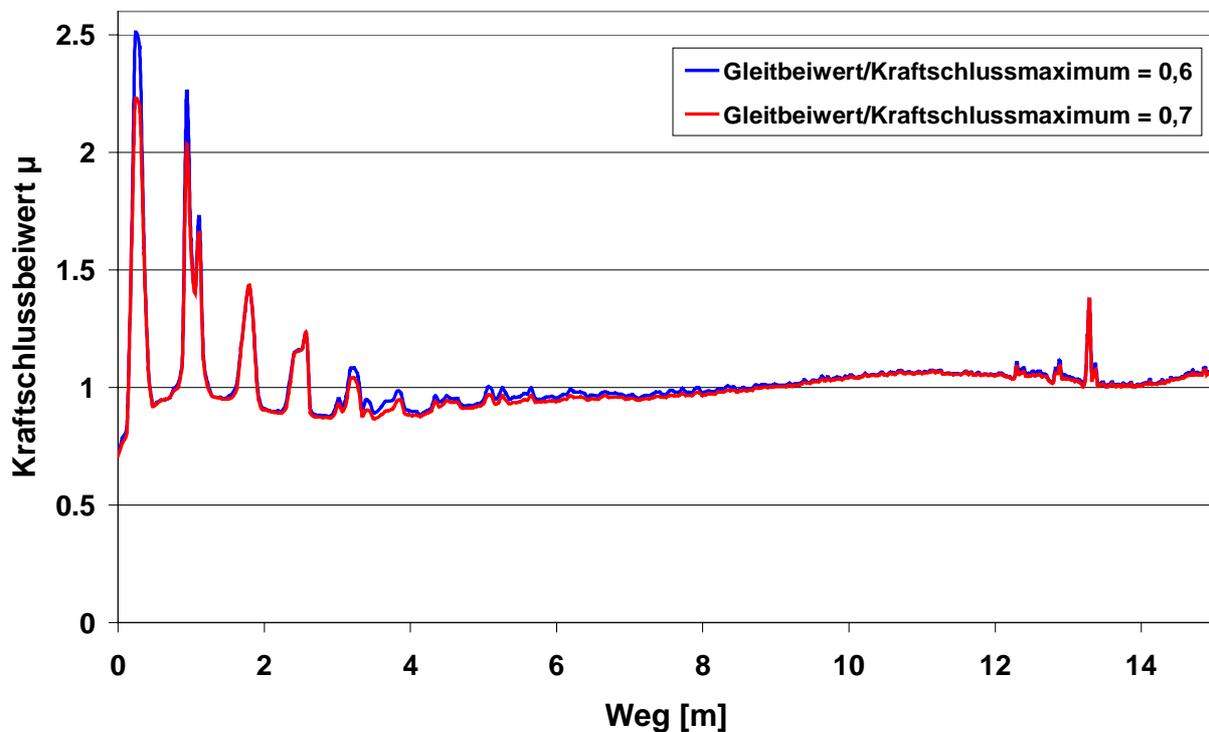


Abbildung 45: Mit der Burckhardt-Formel berechnete Kraftschlussverläufe bei Variation des Verhältnisses von Gleitbeiwert zu Maximalwert

Auffallend ist, dass die meisten Parametervariationen einen recht geringen Einfluss auf das absolute Niveau der berechneten Kraftschlussverläufe haben. Nur für die Variation des optimalen Schlupfes bei der Burckhardt-Formel ergibt sich im mittleren Bereich eine relevante Anhebung des Niveaus. Die beiden anderen Variationen haben bei diesem Reifenmodell lediglich Auswirkungen auf die Höhe der Spitzen im Anfangsbereich.

Die Magic Formula liefert für linearen und parabelförmigen Maximaverlauf nahezu identische Ergebnisse. Die Variation des Wertes für den optimalen Schlupf ergibt bei einer Erhöhung des Wertes, wie bei der Burckhardt-Formel, im mittleren Bereich eine Niveauanhebung, wobei hier auch die Spitzen im Anfangsbereich größer werden. Den größten Einfluss auf das Ergebnis hat bei der Magic Formula erwartungsgemäß der Wert für die Anfangssteigung.

## 5.6 Einfluss einer fehlerbehafteten Schlupfmessung auf die Berechnung des maximalen Kraftschlusses

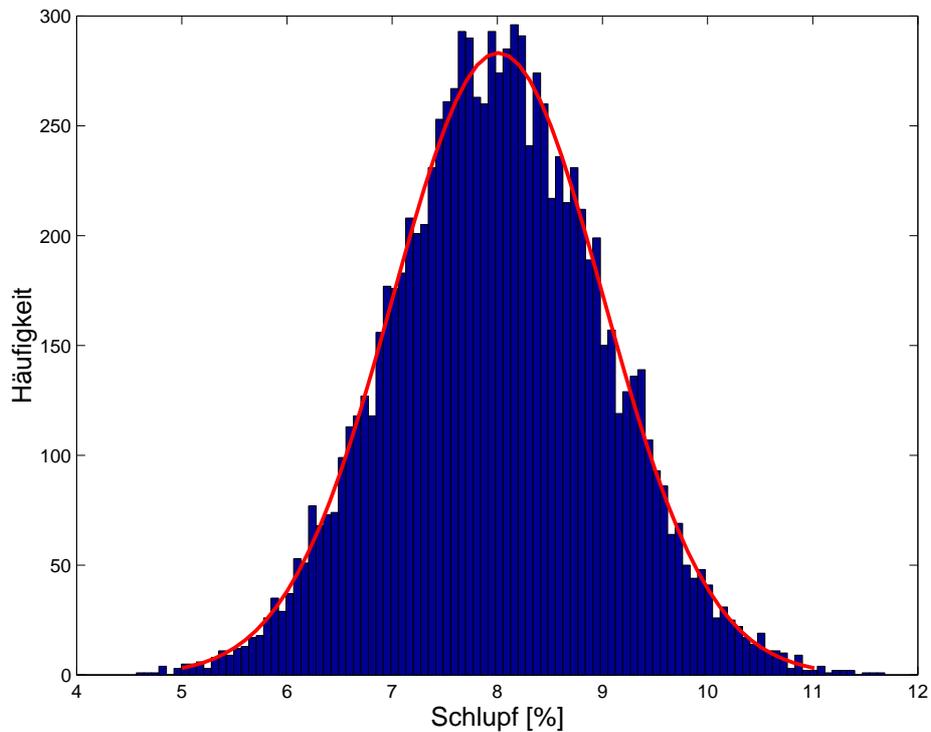
Die Bestimmung des maximalen Kraftschlusses durch ein mathematisches Modell wirft die Frage auf, wie stark sich Messfehler der Eingangsgrößen auf das Identifikationsergebnis  $\mu_{\max}$  und im 2. Schritt auf das Endergebnis  $\varepsilon$  auswirken. Zur Beantwortung dieser Frage dient eine statistische Untersuchung am Beispiel einer fehlerhaften Schlupfmessung.

Dazu wurde aus den bei einer Bremsung aufgezeichneten Messdaten ein beliebiger Zeitpunkt ausgewählt und die dabei gemessenen Schlupfwerte und die Fahrzeugverzögerung herausgegriffen. Anschließend wurde der maximale Kraftschlussbeiwert mittels des entwickelten Algorithmus 10.000 Mal bestimmt, wobei den vier Schlupfwerten, die die maßgebenden Eingangsgrößen darstellen, ein normalverteiltes „Rauschen“ überlagert wurde. Die **Abbildung 46** zeigt exemplarisch für ein Rad die Häufigkeitsverteilung der sich ergebenden Schlupfwerte bei einem Ausgangswert von 8 %. Würde man das „Rauschen“ unendlich oft überlagern, ergäbe sich die bekannte Glockenkurve der Gaußschen Normalverteilung, in der Abbildung rot eingezeichnet.

Das Histogramm in der **Abbildung 47** zeigt das Ergebnis der Berechnungen. Die rote Linie repräsentiert dabei den Wert des maximalen Kraftschlusses, der sich für die gemessenen Schlupfwerte ergibt. Die Verteilung der  $\mu_{\max}$ -Werte stellt sich folgendermaßen dar: Wegen der starken Nichtlinearität einer  $\mu$ -Schlupf-Kurve ergibt sich keine glockenförmig symmetrische Verteilung um den „Normalwert“ 0,9488. Vielmehr ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach rechts, also in den Bereich höherer  $\mu_{\max}$ -Werte verschoben und auch in diese Richtung verzerrt. Die Erklärung hierfür wurde im Prinzip schon in Abschnitt 5.4 und mit Abbildung 37 gegeben. In der Summe zu niedrige Schlupfwerte bewirken, dass der Algorithmus einen zu hohen maximalen Kraftschlussbeiwert ermittelt. Der Umkehrschluss für in der Summe zu hohe Schlupfwerte gilt jedoch wegen der erwähnten Nichtlinearität des Kurvenverlaufs nicht in gleichem Maße, so dass die dargestellte asymmetrische Verteilung zustande kommt.

Ebenso bemerkenswert wie die Form der Verteilung ist die Tatsache, dass die Bandbreite der Abweichungen der  $\mu_{\max}$ -Werte vom „Normalwert“ sehr gering ist. Annähernd 99 % der Werte liegen zwischen 0,948 und 0,96, was insofern erstaunt, als dass die relativen Schlupfabweichungen bis zu  $\pm 40$  % betragen. Man muss jedoch bedenken, dass sich die einzelnen Schlupfabweichungen u.U. gegenseitig kompensieren können.

Als Fazit dieser Untersuchungen lässt sich sagen, dass Ungenauigkeiten bezüglich der Schlupfmessung keine großen Auswirkungen auf die Ermittlung des maximalen Kraftschlusses haben. Diese Erkenntnis relativiert die in Abschnitt 4.2 gestellte Forderung nach einer sehr genauen Schlupfmessung bzw. der Verwendung von hochauflösenden Drehgebern.



**Abbildung 46:** Häufigkeitsverteilung der „verrauschten“ Schlupfwerte (beispielhaft)

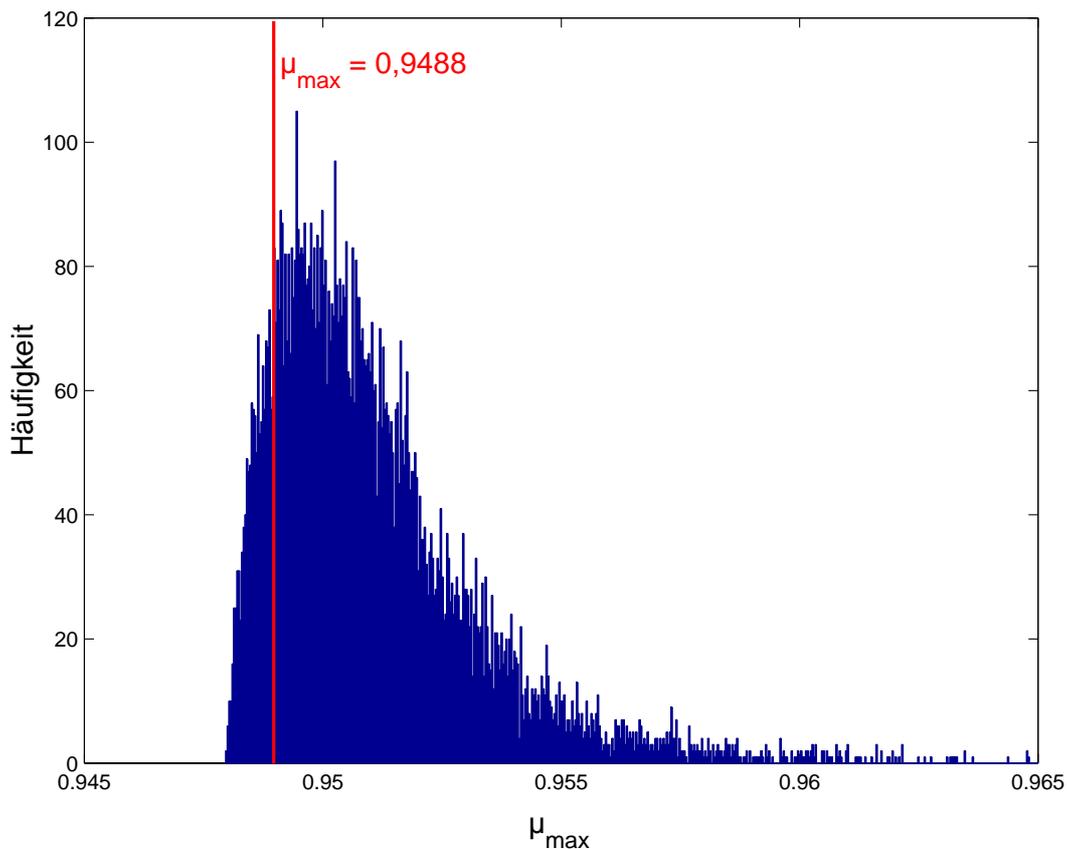


Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der berechneten Kraftschlussmaxima

## 5.7 Potenziale und Grenzen des Verfahrens

Bei der Ermittlung des maximalen Kraftschlusses bzw. seines Verlaufs über der Strecke mittels eines Algorithmus gibt es grundsätzlich zwei Faktoren, die das Ergebnis beeinflussen können:

- Die Parameter des Reifenmodells.
- Die Eingangsgrößen bzw. Messgrößen.

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass eine fehlerbehaftete Schlupfmessung keinen sonderlich großen Einfluss auf das Ergebnis der  $\mu_{\max}$ -Berechnung hat. Es ist somit nicht notwendig, die in die Schlupfberechnung eingehenden Größen Fahrgeschwindigkeit, Raddrehzahlen und dynamischer Reifenhalmmesser mit letzter Genauigkeit zu bestimmen. Als weitere Eingangsgröße, die das Endergebnis beeinflusst, bleibt somit nur noch die Fahrzeugverzögerung. Die Messung der Fahrzeuglängsverzögerung erfolgte bei den hier vorgestellten Messungen durch eine kreiselstabilisierte Plattform, die den Vorteil bietet, die Bremsverzögerung unabhängig vom Fahrzeugnickwinkel korrekt wiederzugeben. Ein solches Messsystem ist bei Nutzung des Verfahrens zur Fahrzeugtypzulassung zu teuer und zu aufwändig, so dass in einem solchen Fall ein 1- oder 3-Achs-Beschleunigungsaufnehmer verwendet werden muss. Der Einfluss des Nickwinkels auf die gemessene Verzögerung lässt sich berücksichtigen, wenn seine Größe bekannt ist. Der Nickwinkel kann z.B. dadurch bestimmt werden, dass man die Ein- bzw. Ausfederung von Vorder- und Hinterachse mit Fadenpotentiometern misst.

Einen größeren Einfluss als Messfehler haben die gewählten Modellparameter. Dies hat zur Folge, dass die Praktikabilität des Verfahrens in hohem Maße dadurch bestimmt wird, wie gut sich die Parameter ohne Zuhilfenahme von gemessenen Reifenkennfeldern bestimmen lassen. Die Ermittlung der bei der Magic Formula benötigten Längskraftsteifigkeit ohne Messfahrzeug oder Messanhänger stellt z.B. ein nicht zu unterschätzendes Problem dar. Ein mögliches Verfahren, das jedoch einer gründlichen Überprüfung bedarf, besteht darin, mit dem Versuchsfahrzeug einige schwache Bremsungen mit nur einer bremsenden Achse durchzuführen. Aus der gemessenen Verzögerung lassen sich die am Rad wirkenden Kräfte berechnen und ergeben zusammen mit dem ebenfalls gemessenen Schlupf einzelne Punkte der  $\mu$ -Schlupf-Kurve, wodurch sich die Längskraftsteifigkeit näherungsweise bestimmen lässt.

In Abschnitt 5.2.3 wurde erwähnt, dass unter Fachleuten Uneinigkeit darüber herrscht, ob die Anfangssteigung einer  $\mu$ -Schlupf-Kurve von ihrem Maximalwert abhängt oder nicht. In der Mehrzahl der Veröffentlichungen wird eine solche Abhängigkeit festgestellt, so dass es sinnvoll erscheint, diesen Umstand zu berücksichtigen. Da die Radlastabhängigkeit der Längskraftsteifigkeit ebenfalls berücksichtigt werden muss, ist es am einfachsten, einen gemeinsamen Skalierungsfaktor in das Berechnungsmodell einzuführen, mit dem die Längssteifigkeit abhängig von Radlast und Kraftschlussmaximum verändert wird. Bei der Übertragung des Verfahrens auf den Nutzfahrzeugbereich tritt zusätzlich das Problem auf, dass Lkw an Vorder- und Hinterachse meist unterschiedlich bereift sind, wodurch sich konstruktionsbedingte Unterschiede der Reifenlängssteife ergeben.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Umsetzung des Verfahrens berücksichtigt werden muss, ist die Bestimmung des Parabelparameters, der bei beiden Reifenmodellen eingeführt wurde und der die Abhängigkeit des Kraftschlussmaximums vom optimalen Schlupf beschreibt. Für die vorliegenden Ergebnisse wurde der Parameter dadurch bestimmt, dass der maximale Kraftschluss und der dazugehörige Schlupfwert einem gemessenen Reifenkennfeld entnommen wurden. Diese beiden Werte können ohne besondere Messeinrichtungen nicht mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmt werden. Eine denkbare Möglichkeit zur Umgehung dieses Problems ist es, den Parabelparameter von der Reifenlängskraftsteifigkeit abhängig zu machen.

Aus der Schwierigkeit, den maximalen Kraftschluss oder auch den Gleitbeiwert allein mit einem Versuchsfahrzeug zu bestimmen, ergibt sich unmittelbar, dass die Burckhardt-Formel für eine praktische Anwendung des Verfahrens nicht so gut geeignet ist wie die Magic Formula. Bei Verwendung der Magic Formula ist es wahrscheinlich ausreichend, die Reifenlängskraftsteifigkeit nach dem oben beschriebenen Verfahren zu bestimmen, so dass diesem Reifenmodell der Vorzug gegeben werden sollte.

Abschließend bleibt zu sagen, dass sich die in der Einleitung gestellte Forderung, ein neu entwickeltes Messverfahren müsse den maximalen Kraftschlussbeiwert bis auf 5 % genau bestimmen, wahrscheinlich nicht erfüllen lässt. Da jedoch gezeigt wurde, dass die Abweichungen des bisherigen Verfahrens über 30 % betragen können, wäre eine Reduzierung dieser Abweichungen auf unter 10 % als beachtlicher Erfolg zu werten.

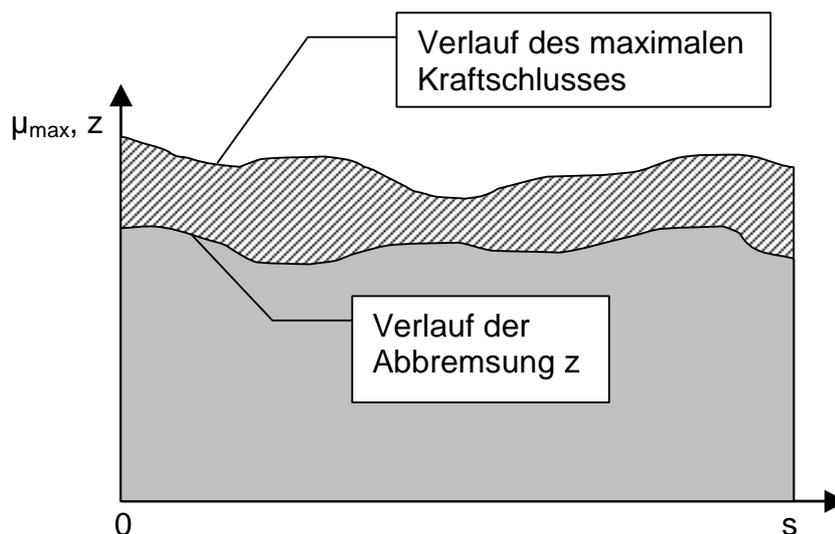
## 5.8 Bestimmung der Kraftschlussausnutzung $\varepsilon$

Wenn das Verfahren zur Ermittlung des Kraftschlussverlaufs einer Fahrbahn zufriedenstellende Ergebnisse liefert, muss auch die Bestimmung der Kraftschlussausnutzung an dieses neue Verfahren angepasst werden. In der bisherigen Richtlinie ist die Kraftschlussausnutzung  $\varepsilon$  definiert als der Quotient aus der mittleren Abbremsung  $z$  bei regelnder ABV-Anlage und dem für die gesamte Fahrbahn als konstant angenommenen maximalen Kraftschlussbeiwert  $\mu_{\max}$ :

$$\varepsilon = \frac{z}{\mu_{\max}}$$

Das neue Verfahren liefert jedoch keinen konstanten Wert für  $\mu_{\max}$ , sondern den Verlauf von  $\mu_{\max}$  über der Strecke. Da sich auch der Verlauf der Abbremsung  $z$  aus den während der Bremsung aufgenommenen Messsignalen bestimmen lässt, kann die Kraftschlussausnutzung  $\varepsilon$  als Flächenverhältnis definiert werden, siehe **Abbildung 48**. Durch numerische Integration der Abbremsung  $z$  über der Bremsstrecke ergibt sich die Fläche unterhalb des Verlaufs der Abbremsung. Bezieht man diese Fläche auf die sich in gleicher Weise ergebende Fläche unter dem Verlauf des Kraftschlusses, so erhält man die erzielte Kraftschlussausnutzung:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^s z ds}{\int_0^s \mu_{\max} ds}$$



**Abbildung 48:** Bestimmung der Kraftschlussausnutzung aus Kraftschlussverlauf und Abbremsungsverlauf

Berechnet man auf diese Weise die Kraftschlussausnutzungen für die Bremsungen, auf die sich die Abbildungen 32 bis 35 beziehen, so erhält man:

Abbildung 32:  $\varepsilon = 89,6 \%$

Abbildung 33:  $\varepsilon = 91,3 \%$

Abbildung 34:  $\varepsilon = 91,8 \%$

Abbildung 35:  $\varepsilon = 92,6 \%$

Die jeweiligen  $\varepsilon$ -Werte, die man bei Heranziehung des geglätteten und des ungeglätteten Kraftschlussverlaufs erhält, unterscheiden sich nur unwesentlich.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „Bestimmung des maximalen Kraftschlusses an mit ABV ausgerüsteten Fahrzeugen und Fahrzeugzügen“ wurde bestätigt, dass das bisher verwendete Verfahren zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von ABV-Anlagen Unzulänglichkeiten aufweist. Als Hauptgrund für die nicht immer realistischen Ergebnisse wurden Kraftschlusschwankungen der Fahrbahn identifiziert. Diese Schwankungen bezüglich der Griffigkeit sind bei jeder realen Fahrbahn gegeben und stochastisch verteilt. Hierzu wurde gezeigt, dass sowohl bei Pkw- als auch bei Lkw-Messungen der nach ECE-R13 ermittelte Wert für den maximalen Kraftschluss im Bereich des niedrigsten auf der Versuchsstrecke vorkommenden Wertes liegt. Der Einfluss des Startpunktes der Bremsung auf das Endergebnis konnte durch theoretische Betrachtungen nachgewiesen werden. Radlastschwankungen auf Grund von Streckenunebenheiten spielen eine weniger wichtige Rolle als vermutet.

Auf der Basis einer intensiven Literatur- und Patentrecherche wurden zwei alternative Modellansätze zur Kraftschlussbestimmung herangezogen und bezüglich ihrer Eignung im Rahmen der Fahrzeugtypprüfung bewertet. Anschließend erfolgte die praktische Umsetzung des vielversprechendsten Modellansatzes, der auf der rechnerischen Ermittlung des maximalen Kraftschlussbeiwertes mit Hilfe von mathematischen Reifenmodellen basiert. Es wurden erste Ergebnisse mit einem entsprechend ausgerüsteten Versuchsfahrzeug erzielt. Die mittels mathematischer Reifenmodelle berechneten Kraftschlussverläufe einer Testfahrbahn lagen vom absoluten Niveau recht nahe an dem Referenzverlauf, der mit einem speziellen Messfahrzeug ermittelt wurde. Abschließend wurde eine erste grobe Variation der Reifenmodellparameter vorgenommen, um den Einfluss des Verlaufs der  $\mu$ -Schlupf-Kurve auf das Identifikationsergebnis abschätzen zu können. Es zeigte sich, dass dieser Einfluss nicht so groß erwartet werden muss, wie zunächst vermutet wurde.

## 7 Ausblick

Aus den bis hierher erzielten Ergebnissen folgen unmittelbar die im Rahmen eines Folgeprojekts erforderlichen Schritte. Es erscheint sinnvoll, das Verfahren der Kraftschlussbestimmung mittels mathematischer Reifenmodelle weiterzuentwickeln und sich dabei auf das Magic Formula-Modell zu konzentrieren. Zunächst ist es notwendig, die Empfindlichkeit des Ergebnisses auf die Variation der angenommenen Modellparameter detailliert zu untersuchen. In einem nächsten Schritt kann dann der Einfluss von fehlerbehafteten Messgrößen auf den berechneten Kraftschlussverlauf bzw. die letztlich interessierende Kraftschlussausnutzung durch theoretische Untersuchungen und Simulationsrechnungen quantifiziert werden. Erste Ansätze zu diesem Punkt wurden in dem vorliegenden Bericht beschrieben. Erst wenn die Sensitivität des Verfahrens gegenüber fehlerbehafteten Eingangsgrößen und angenommenen Reifenmodellparametern sowie die daraus resultierenden Abweichungen durch detaillierte Varianzanalysen hinreichend genau bekannt sind, lässt sich abschätzen, ob und in welchem Maße eine Optimierung der Messausrüstung, insbesondere in Bezug auf die Schlupfmessung, erforderlich ist.

Anschließend kann die praktische Absicherung des Messverfahrens durch Versuche auf Fahrbahnen mit realistischen Inhomogenitäten sowie Niedrigreibwertstrecken erfolgen. Zudem muss die Sensitivitätsanalyse zeigen, ob ergänzende Grundsatzuntersuchungen mit dem Messfahrzeug URM II durchgeführt werden müssen, um die Einflüsse von Radlast und Griffigkeitsniveau der Fahrbahn auf die Modellparameter näher zu bestimmen.

Ein sehr wichtiger Arbeitsschritt ist die Übertragung des Messverfahrens auf den Nutzfahrzeugbereich. Dazu muss das Verfahren entsprechend angepasst werden, z.B. durch Einbeziehung höherer Achszahlen in die Berechnung. Außerdem wird es nötig sein, bei Fahrzeugen mit großem Radstand und Fahrzeugzügen die Abweichung der Kraftschlussbeiwerte an den verschiedenen Achsen zu berücksichtigen. Da Nutzfahrzeuge häufig mit unterschiedlicher Bereifung auf den einzelnen Achsen betrieben werden, gilt es auch diesen Aspekt zu berücksichtigen.

## 8 Anhang

### 8.1 Parametrische Gleichungen zur Näherung der Kraftschluss-Schlupf-Charakteristik

1. Magic Tyre Formula (Pacejka):

$$\mu(s) = D \cdot \sin(C \cdot \arctan(B \cdot s - E(B \cdot s - \arctan(B \cdot s))))$$

Darstellung: gesamter Schlupfbereich

Quelle: diverse Pacejka-Veröffentlichungen

Verwendung in: Daiß: Beobachtung fahrdynamischer Zustände und Verbesserung einer ABS- und Fahrdynamikregelung (lediglich erwähnt).

2. Formel nach Burckhardt:

$$\mu(s) = C_1 \cdot (1 - e^{-C_2 \cdot s}) - C_3 \cdot s$$

Darstellung: gesamter Schlupfbereich

Quelle: Burckhardt: „Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelssysteme“

Verwendung in: Daiß: Beobachtung fahrdynamischer Zustände und Verbesserung einer ABS- und Fahrdynamikregelung.

3. Formel 1 aus dem Siemens-Patent EP 0 630 786 A1:

$$\mu(s) = A \cdot s + B \cdot \sqrt{s}$$

Darstellung: keine Angaben

Quelle: SIEMENS AG (Kiencke, Daiss und Probst): „Verfahren und Schaltungsanordnung zum Ermitteln des Reibwertes“ Europäisches Patent Nr. EP 0 630 786 A1, 1993.

Verwendung in: siehe Quelle.

#### 4. Gebrochen rationale Formel nach Daiß:

$$\mu(s) = \frac{\mu'(0) \cdot s}{1 + c_1 \cdot s + c_2 \cdot s^2}$$

Darstellung: nur für kleine Schlupfwerte

Quelle: Daiß: „Beobachtung fahrdynamischer Zustände und Verbesserung einer ABS- und Fahrdynamikregelung“

Verwendung in: siehe Quelle.

#### 5. Formel nach Haken:

$$\mu(s) = \frac{A \cdot s^3 + C \cdot s}{B \cdot s^2 \cdot |s| + D \cdot |s| + 1} + \mu_0$$

Darstellung: gesamter Schlupfbereich

Quelle: Haken, Essers: „Measurements of Force and Moment Characteristics of Modern Tyres and a Tyre Model Based on These Results“

Verwendung in: -

## 8.2 Einfluss der Parametervariationen auf den Verlauf der $\mu$ -Schlupf-Kurven

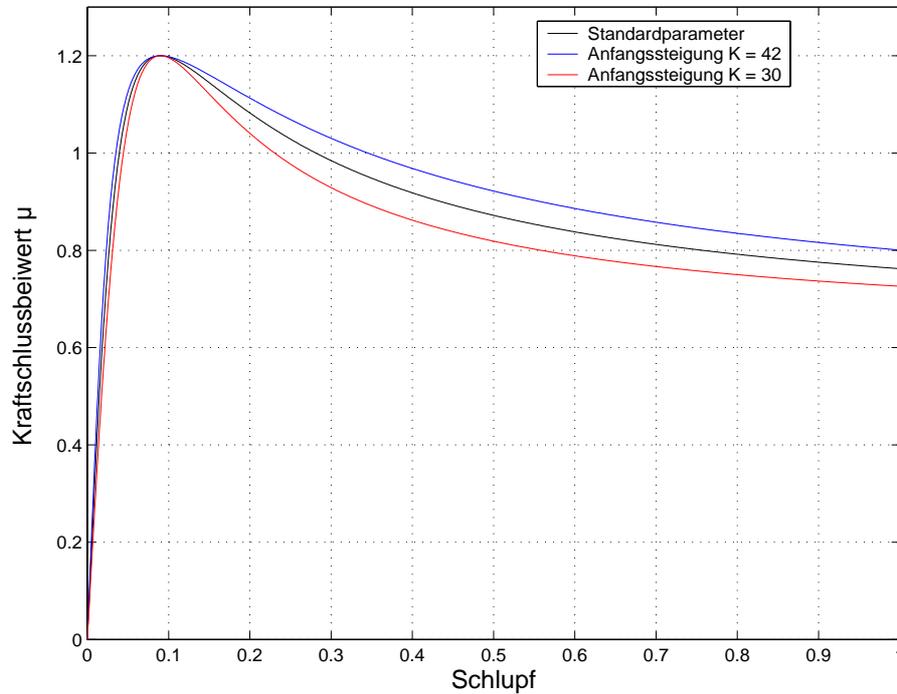


Abbildung 49: Verlauf der Magic Formula bei Variation der Anfangssteigung

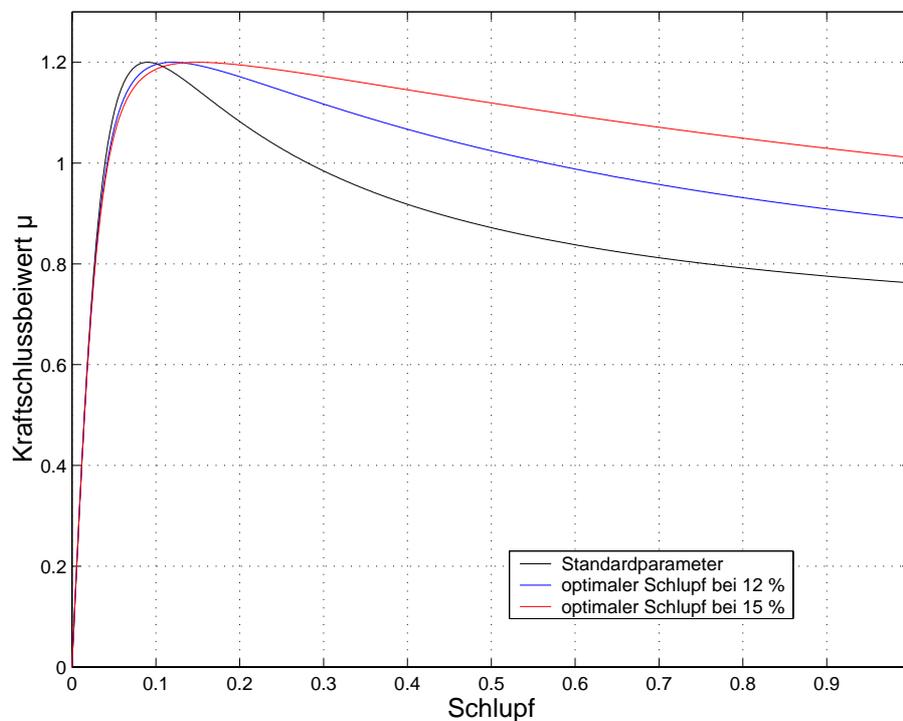
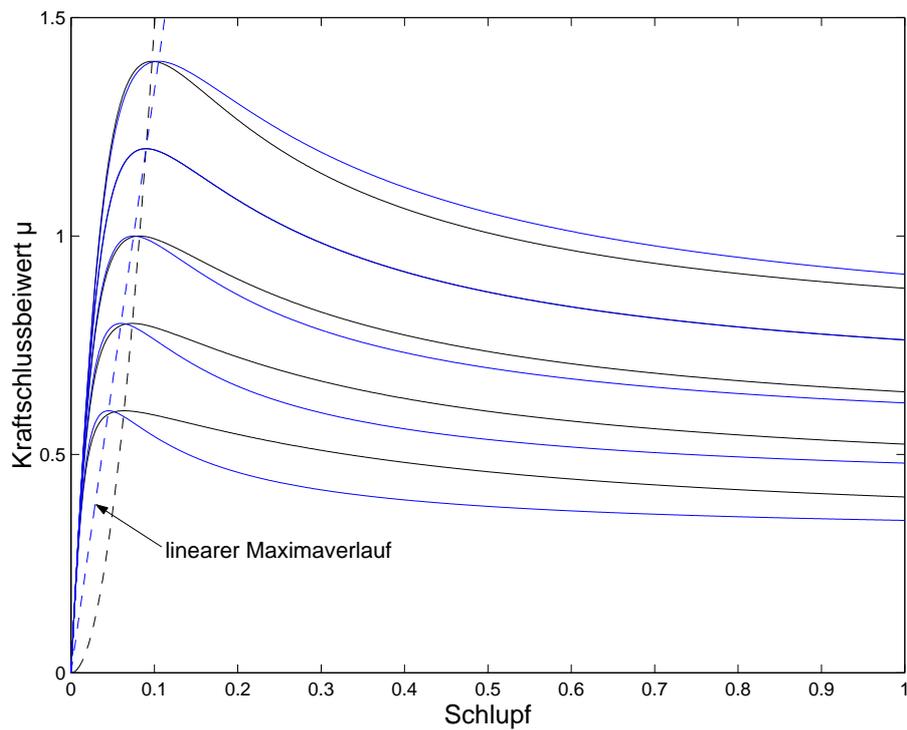
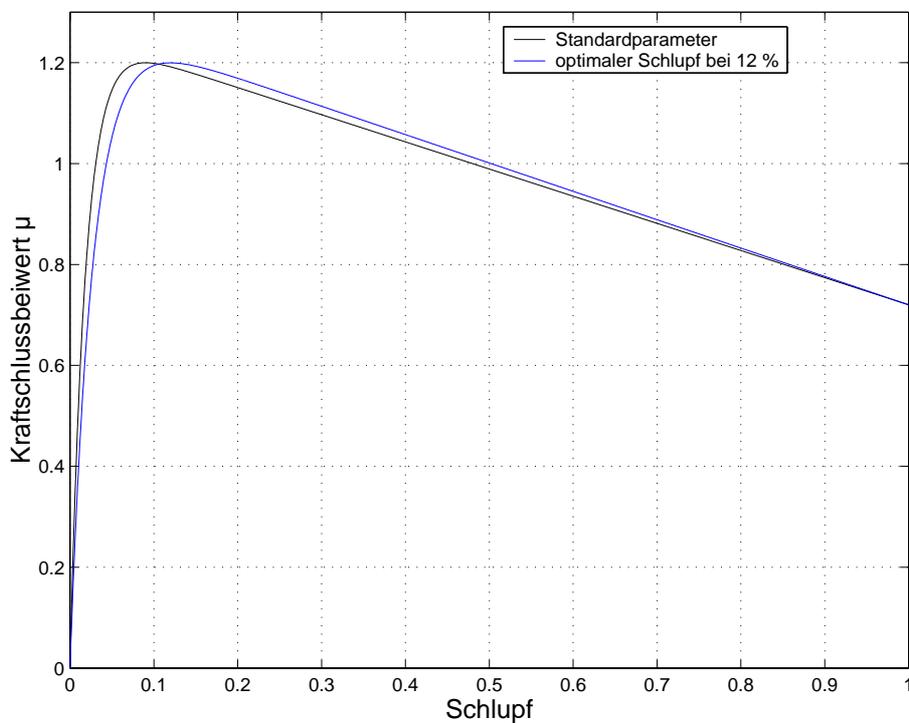


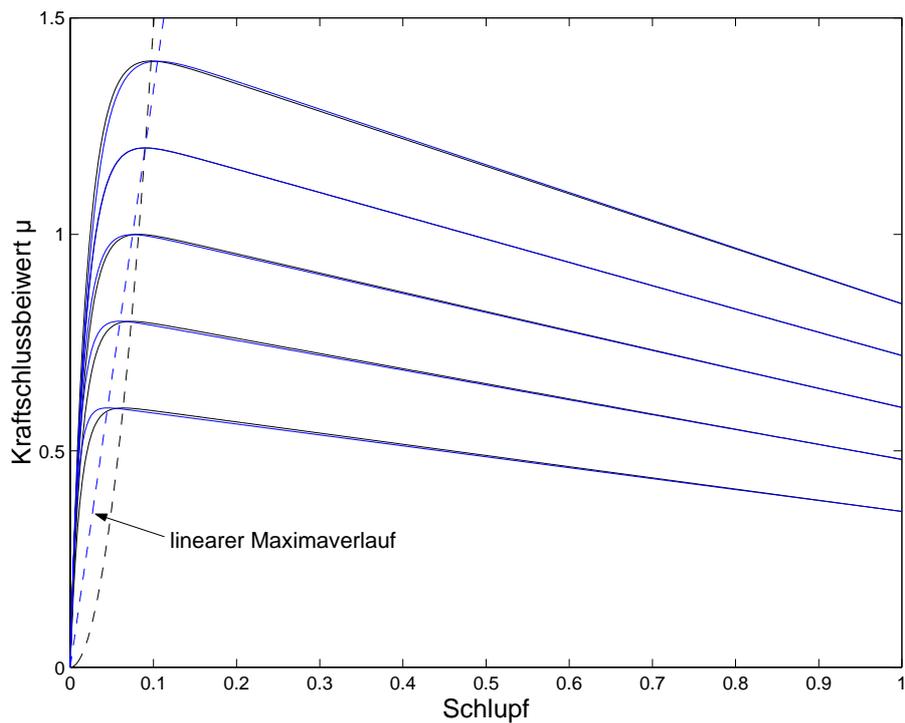
Abbildung 50: Verlauf der Magic Formula bei Variation des optimalen Schlupfes



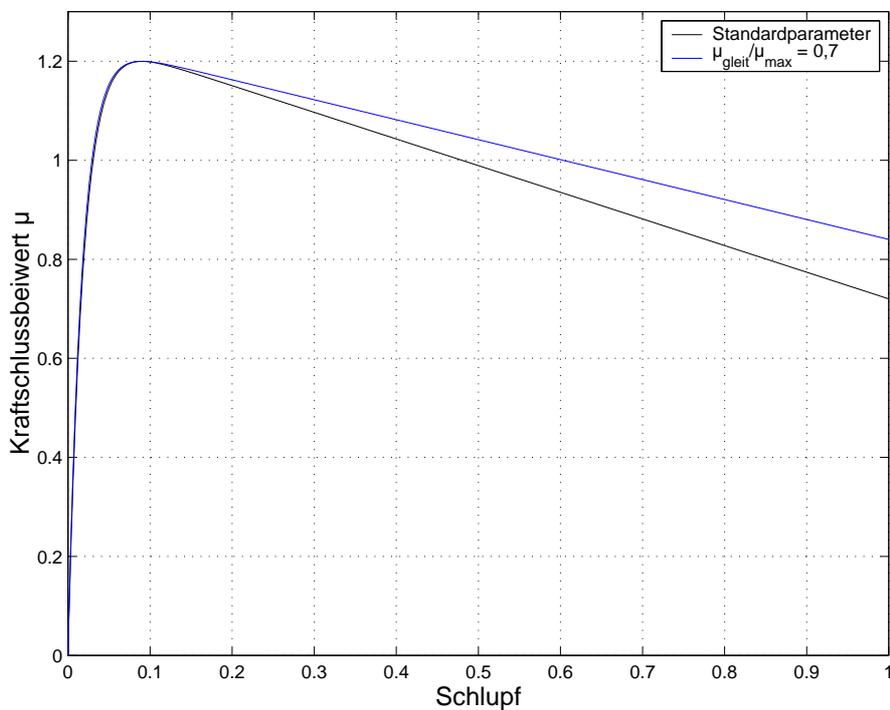
**Abbildung 51:** Verlauf der Magic Formula bei linearer Abhängigkeit der Maxima vom optimalen Schlupf



**Abbildung 52:** Verlauf der Burckhardt-Formel bei Variation des optimalen Schlupfes



**Abbildung 53:** Verlauf der Burckhardt-Formel bei linearer Abhängigkeit der Maxima vom optimalen Schlupf



**Abbildung 54:** Verlauf der Burckhardt-Formel bei Variation des Verhältnisses von  $\mu_{\text{gleit}}$  zu  $\mu_{\text{max}}$

## 9 Literatur

- [1] N.N.: ECE-R 13, Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Bremsen. FEE: Richtlinien der Europäischen Gemeinschaften für Straßenfahrzeuge (EWG-Richtlinien) und Regelungen der Economic Comission for Europe für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger (ECE-Regelungen).
- [2] N.N.: Specification for a Procedure Measuring the Adhesion Utilisation for ECE-R 13. ISO/TC22/SC2/WG6, Document N 380. Hayama, Japan, 1996.
- [3] Müller, A.; Spiecker, R.; Freitag, R.; Eilert, G.; Schöb, R.: Verfahren zur Bestimmung der Kraftschluß-/Schlupfkennlinien der Reifen eines Straßenfahrzeuges. Mercedes-Benz AG, Patent Nr. DE 4300048 A1, 1993.
- [4] Witte, B.: Verfahren zur permanenten Ermittlung des Fahrbahnreibungswerts. Volkswagen AG, Patent Nr. DE 4435448 A 1, 1994.
- [5] Germann, S.; Würtenberger, M.; Daiß, A.: Monitoring of the friction coefficient between tyre and road surface. IEEE Conference on Controle Applications, Piscataway 1994.
- [6] Daiß, Armin: Beobachtung fahrdynamischer Zustände und Verbesserung einer ABS- und Fahrdynamikregelung. Dissertation Universität Karlsruhe, 1996.
- [7] Dieckmann, Th.: Der Reifenschlupf als Indikator für das Kraftschlupfpotential. Dissertation Universität Hannover, 1992.
- [8] Dieckmann, Th.: Erkenntnisse aus der bisherigen Entwicklung des schlupfbasierten Kraftschlupfpotential-Meßsystems. VDI-Berichte Nr. 1088; Düsseldorf, VDI-Verlag 1993.
- [9] Roth, Jürgen: Untersuchungen zur Kraftübertragung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn unter besonderer Berücksichtigung der Kraftschlusserkennung im rotierenden Rad. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 195; Düsseldorf, VDI-Verlag 1993.
- [10] Fach, M.; Bachmann, V.; Breuer, B.: Der Darmstädter Reifensensor im Labor und am Fahrzeug. 2. Darmstädter Reifenkolloquium 16.10.1998. VDI Reihe 12 Nr. 362; Düsseldorf, VDI-Verlag 1998.
- [11] Becherer, Thomas: The Sidewall Torsion Sensor System. 2. Darmstädter Reifenkolloquium 16.10.1998. VDI Reihe 12 Nr. 362; Düsseldorf, VDI-Verlag 1998.
- [12] Eichhorn, U.: Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn – Einflussgrößen und Erkennung. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 222; Düsseldorf, VDI-Verlag 1994.
- [13] Holzwarth, Fabian: Entwicklung eines Verfahrens zur berührungslosen Messung der Wasserfilmdicke auf Fahrbahnen: ein Beitrag zur Verkehrssicherheit. Dissertation Universität Stuttgart, 1996.

- [14] Görich, H.-J.; Jacobi, S.; Reuter, U.: Ermittlung des aktuellen Kraftschlusspotentials eines Pkws im Fahrbetrieb. VDI-Berichte Nr. 1088; Düsseldorf, VDI-Verlag 1993.
- [15] Hartmann, Bernd: Bremsen auf nasser Fahrbahn. VDI-Berichte Nr. 916; Düsseldorf, VDI-Verlag 1991.
- [16] Essers, U.; Wohanka, U.; Haken, K.-L.: Ermittlung von Reifenkennfeldern auf realen und definiert angelegten Fahrbahnen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 740. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, 1997.
- [17] Pacejka, H.B.; Bakker, E.: The Magic Formula tyre model. Proceedings 1<sup>st</sup> Tyre Colloquium, Delft, Oct. 1991. Suppl. to Vehicle System Dynamics, Vol. 21, 1993.
- [18] Oosten, J. van; Bakker, E.: Determination of Magic Formula tyre model parameters. Proceedings 1<sup>st</sup> Tyre Colloquium, Delft, Oct. 1991. Suppl. to Vehicle System Dynamics, Vol. 21, 1993.
- [19] Burckhardt, M.: Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelsysteme. Vogel Fachbuch, Würzburg, 1993.
- [20] Bachmann, T.: Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 286; Düsseldorf, VDI-Verlag 1996.
- [21] 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.
- [22] Fach, M.: Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn. Dissertation TU Darmstadt, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 411; Düsseldorf, VDI-Verlag 2000.
- [23] N.N.: Feststellung der Kraftschlusseigenschaften eines Nutzfahrzeugreifens der Dimension 295/80 R 22.5 auf verschiedenen Teilstrecken des BOSCH-Versuchsgeländes in Schwieberdingen. Bericht Nr. 145 der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. Weber GmbH (IPW), Hannover, 2000.
- [24] Witte, B.; Zuurbier, J.: Erfassung des Haftreibungsbeiwerts im fahrenden Fahrzeug und Messung von Reifenparametern bei verschiedenen Fahrbahnoberflächen. VDI-Berichte Nr. 1224; Düsseldorf, VDI-Verlag 1995.