

# Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 21

**bast**

# **Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe**

**Untersuchungen zum Einfluß  
der Profiltiefe unterschiedlich  
breiter Reifen auf den Kraftschluß  
bei Nässe**

von

Markus Fach

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 21**

**bast**

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

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

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

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

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

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 9.4530:**  
Untersuchungen zum Einfluß der Profiltiefe unterschiedlich breiter Reifen auf den Kraftschluß bei Nässe

### Herausgeber:

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

### Redaktion:

Referat Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 9 45 44-0  
Telefax (04 71) 9 45 44 77

ISSN 0943-9315

ISBN 3-89429-804-9

Bergisch Gladbach, Dezember 1996

## Kurzfassung - Abstract - Résumé

### Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe

Der Kraftschluß zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt in entscheidender Weise die Fahr-sicherheit, insbesondere bei Nässe.

Der Verbraucher, der sein Fahrzeug mit breiteren Reifen ausrüsten will, hat oftmals keine Möglichkeit, die Eigenschaften der jeweiligen Reifen bei nachlassender Profiltiefe einzuschätzen. Es sollte in dieser Untersuchung geklärt werden, ob die Verwendung von Breitreifen Nachteile für die Fahr-sicherheit bei Nässe mit sich bringt, insbesondere unter Berücksichtigung der im Betrieb zwangsläufig nachlassenden Profiltiefe.

Im Innentrommelprüfstand der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden Kraftschlußuntersuchungen an Pkw-Reifen in drei verschiedenen Breiten durchgeführt. Die Untersuchung beschäftigt sich mit dem Einfluß der Reifenbreite, der Profilstaltung und der Profilhöhe auf den Kraftschluß bei Nässe. Dabei werden auch die Parameter Fahrgeschwindigkeit, Wasserfilmhöhe, Radlast und Reifeninnendruck berücksichtigt, die den Kraftschluß bei Nässe maßgeblich mitbestimmen.

Steigende Fahrgeschwindigkeit, geringere Profiltiefe und höherer Wasserfilm verringern die maximal übertragbaren Bremskräfte. Höhere Radlasten verringern die Tendenz des Reifens, unter dem Druck des sich ausbildenden Wasserkeils aufzuschwimmen und verbessern dadurch das Kraftschlußverhalten bei Nässe. Niedrige Profilhöhen führen wegen der schlechter werdenden Wasserverdrängung zu einem stärkeren Abfall der Kraftschlußmaximalwerte bei steigender Geschwindigkeit oder höherem Wasserfilm. Insgesamt birgt die Kombination von hoher Fahrgeschwindigkeit, niedriger Profiltiefe und hohem Wasserfilm eine extrem hohe Aquaplaninggefahr, die sich noch verstärkt, wenn der korrekte Reifeninnendruck unterschritten wird.

Bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten zeigen schmalere Reifen Vorteile, während bei höheren Fahrgeschwindigkeiten Breitreifen das Niveau schmaler Reifen sogar übertreffen können.

### Factors affecting the adhesion between tyre and road surface under wet conditions

The adhesion between tyre and road surface determines the safety with which a vehicle travels to

a significant extent - in particular when roads are wet.

The normal driver, who wishes to equip his vehicle with wide tyres, has often no opportunity of estimating how the properties of a particular tyre will change as the tread wears down. The objective of this investigation was therefore to clarify whether the use of wide tyres brings disadvantages in terms of driving safety under wet road conditions in particular when the use of the tyres has caused their tread to wear down.

Adhesion investigations were carried out on car tyres of three different widths on the internal drum test bench at the Federal Highway Research Institute. The investigation examined the influence of the tyre width, the form of the tread and the depth of the tread on the adhesion under wet road conditions. In addition the parameters of vehicle speed, water film height, wheel load and tyre inflation pressure, which also affect the adhesion under wet conditions to an important extent, were taken into account.

Increasing vehicle speed, reductions in tread depth and increases in thickness of water film reduce the maximum braking forces which can be transmitted. Higher wheel loads reduce the tendency of a tyre to commence to float on the wedge of water that builds up in front of it and improve thereby the adhesion behaviour under wet conditions. As a result of the accompanying reduction in the ability of a tyre to squeeze out the water beneath it, low tread heights lead to an increased fall in the maximum values of adhesion at higher speeds and greater water film thicknesses. Overall the combination of high speed, low tyre tread and thick film of water brings an extremely high risk of aquaplaning, the risk being still further increased if the tyre inflation pressure falls below the correct values.

At low speeds narrow tyres show advantages whereas wide tyres are able to exceed the properties of narrow tyres at higher speeds.

### Facteurs influençant l'adhérence entre pneus et chaussée par temps de pluie

L'adhérence entre les pneus et la chaussée a une influence décisive sur la sécurité de la conduite, et tout particulièrement par temps de pluie.

Celui qui envisage équiper son véhicule de pneus

larges n'a souvent pas la possibilité d'évaluer comment les propriétés des pneus en question vont changer avec l'usure de la sculpture du pneu. Cette étude visait à résoudre la question de savoir si les pneus larges présentent des désavantages quant à la sécurité de la conduite sur chaussée humide, prenant surtout en considération que la profondeur de sculpture diminue forcément avec le temps d'usage.

L'Institut fédéral de recherches routières a effectué dans son tambour giratoire expérimental des essais d'adhérence avec des pneus à trois largeurs différentes. L'étude a examiné l'influence de la largeur des pneus, du dessin et de la profondeur de sculpture de la bande de roulement sur l'adhérence entre pneus et chaussée par temps de pluie. En plus, d'autres paramètres qui exercent également une influence décisive sur l'adhérence par temps humide sont aussi pris en considération, notamment la vitesse de roulement, la hauteur de la couche d'eau, la charge sur la roue et la pression intérieure du pneumatique.

Si la vitesse de roulement est élevée, la profondeur de sculpture déjà réduite et la hauteur de la couche d'eau importante, l'effet maximal des forces de freinage est diminué. Avec une charge sur la roue élevée, les pneus ont peu de tendance à glisser sous l'effet du front de l'eau et, par conséquent, le comportement d'adhérence sur chaussée humide s'améliore. Une faible profondeur de sculpture résulte, en raison du déplacement de l'eau insuffisant, en une réduction accentuée des valeurs maximales de l'adhérence si la vitesse augmente et la couche d'eau est élevée. Dans l'ensemble, la combinaison entre vitesse de roulement élevée, faible profondeur de sculpture et couche d'eau importante amène un très haut risque d'aquaplanage, qui augmente encore si la pression intérieure des pneus est inférieure aux valeurs adéquates.

Les pneus plus étroits présentent des avantages aux vitesses de roulement moins élevées, tandis que, aux vitesses augmentées, les pneus larges peuvent même s'avérer plus avantageux.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	7	8.2.8	Reifenbreite 225, Hersteller C, 2 mm Profil.....	53
<b>2</b>	<b>Versuchseinrichtung</b> .....	7	8.2.9	Reifenbreite 225, Hersteller C, 5 mm Profil.....	55
2.1	Prüfstand IPS.....	7	8.2.10	Reifenbreite 225, Hersteller C, 8 mm Profil.....	57
2.2	Regelgrößen am Prüfstand IPS.....	9	8.2.11	Reifenbreite 175, Hersteller A, 2 mm Profil.....	59
2.2.1	Kräfte .....	9	8.2.12	Reifenbreite 175, Hersteller A, 5 mm Profil.....	62
2.2.2	Geschwindigkeiten .....	9	8.2.13	Reifenbreite 175 Hersteller A, 8 mm Profil.....	65
2.2.3	Wasserfilm .....	10	8.2.14	Reifenbreite 155, Hersteller A, 2 mm Profil.....	68
2.2.4	Temperaturen .....	10	8.2.15	Reifenbreite 155, Hersteller A, 5 mm Profil.....	71
<b>3</b>	<b>Versuchsdurchführung</b> .....	11	8.2.16	Reifenbreite 155, Hersteller A, 8 mm Profil.....	74
3.1	Versuchsprogramm .....	11			
3.2	Versuchsablauf .....	12			
3.2.1	Fahrbahnzustand .....	12			
3.2.2	Referenzmessungen, Referenzmodell .....	17			
3.2.3	Versuchssteuerung .....	19			
<b>4</b>	<b>Kraftschluß bei Nässe, Aquaplaning, theoretische Grundlagen</b> .....	19			
<b>5</b>	<b>Versuchsergebnisse</b> .....	20			
5.1	Kenngrößen der Auswertung.....	20			
5.2	Einfluß von Radlast und Reifeninnendruck .....	21			
5.3	Einfluß von Geschwindigkeit und Wasserfilmhöhe.....	21			
5.4	Einfluß der Profilhöhe.....	22			
5.5	Einfluß der Reifenbreite.....	23			
5.6	Einfluß der Reifenmarke.....	23			
5.7	Korrelationen.....	24			
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> ....	26			
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	27			
<b>8</b>	<b>Anhang</b> .....	28			
8.1	Kraftschlußmaximalwerte .....	28			
8.1.1	Reifenbreite 225.....	28			
8.1.2	Reifenbreite 175.....	32			
8.1.3	Reifenbreite 155.....	34			
8.2	Kraftschlußkurven .....	36			
8.2.1	Referenzmessungen .....	36			
8.2.2	Reifenbreite 225, Hersteller A, 2 mm Profil .....	38			
8.2.3	Reifenbreite 225, Hersteller A, 5 mm Profil .....	41			
8.2.4	Reifenbreite 225, Hersteller A, 8 mm Profil .....	44			
8.2.5	Reifenbreite 225, Hersteller B, 2 mm Profil .....	47			
8.2.6	Reifenbreite 225, Hersteller B, 5 mm Profil .....	49			
8.2.7	Reifenbreite 225, Hersteller B, 8 mm Profil .....	51			



## 1 Einleitung

Der Kraftschluß zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt in signifikanter Weise die Fahrsicherheit, insbesondere bei Nässe.

Die hier vorgestellte Untersuchung beschäftigt sich mit dem Einfluß der Reifenbreite, der Profilgestaltung und der Profilhöhe auf den Kraftschluß bei Nässe.

Dabei werden auch die Parameter Fahrgeschwindigkeit, Wasserfilmhöhe, Radlast und Reifeninnen- druck berücksichtigt, die den Kraftschluß bei Nässe maßgeblich mitbestimmen.

Ziel der Untersuchung ist es zu ermitteln, wie stark sich die Gebrauchseigenschaften von verschiedenen breiten Reifen bei Nässe unterscheiden.

Es soll geklärt werden, ob es den Reifenherstellern gelungen ist, die bei Breitreifen prinzipiell stärker vorhandene Tendenz des Aufschwimmens unter Aquaplaningbedingungen durch geeignete Profilgestaltung, Laufflächenmischung und Reifenkonstruktion zu verringern oder sogar zu kompensieren.

In veröffentlichten Untersuchungen und Reifentests wird vor allem auf das Naßgriffverhalten von Neu- reifen mit voller Profiltiefe eingegangen.

Der Verbraucher, der sein Fahrzeug mit breiteren Reifen ausrüsten will, sei es aus Gründen der Fahrdynamik auf trockener Straße, oder nur aus Gründen der Optik, hat oftmals keine Möglichkeit, die Eigenschaften der jeweiligen Reifen bei nachlassender Profiltiefe einzuschätzen.

Besonders problematisch ist dabei das Aquaplaningverhalten der Reifen, da die Tiefe der Profilrillen die Menge des Wassers beeinflusst, die der Reifen in der vorhandenen Zeit unter den Profilstollen verdrängen und in den Längs- und Querrillen abführen kann.

Es soll in dieser Untersuchung geklärt werden, ob die Verwendung von Breitreifen Nachteile für die Fahrsicherheit bei Nässe mit sich bringt, insbesondere unter Berücksichtigung der im Betrieb zwangsläufig nachlassenden Profiltiefe.

Darüber hinaus dient das Forschungsprojekt dazu, die Möglichkeit eines theoretischen Ansatzes zur Beschreibung des Reifenverhaltens auf nassen Fahrbahnen zu untersuchen.

## 2 Versuchseinrichtung

### 2.1 Prüfstand IPS

Der Innentrommelprüfstand der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde im Jahr 1974 errichtet und diente zunächst hauptsächlich zur Untersuchung des Fahrbahnverschleißes durch Spikesreifen. Die Konzeption war allerdings von vornherein auf ein breiteres Anwendungsspektrum, wie z.B.: Kraftschluß- und Schnellaufuntersuchungen ausgerichtet [KELLER, 1975]. Bild 2.1 zeigt eine Ansicht der Gesamtanlage.

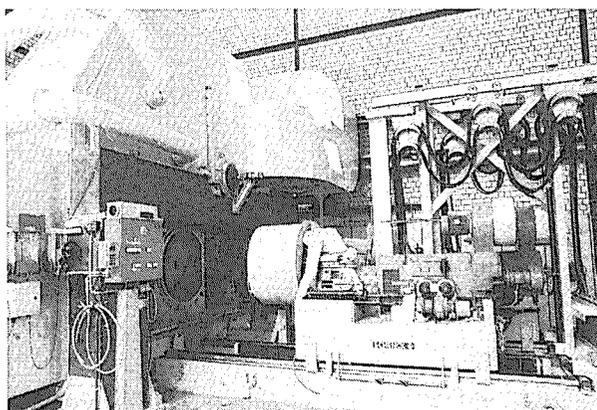
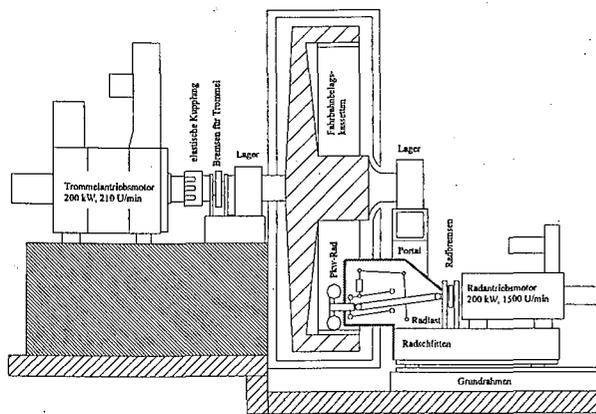


Bild 2.1: Gesamtansicht des Prüfstands IPS

Im Vordergrund befindet sich einer der beiden Radschlitten mit Antriebsmotor bzw. Bemsgenerator und montiertem Pkw Rad, im Hintergrund das Klimagehäuse, das die Prüfstandsfahrbahn umgibt. Es ist mit einer Öffnung versehen, in die der Radschlitten mit dem Versuchsreifen eingefahren wird. Die Trommel rotiert im Inneren des Klimagehäuses.

Der Innendurchmesser der mechanisch gelagerten und einseitig offenen Lauftrommel beträgt 4 m. Der Fahrbahnbelag wird in 12 auswechselbaren Kassetten auf der Innenseite der Trommel montiert. Die Beläge sind bis zu 80 mm stark und werden mit Hilfe eines speziellen Verfahrens so hergestellt, daß sie in Aufbau und Oberflächeneigenschaften realen Fahrbahnbelägen entsprechen.



#### Technische Daten

Geschwindigkeit:	230 km/h	Sturzwinkel:	-2°...+8°
Trommeldurchmesser:	380 cm	Schräglaufwinkel:	-15°...+15°
Antriebsleistung		Klimatisierung:	-10°C...+50°C
Trommel:	200 kW	Kassettenlänge:	ca. 1m
je Rad:	200 kW	Kassettenbreite:	0,55 m
Radnormallast:	10 kN	Staubabsaugung	
Umfangskraft:	5 kN	Bewässerung regelbar	
Schlupf:	0...100 %	Baujahr 1974	

Bild 2.2: Aufbau IPS (schematisch)

Bild 2.2 zeigt den schematischen Aufbau sowie die wichtigsten technischen Merkmale des Prüfstands.

Die Prüfstandsfahrbahn hat einen lichten Durchmesser von 3,8 m und eine Breite von 53 cm. Der Antrieb der Trommel erfolgt über einen drehzahlregulierten Gleichstrommotor. Die Höchstgeschwindigkeit der Trommel an der Fahrbahnoberfläche beträgt mit Standardkassetten 150 km/h (Umfangsgeschwindigkeit). Bei Bestückung mit Leichtkassetten, bei denen die Füllhöhe des Fahrbahnbelages auf 40 mm begrenzt ist, kann die Geschwindigkeit bis auf 230 km/h erhöht werden.

Im unteren Bereich der Trommel können ein oder zwei an getrennten Radschlitten montierte Pkw-Räder in die Trommel eingefahren werden und auf der Fahrbahn abrollen.

Die Räder werden über elektromotorisch verstellbare Schraubenfedern mit einer Normalkraft bis zu 10 kN belastet.

Über eigene drehzahlgeregelte Gleichstromantriebe können die Räder mit Umfangskräften von bis zu 5 kN sowohl antreibend als auch bremsend beaufschlagt werden.

Die Vorgabe der Brems- bzw. Umfangskraft kann dabei durch die Regelung von Schlupf oder Umfangskraft erfolgen.

Die Prüfstandstrommel mit Fahrbahn ist von einem geschlossenen Gehäuse mit Wärmeisolierung umgeben, in Kombination mit einem Kühlaggregat

und einem mehrstufigen Heizregister kann die Luft und damit auch die Fahrbahntemperatur zwischen -20 °C und +60 °C eingeregelt werden.

Das zur Bewässerung der Fahrbahn eingesetzte Wasser zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf und kann mit einem eigenen Heizgerät beheizt, oder mit Hilfe der prüfstandseigenen Kältemaschine gekühlt werden<sup>1</sup>.

Die hier beschriebenen Kraftschlußuntersuchungen wurden auf einem standardmäßigen Asphaltbetonbelag vom Typ AB 0/11 S mit einer Ausgangsstärke von 80 mm durchgeführt. In die Fahrbahn ist eine ca. 40 cm breite und 15 mm tiefe Spurrille eingeschliffen, die durch die seitlich hochstehenden Stege einen zu schnellen Abfluß des Wasser verhindert.

Die Griffigkeit der Fahrbahn liegt normalerweise über 55 SRT Einheiten. Dieser Wert liegt innerhalb der auf dem öffentlichen Straßennetz anzutreffenden Bandbreite [FGSV, 1994]. Das Nachlassen der Griffigkeit durch die Polierwirkung der Versuchsreifen kann entweder durch Befahren mit einem Spikesreifen unter Längskraft, oder durch eine kontinuierlich arbeitende Aufrauheinrichtung ausgeglichen werden (siehe Kapitel 3.2.3).

Die Installation einer kontinuierlichen Aufrauheinrichtung am Innentrommelprüfstand erfolgte im Rahmen einer vorhergehenden Untersuchung [FACH, 1995].

Bremsversuche mit unterschiedlich breiten Versuchsreifen verursachen naturgemäß eine der Latschbreite entsprechende, über die Fahrbahnbreite inhomogen verteilte Polierwirkung. Dieser Effekt muß bei der Versuchsplanung berücksichtigt werden und erfordert ein genaues Abstimmen der einzelnen Versuchsreihen aufeinander (siehe Kapitel 3.2).

Der Einfluß des Krümmungsradius kann nach einer früheren Untersuchung bei einem Trommelradius von 2 Metern vernachlässigt werden [KREMPEL, 1965].

<sup>1</sup> Das gleichzeitige Temperieren von Prüfstand und Wasser ist erforderlich, um besonders bei sehr hohen und sehr tiefen Temperaturen die Fahrbahntemperatur und Lufttemperatur über einen längeren Versuchszeitraum konstant halten zu können. Eine von der Lufttemperatur zu stark abweichende Wassertemperatur würde sonst als Störgröße in dem Temperaturregelkreis der Klimakammer auftreten.

## 2.2 Regelgrößen am Prüfstand IPS

### 2.2.1 Kräfte

Die Messung der Radlast erfolgt durch eine Kraftmeßdose, die sich zwischen dem Belastungshebel und der Radaufhängung, einer Doppelquerlenkeraufhängung, befindet.

Die Hebelverhältnisse werden dabei berücksichtigt. Der Meßfehler der Radlast beträgt laut Herstellerangaben  $\pm 1\%$  vom Endwert, der Meßfehler für die Radumfangskraft [SOLLFRANK, 1975]  $\pm 2\%$  vom Endwert.

Die Radumfangskraft wird indirekt ermittelt. Aus den gemessenen Motorströmen (Erreger- und Ankerstrom) des Radmotors wird über eine fest verdrahtete analoge Rechenschaltung unter Berücksichtigung der Verluste das Drehmoment berechnet. Mit Hilfe des in einem Kalibriervorgang ermittelten dynamischen Reifenhalmessers wird aus dem Drehmoment die Radumfangskraft berechnet [KROPF, 1975].

Diese berechnete Radumfangskraft ist auch die Eingangsgröße für den Analogrechner, der die Betriebsart Umfangskraftregelung steuert. In dieser Betriebsart wird der Prüfstandselektronik über ein Stellpotentiometer eine Umfangskraft vorgegeben (Bremskraft oder Antriebskraft), die dann von der Regelung konstant gehalten wird.

### 2.2.2 Geschwindigkeiten

Die Umfangsgeschwindigkeiten von Trommel (Prüfstandsfahrbahn) und Rad werden von analogen Drehzahlmessern ermittelt und mit Hilfe des konstanten Trommelradius und dem jeweils kalibrierten dynamischen Reifenhalmesser berechnet.

Diese Geschwindigkeiten werden zur Prüfstandsteuerung herangezogen, dabei kann ein definierter Bremsschlupf zwischen Rad und Trommel vorgegeben werden. Dies erfolgt entweder manuell über ein Stellpotentiometer, oder rechnergesteuert für eine zeitabhängige Vorgabe des Schlupfwertes während einer Messung.

Für den Schlupf gelten folgende Definitionen:

$$\text{Antriebsschlupf: } s_a = \frac{v_r - v_t}{v_r}$$

$$\text{Bremsschlupf: } s_b = \frac{v_r - v_t}{v_t}$$

mit:  $v_r$  : Umfangsgeschwindigkeit des Rades  
 $v_t$  : Umlaufgeschwindigkeit der Trommel in Höhe der Fahrbahn (Fahrgeschwindigkeit)

Definitionsgemäß ist der Schlupf  $s = 0$ , wenn die Umfangskraft den Wert 0 annimmt. Zur Kalibrierung des dynamischen Reifenhalmessers wird vor Versuchsbeginn das Potentiometer, das den Halmmesserwert in die Prüfstandsteuerung einspeist, so eingestellt, daß die Umfangskraft am abrollenden Prüfrad 0 beträgt.

Damit ist der richtige dynamische Reifenhalmesser eingestellt, der in den darauffolgenden Versuchen als konstant angenommen wird.

Die hier beschriebenen Kraftschlußuntersuchungen wurden schlupfgesteuert bei konstanter Trommelgeschwindigkeit durchgeführt. Ein Rechner gibt der Prüfstandsregelung den Schlupfollwert des Prüfrades vor. Der analoge Regelkreis regelt den Schlupfwert ein und hält ihn so lange konstant, bis der nächste Sollwert vorgegeben wird. Werden die Schlupfollwerte vom Rechner kontinuierlich steigend vorgegeben, so kann die gesamte quasistationäre  $\mu$ -Schlupf Kurve des Reifens durchfahren werden.

Die dabei auftretenden Radumfangkräfte werden nach dem oben beschriebenen Verfahren gemessen und zusammen mit den anderen Meßgrößen (Geschwindigkeiten, Temperaturen, gerechneter Schlupfwert, etc.) vom Rechner erfaßt und gespeichert.

Damit jeder Punkt der Kraftschlußkurve bei quasistationären Bedingungen aufgenommen werden kann, muß die zeitabhängige Sollwertvorgabe für den Schlupf auf den Zeitbedarf des Regelkreises für die Einregelvorgänge von Trommelgeschwindigkeit, Raddrehzahl und Radumfangskraft abgestimmt werden. Für verschiedene Abschnitte der Kraftschlußkurve haben sich dabei unterschiedliche Transienten der Schlupfvorgabe bewährt.

### 2.2.3 Wasserfilm

Für Kraftschlußuntersuchungen auf nasser Fahrbahn verfügt der Prüfstand über eine Bewässerungseinrichtung mit einem geschlossenen Wasserkreislauf, zwei Umwälzpumpen, Drosselventilen, Durchflußmesser und einer speziellen Bewässerungsdüse.

Das Wasser wird in Fahrtrichtung hinter dem Prüfrad auf die Fahrbahn aufgebracht, so daß während des anschließenden Trommelumlaufs genügend Zeit zur Ausbildung eines gleichmäßigen Wasserfilms zur Verfügung steht, bevor das Prüfrad die Flüssigkeit überrollt. Die Wassermenge, die zufließen muß, um einen konstant hohen Wasserfilm auf der Fahrbahn zu erhalten, hängt von der Trommelgeschwindigkeit, der Radlast, der Breite des Prüfreifens und von weiteren Faktoren ab.

Außerdem nimmt bei Bremsversuchen mit zunehmendem Schlupf des Reifens die Wasserverdrängung zu, so daß mehr Wasser zugeführt werden muß.

Um während des Versuchslauf die Wasserfilmhöhe konstant zu halten, wurde eine Regelungseinrichtung für die Höhe des Wasserfilms entwickelt und gebaut [HEINRICHS, 1992]. Kernstück dieser Einrichtung ist ein berührungslos arbeitender kapazitiver Abstandssensor, der die Höhe der Wasserschicht auf der Fahrbahn mißt.

Dieser Meßwert stellt in einem rechnergestützten Regelkreis die Ist-Größe dar. Sie wird mit dem vorher eingegebenen Sollwert verglichen und mit Hilfe von pneumatisch arbeitenden Drosselventilen im Wasserkreislauf geregelt.

Der Sensor ist in der Rollspur des Reifens in ca. 1,10 m Abstand vor dem Prüfrad installiert und durch eine Schutzhaube vor Spritzwasser geschützt. Der Meßbereich des Geräts erstreckt sich von 0 bis 10 mm bei einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm.

Die Messung der Wasserfilmhöhe basiert dabei zwar auf einer kapazitiven Abstandsmessung, dennoch handelt es sich bei den angegebenen Wasserfilmhöhen um rechnerische Werte. Die Ursache dafür ist das Kalibrierverfahren, das der Messung zugrunde liegt. Dabei wird eine genau definierte Wassermenge (0,53 l) auf die Prüfstands-fahrbahn aufgebracht. Diese Menge ergibt auf der Fahrbahn von 12 m Länge und 0,55 m Breite einen rechnerischen Wasserfilm von 0,1 mm Höhe. Die Wassermenge auf der Fahrbahn wird anschließen kontinuierlich um konstante Beträge

erhöht und die vom Wasserfilmsensor gemessenen Signale werden aufgenommen.

Aus diesen Signalen und den entsprechenden rechnerischen Wasserfilmhöhen wird dann das Kalibrierpolynom entwickelt, das den späteren Messungen zu Grunde liegt.

Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, Wasserfilmhöhen messen und angeben zu können, die deutlich unterhalb der mittleren Rauhtiefe der Fahrbahnoberfläche liegen und daher durch ein Abstandsmessverfahren eigentlich nicht zu bestimmen sind (z.B.: 0,1 mm).

Bild 2.3 zeigt den im Reifenprüfstand montierten Wasserfilmsensor.

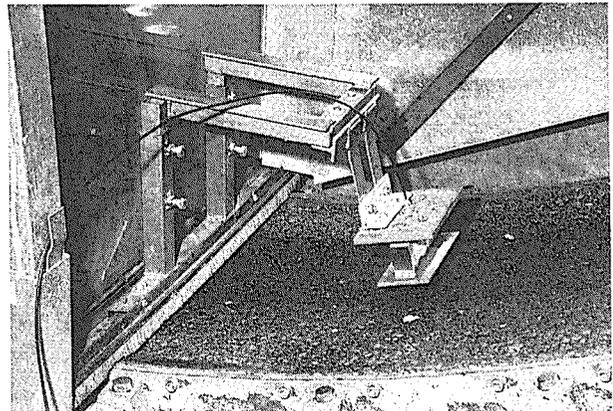


Bild 2.3: Wasserfilmsensor

Für die Regelung unterschiedlich großer Wassermengen stehen zwei Pumpen mit unterschiedlich großen Fördermengen und jeweils eigenen Drosselventilen zur Verfügung, damit der Durchfluß über einen möglichst weiten Bereich mit hoher Genauigkeit geregelt werden kann.

Der Wasserfilm wird vom gleichen Rechner geregelt, der auch parallel den Schlupf vorgibt und die Meßdatenerfassung durchführt. Damit ist dieser Rechner in der Lage den gesamten Versuchslauf zu steuern (siehe Kapitel 3 Versuchsdurchführung).

### 2.2.4 Temperaturen

Für die Versuche wurden die für den Kraftschluß relevanten Umgebungstemperaturen, die Wasser-, die Luft- und die Fahrbahntemperatur gemessen

und auf den jeweils gleichen Wert mit einer Toleranz von  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  eingestellt.

Die Lufttemperatur wird in der Klimakammer des Prüfstands IPS an drei verschiedenen Stellen gemessen und erfaßt. Gleichzeitig steuert ein interner analoger Regelkreis ein Kühlaggregat bzw. ein mehrstufiges Heizregister und sorgt dafür, daß der über ein Potentiometer vorgegebene Sollwert eingehalten wird.

Die Fahrbahntemperatur wird in ca. 4 cm Tiefe der Fahrbahn gemessen, berührungslos nach außen übertragen und ebenfalls vom Meßdatenerfassungssystem gespeichert.

Eine direkte Erfassung der Fahrbahnoberflächentemperatur, beispielsweise durch einen Infrarotsensor, ist bei nasser Fahrbahn nicht möglich.

Die Wassertemperatur wird kurz vor Eintritt des Wassers in den Prüfstand gemessen und zusammen mit den anderen Temperaturen aufgezeichnet.

Die Temperatur, bei der die hier diskutierten Versuche durchgeführt worden sind, betrug  $18 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Temperaturbereich, in dem der Prüfstand betrieben werden kann, erstreckt sich von  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3 Versuchsdurchführung

#### 3.1 Versuchsprogramm

Die Kraftschlußuntersuchungen wurden im Innentrommelprüfstand in Form von Bremsversuchen durchgeführt.

Die Bremsversuche wurden unter Variation der folgenden Betriebsparameter durchgeführt:

Radlast:	1500 2500 3500 4500 N
Innendruck:	1,5 2,5 3,5 4,5 bar
Geschwindigkeit:	60 80 100 120 km/h
Wasserfilmhöhe:	0,1 0,2 1 2 4 mm
Reifendimensionen:	155/70 13 175/70 13 225/45 ZR 16
Reifenfabrikate:	3 Fabrikate
Profiliefen:	2 5 8 mm
Bremsschlupf:	0-15 %

Fahrbahn-, Luft-, Wassertemperatur:  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Fahrbahn: Asphaltbeton 0/11,  $\mu$ -SRM: 0,6

Auf eine vollständige Parameterkombination wurde verzichtet, da der dadurch verursachte Aufwand (>3500 Parameterkombinationen) unverträglich wäre.

Die Untersuchung ist in verschiedene Versuchsläufe gegliedert, bei denen ausgewählte Parameter miteinander kombiniert wurden, um deren Einfluß auf die Kraftschlußkurven bei Nässe möglichst vollständig abzubilden. Die Versuchsläufe wurden so gestaltet, daß auch gegenseitige Abhängigkeiten der einzelnen Parameter untereinander untersucht werden konnten. Das vollständige Versuchsprogramm ist auf den nachfolgenden Seiten dargestellt. Die in den einzelnen Kästen aufgeführten Parameter wurden in dem jeweiligen Versuchslauf vollständig miteinander kombiniert (Bild 3.1 bis 3.4).

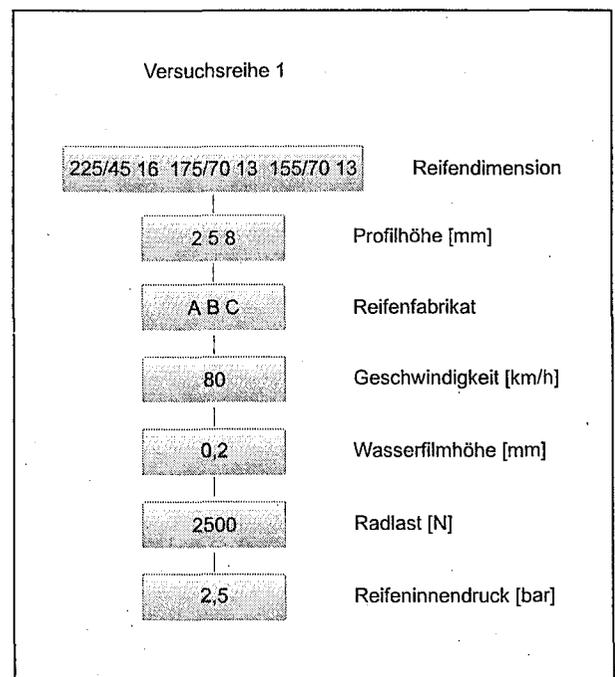


Bild 3.1: Versuchsreihe 1

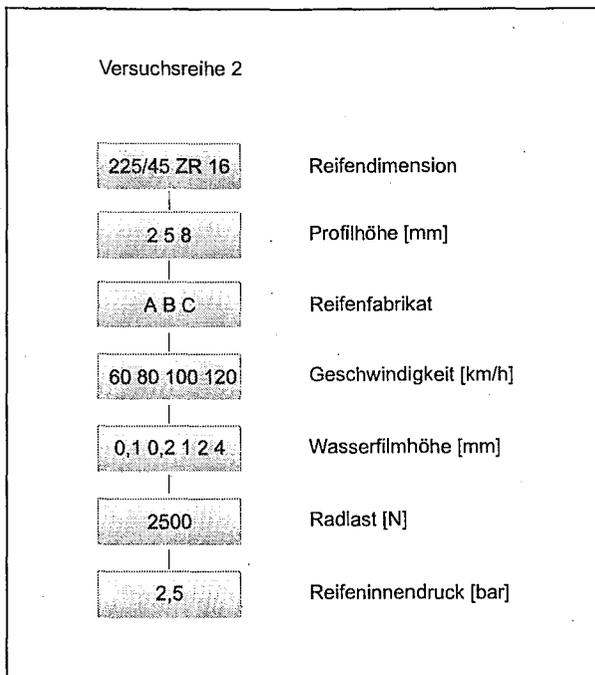


Bild 3.2: Versuchsreihe 2

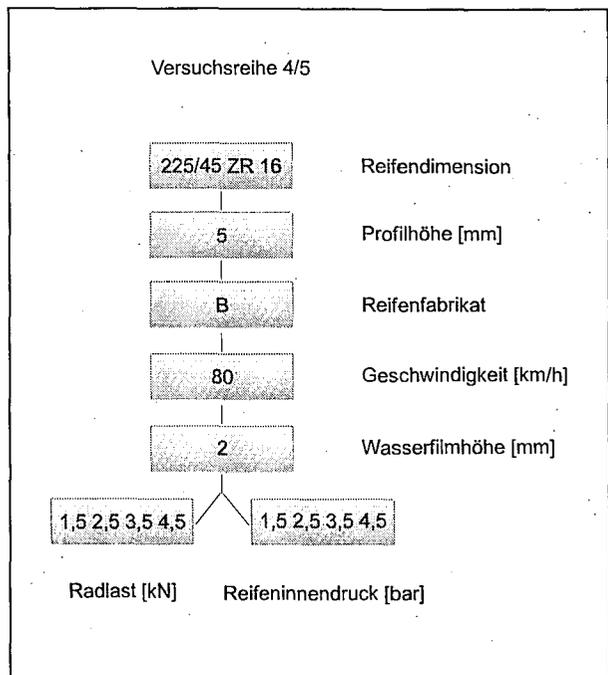


Bild 3.4: Versuchsreihe 4/5

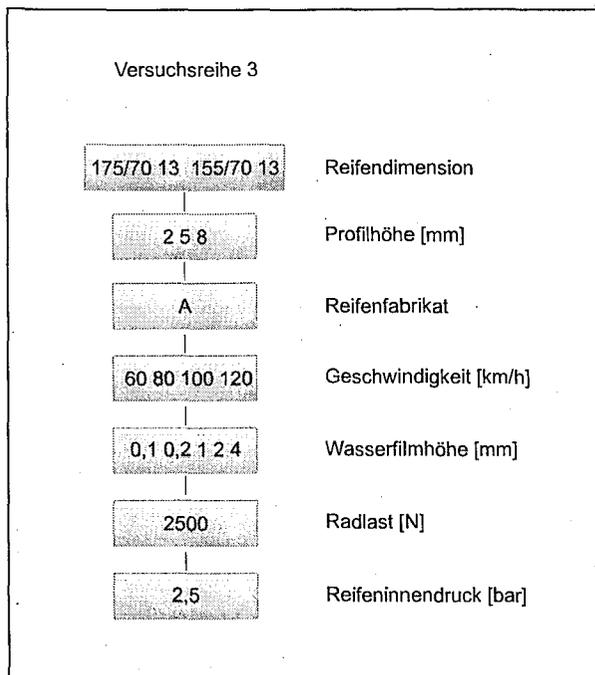


Bild 3.3: Versuchsreihe 3

## 3.2 Versuchsablauf

### 3.2.1 Fahrbahnzustand

Die Rauigkeit der Fahrbahn hat insbesondere bei Nässe einen sehr großen Einfluß auf die Kraftschlußmessungen. Dieser Einfluß kann um ein vielfaches größer sein, als die Änderungen, die von den Umgebungsparametern hervorgerufen werden.

Der Reifen, der auf der Innenseite der Prüfstandstrommel abrollt, poliert die dort befindliche Prüfstandsfahrbahn während er zur Aufnahme der  $\mu$ -Schlupf Kurve abgebremst wird.

Ein Bremsversuch erstreckt sich in Abhängigkeit von dem angestrebtem Schlupfmaximalwert und der Geschwindigkeit über einen Zeitraum von ca. 120 Trommelumdrehungen. Dabei belastet der Reifen prinzipbedingt immer die gleiche Spur auf der Prüfstandsfahrbahn. Durch dieses wiederholte Bremsen auf immer der gleichen Stelle wird die Prüfstandsfahrbahn poliert und verliert an Griffigkeit. Von Versuch zu Versuch fallen so die Griffigkeitsmaximalwerte der  $\mu$ -Schlupf Kurven bis zu einem Minimalwert, der eine äußerst glatte bzw. wenig griffige Fahrbahn darstellt.

Wird diesem Effekt nicht entgegen gewirkt, so sinken die Kraftschlußwerte auf der Prüfstandsfahrbahn immer weiter und die ermittelten Ergebnisse

von aufeinander folgenden Versuchen können nicht miteinander verglichen werden.

Der Abfall der Griffigkeit kann dabei vom Betrag größer sein, als der Einfluß des variierten Parameters, der eigentlich untersucht werden soll.

Um im Innentrommelprüfstand IPS reproduzierbare Ergebnisse von Kraftschlußmessungen durchführen zu können, muß ein Verfahren angewendet werden, das es ermöglicht, den Poliereffekt zu kompensieren oder nachträglich aus den Meßergebnissen herauszurechnen.

Die zweite Möglichkeit scheidet aus, da sich nicht nur die Höhe des Kraftschlußmaximum im Zusammenhang mit der Polierwirkung ändert, sondern auch die Steigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve im Anfangsbereich kleiner Schlupfwerte, sowie der Schlupfwert, bei dem der Maximalwert der Umfangskraft auftritt. Dieser verschiebt sich mit zunehmender Polierwirkung hin zu höheren Schlupfwerten.

Dieser Effekt deutet darauf hin, daß das Polieren der Fahrbahn und damit der Verlust an Mikrorauhigkeit die Reibung zwischen Straße und Gummi grundlegend beeinflusst und nicht nur ein einfaches Absinken des Kraftschlußniveaus darstellt, das mathematisch korrigiert werden könnte.

Es bleibt also nur die erste Möglichkeit, die Polierwirkung selbst direkt nach oder während der Messung zu beeinflussen.

Zum Aufrauen nach einem Versuch bzw. einer Versuchsreihe wurde bisher ein Spikes-Reifen benutzt, der unter geringem Drehmoment auf der Prüfstands-fahrbahn gefahren wurde und diese durch die abrasive Wirkung seiner Metallspikes aufraute.

Dieses Verfahren zur Wiederherstellung der Mikrorauhigkeit und damit der Griffigkeit der Fahrbahn hat allerdings den Nachteil, daß es sehr zeintensiv ist, da der Reifen gewechselt werden muß und außerdem nicht kontinuierlich arbeitet, also nicht während der eigentlichen Versuchsdurchführung eingesetzt werden kann, sondern nur zwischen zwei Versuchsläufen.

Die Kontrolle des Aufrauhergebnisses mit Hilfe eines Referenzreifens und die dann eventuell erforderliche Nacharbeit und erneute Kontrolle steigern den ohnehin schon hohen erforderlichen Zeitaufwand auf ein nicht mehr akzeptables Maß.

Damit ein kontinuierlicher Ablauf der Versuche möglich ist und die Ergebnisse die erwünschte Reproduziergenauigkeit aufweisen, mußte ein neues Verfahren zur Wiederherstellung der Mi-

krorauhigkeit der Prüfstands-fahrbahn gefunden und entwickelt werden. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen eines gesonderten Forschungsprojekts [FACH, 1995] verschiedene Möglichkeiten zum mechanischen Aufrauen der Fahrbahn erprobt. (theoretisch wären auch chemische Verfahren möglich). Als beste Lösung erwies sich das Aufrauen der Fahrbahn mit Hilfe einer Hartmetallkette. Dabei wird die Kette über eine einstellbare Vorrichtung so mit dem Prüfstand verbunden, daß sie in ihrer Länge einstellbar auf der vorbeiroutierenden Fahrbahn schleift. Die Aufrauwirkung beruht darauf, daß die gehärteten Kettenglieder durch die Relativbewegung der Fahrbahn auf den Asphalt schlagen bzw. schleifen und damit die Mikrorauhigkeit seiner Oberfläche erhöhen.

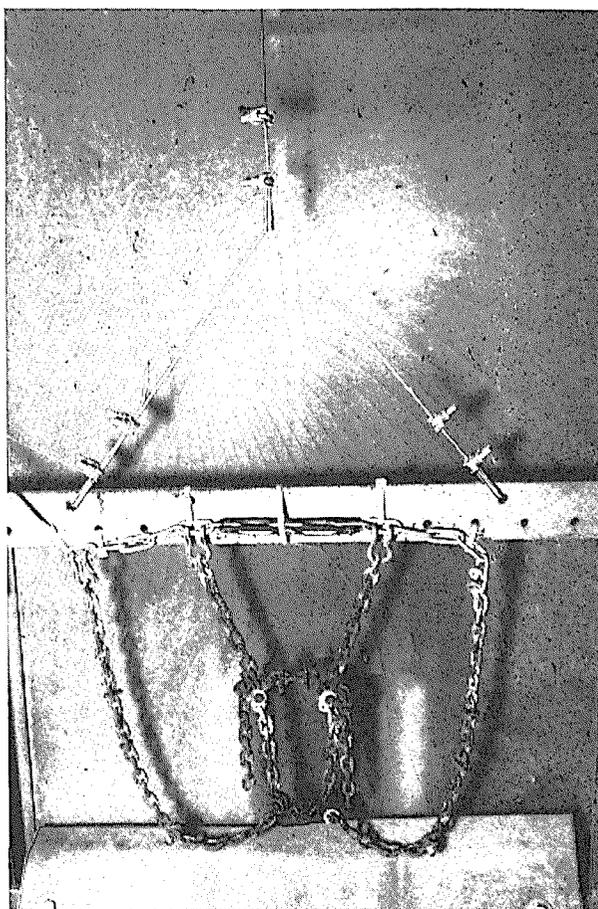


Bild 3.5: Aufrauheinrichtung Prüfstand IPS

Bild 3.5 zeigt die im Prüfstand montierte Aufrauheinrichtung. Man erkennt die Kette, die aus den gehärteten Segmenten einer Pkw-Schneekette besteht und den Schieberahmen, an dem sie montiert ist. Der Rahmen dient dazu, die Länge des Teils der Kette zu variieren, der auf der Fahrbahn schleift. Das System ist von außen über ein Zugseil bedienbar.

Der Versuchsreifen kann dabei auf der Fahrbahn verbleiben. Es ist also möglich während der Messung ohne Unterbrechung des Versuchsablaufs die Fahrbahn aufzurauen.

Durch geschicktes zeitliches Abstimmen von Polierwirkung durch den Bremsversuch mit dem Versuchsreifen und Aufrauhwirkung durch die Kette ist es möglich einen kontinuierlichen Versuchsablauf darzustellen.

Die Kontrolle des Fahrbahnzustandes und damit der Aufrauhwirkung erfolgt durch eine spezielle Vorgehensweise. Zeigen die Ergebnisse von direkt aufeinander folgenden Bremsversuchen mit zwischenzeitlichem Aufrauen gute Übereinstimmung, so kann davon ausgegangen werden, daß die Mikrorauhigkeit weitgehend konstant geblieben ist.

In größeren Zeitabständen können zusätzliche Messungen mit einem Referenzreifen, dessen Eigenschaften bekannt sind, eingeschoben werden, um die Übereinstimmung des Griffigkeitsniveaus mit dem vor Beginn der Messungen definierten Zustand zu überprüfen.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Wirkung des Aufrauerverfahrens am Beispiel von Bremsversuchen, die im IPS einmal mit und einmal ohne den Aufrauemechanismus durchgeführt wurden.

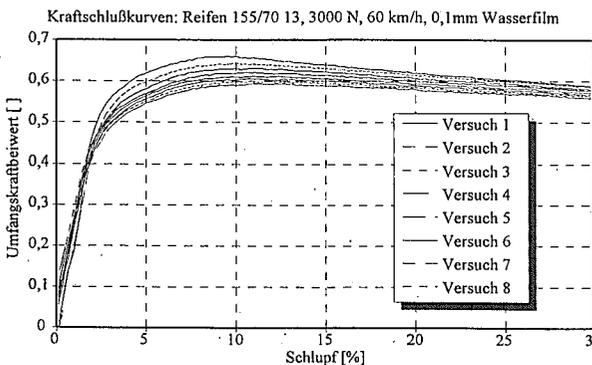


Bild 3.6: Kraftschlußkurven, gemessen ohne Aufrauereinrichtung

In Bild 3.6 kann man erkennen, daß bei der Durchführung von Kraftschlußmessungen ohne Einsatz des Aufrauemechanismus die gemessenen Kraftschlußmaximalwerte immer weiter sinken und die  $\mu$ -Schlupf Kurven immer flacher werden.

Im Gegensatz dazu zeigt Bild 3.7, wie durch die Verwendung der Kette zum Aufrauen der Fahrbahn die Kraftschlußkurven auf konstantem Niveau bleiben. Die gemessenen Kraftschlußmaximalwerte liegen innerhalb einer Bandbreite von  $\pm 2\%$ .

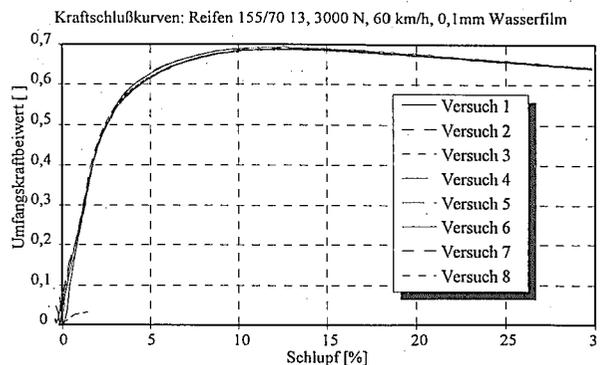


Bild 3.7: Kraftschlußkurven, gemessen mit Aufrauereinrichtung

Zusammenfassend betrachtet ist also gelungen, die Polierwirkung des Versuchsreifens auf einfache Weise zu kompensieren, so daß die Genauigkeit von Kraftschlußuntersuchungen im IPS erheblich gesteigert werden konnte.

Die hier diskutierten Bremsversuche fanden auf einer Fahrbahn statt, die in ihrem Aufbau einem Asphaltbeton 0/11 entspricht.

Die mit einem PIARC Reifen nach einem Verfahren ähnlich dem SRM-Verfahren [FGSV, 1994] ermittelte Griffigkeit lieferte einen Wert von  $\mu=0,62$ .

Dieses Griffigkeitsniveau wurde während der Versuchsreihe mit Hilfe der oben beschriebenen Vorgehensweise weitgehend konstant gehalten und immer wieder kontrolliert (vgl. Kapitel 3.2.2.).

Darüberhinaus spielt neben dem Griffigkeitswert, der nur bei einer Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenkombination ermittelt wird, auch die Textur der Fahrbahnoberfläche eine Rolle.

Die Längs- und Querprofile der Prüfstands-fahrbahn wurden mit Hilfe eines Laserabtastverfahrens im Anschluß an die hier vorgestellten Versuche ermittelt.

Beispielhaft werden an dieser Stelle einzelne Ergebnisse der Längs- und Querprofilvermessung der Prüfstands-fahrbahn vorgestellt.

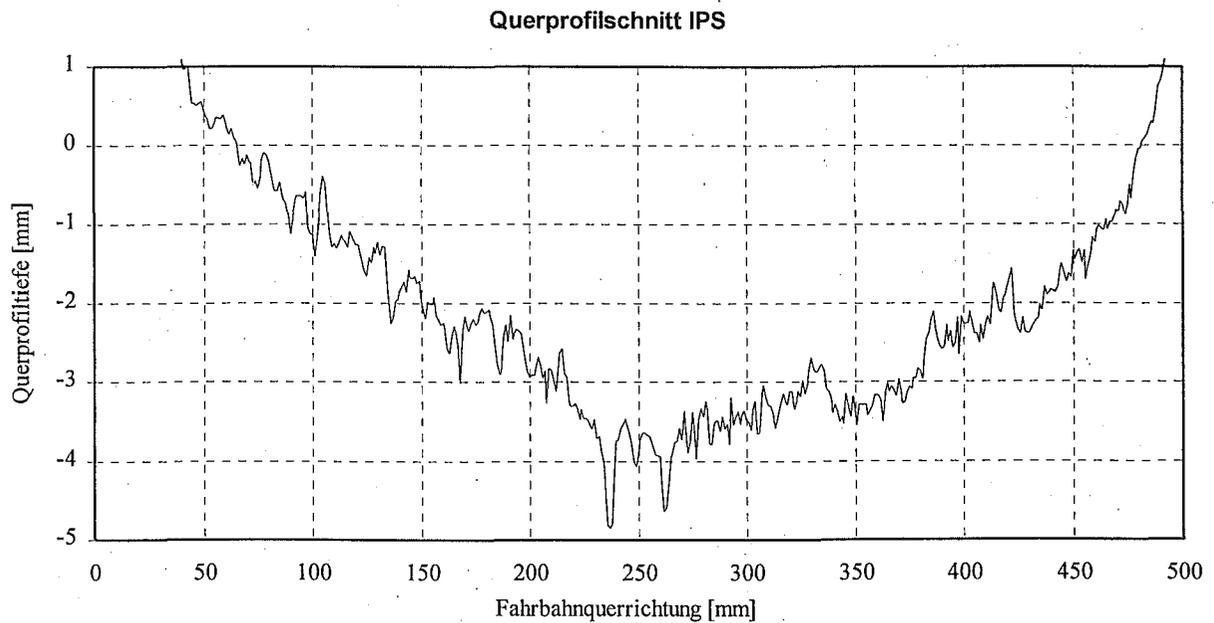
Dabei beziehen sich die gemessenen Verläufe und die daraus ermittelten Rauigkeitswerte auf den Fahrbahnzustand, der während bzw. nach der Durchführung der hier vorgestellten Versuche vorgelegen hat.

Eine Erweiterung der Texturmessungen auf andere Fahrbahnzustände ist angedacht und wird in Zukunft im Rahmen eines gesonderten Forschungsprojekts durchgeführt.

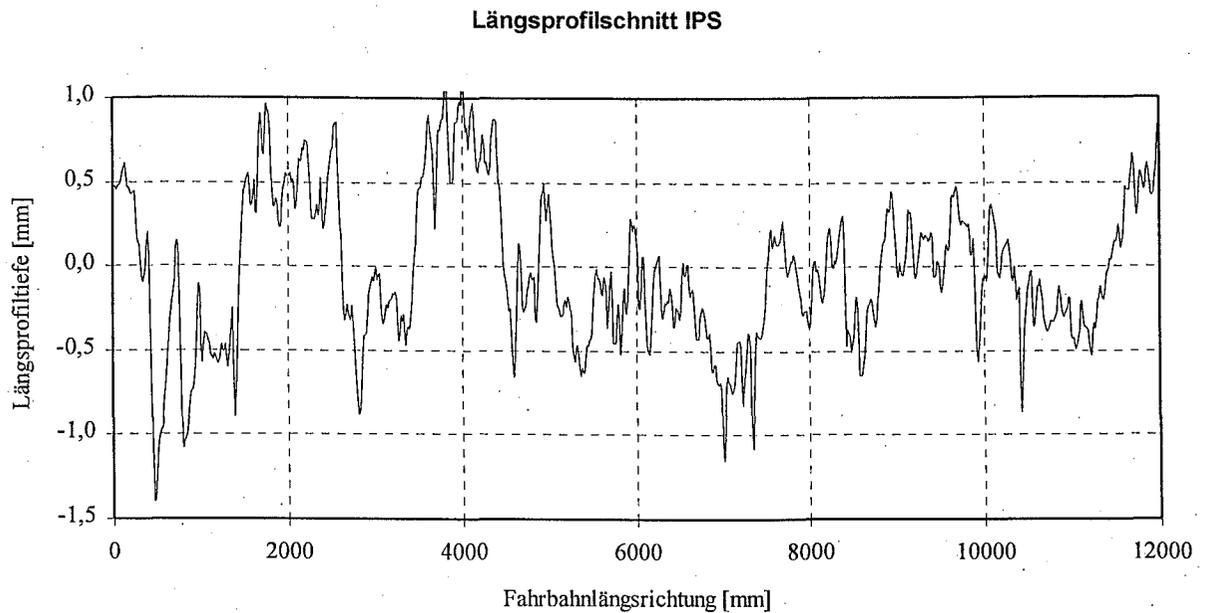
Die Bilder 3.8 und 3.9 zeigen beispielhaft für zwei Meßspuren die Ergebnisse der Lasertexturvermes-

sung. Die Bezeichnung Querprofil gilt für Messungen der Textur quer zur Bewegungsrichtung der Trommel, also über die Breite der Prüfstands-fahrbahn (0,55 m).

Das Längsprofil ist die Abtastung in Bewegungsrichtung der Trommel, also in Umfangsrichtung (12 m).



**Bild 3.8:** Fahrbahntextur, Querprofil



**Bild 3.9:** Fahrbahntextur, Längsprofil

Messungen des Längsprofils fanden in insgesamt 4 Spuren statt. Messungen des Querprofils an 12 verschiedenen Stellen des Trommelumfangs (pro Kassette eine Messung).

Die Bezeichnung der untersuchten Fahrspuren ergibt sich aus folgendem Schema:

- Spur A: Fahrbahnrand
- Spur M: Mitte der Fahrbahn
- Spur H: Mitte der Fahrbahn -50 mm
- Spur V: Mitte der Fahrbahn +50 mm

Die Ergebnisse der Texturauswertung für die verschiedenen Fahrspuren sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die Spalten enthalten die Werte für verschiedene Frequenzbereiche. Die Unterteilung erfolgt in Mega-, Grob-, und Feintextur mit Angabe der entsprechenden Wellenlängenbereiche.

Zusätzlich zu den Laserexturmessungen wurden Messungen mit Hilfe des Sandflächenmeßverfahrens durchgeführt. Dabei wird eine genau definierte Menge Sand durch Verreiben auf der Fahrbahnoberfläche gleichmäßig verteilt und die entstehende Sandfläche vermessen. Die Größe der Sandfläche liefert dann eine Information über die vorhandene mittlere Rauhtiefe. Messungen dieser Art wurden in den vier oben bezeichneten Spuren im Abstand von jeweils 50 mm in Umfangsrichtung durchgeführt. Die Mittelwerte der Meßergebnisse aus den 240 Einzelmessungen sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Die Ergebnisse der beiden verschiedenen Meßverfahren zeigen eine gute Übereinstimmung.

Spur	R <sub>tm</sub> [mm]
A	0,4
H	0,555
M	0,623
V	0,551

Tab. 3.2: Mittlere Rauhtiefe IPS, Sandflächenmessung

Die Lasertexturmessungen zeigen zunächst, daß die Fahrbahn in Querrichtung relativ uneben ist. Durch das Einschleifen einer Rinne in die Fahrbahn ergibt sich vom Fahrbahnrand bis zur Mitte ein Höhenunterschied von ca. 5 mm. Im Bereich der Fahrbahnmitte (Meßbereich für die Aquaplaningmessungen) ist die Fahrbahn jedoch ausreichend eben. In Längsrichtung ist die Prüfstandsfahrbahn innerhalb der jeweiligen Fahrspuren mit einem Höhenunterschied von ca. 2 mm ebenfalls relativ eben.

Die Analyse der Texturmessungen im Frequenzbereich bzw. die Auswertung der Sandflächenmessungen zeigen für die Rauigkeit, daß die Prüfstandsfahrbahn in der Mitte die höchsten Rauigkeitswerte aufweist. Die Spur A wird weder vom Versuchsreifen, noch von der Aufrauheinrichtung beeinflusst und liefert daher die niedrigsten Rauigkeitswerte in allen Wellenlängenbereichen.

Die beiden äußeren Fahrspuren H und V liefern ebenfalls niedrigere Werte für die Textur als die mittlere Spur. Dies ist bemerkenswert, da die mittlere Spur niedrigere Griffigkeitswerte aufweist, als die beiden äußeren Meßspuren.

RMS- Werte [mm]			
Spur	Mega-Textur 100-500 mm	Grob-Textur 10-100 mm	Fein-Textur 0,6-10 mm
A	0,15	0,167	0,094
H	0,194	0,243	0,168
M	0,208	0,273	0,186
V	0,163	0,229	0,173

Tab. 3.1: Texturwerte IPS

Eine Erklärung dafür kann sein, daß die Kette, die zum Aufrauhnen der Fahrbahn eingesetzt wird, vor allem in der Fahrbahnmitte stark aufrauhnt und sich dadurch dort die höchsten Rauheitswerte finden.

Die griffigkeitsrelevante Mikrorauhigkeit im Bereich von 0,1 mm Wellenlänge und darunter kann das hier verwendete Laserverfahren nicht auflösen. Es ist aber anzunehmen, daß die beiden äußeren Spuren eine höhere Mikrorauhigkeit aufweisen, da dort weniger Versuche gefahren wurden und daher eine geringere Polierwirkung durch Versuchsreifen stattgefunden hat.

Die mittlere Spur hat also, obwohl durch den Aufrauhmechanismus eine größere Makrorauhigkeit vorhanden ist, eine niedrigere Mikrorauhigkeit durch die Polierwirkung der Versuchsreifen und daher auch eine niedrigere Griffigkeit.

Die Ergebnisse der Texturmessungen zeigen, daß es nicht ohne weiteres möglich ist von der Makrorauhigkeit einer Oberfläche auf die Griffigkeit zu schließen. Unter ungünstigen Umständen kann es vorkommen, daß eine Oberfläche mit relativ hohen Werten für die Textur im Bereich von 0,6-10 mm Wellenlänge und darüber, kleine Werte für die Mikrorauhigkeit aufweist und deshalb über eine niedrige Griffigkeit verfügt.

Eine genauere Aussage über den Zusammenhang zwischen Mikrorauhigkeit kann an dieser Stelle nicht getroffen werden, dieses Thema ist Gegenstand aktueller Forschung. Schwerpunkt ist dabei der Einfluß der Polierwirkung der Versuchsreifen auf die Fahrbahntextur sowie die entsprechende Aufrauhwirkung der Kette.

Dies dient dazu, den Zusammenhang zwischen Oberflächentextur und Nassgriff näher zu untersuchen und die vorhandenen Abhängigkeiten zu ermitteln. Darunter fällt insbesondere die Abhängigkeit des Kraftschlußbeiwerts von der Fahrgeschwindigkeit, die stark von der Oberflächentextur der Fahrbahn beeinflusst wird.

### 3.2.2 Referenzmessungen, Referenzmodell

Die Untersuchungen zum Aquaplaningverhalten verschiedener Pkw-Reifen fanden nach einer hierfür speziell entwickelten Vorgehensweise statt. Dabei haben Referenzmessungen bzw. das dafür verwendete Referenzmodell eine besondere Bedeutung.

In Ergänzung zu dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Aufrauhverfahren erfordert die Untersuchung

von unterschiedlich breiten Reifen eine spezielle Handhabung dieses Verfahrens. Die Problematik liegt darin, daß die Kette immer eine ungefähr gleich breite Spur der Fahrbahn aufrauhnt. Im Versuchsbetrieb wird mit Hilfe der Kette ein Gleichgewicht zwischen Polierwirkung und Aufrauhwirkung erzeugt. Dieses Gleichgewicht stellt sich aber nur in der Fahrspur des Reifens, in der auch gebremst wird, ein. Außerhalb der durch die Reifenbreite begrenzten Fahrspur wird die Fahrbahn nicht poliert, weil der Reifen dort nicht abrollt. Gleichzeitig wird die Fahrbahn in diesem Bereich jedoch durch die Kette aufgeraut.

Dies führt dazu, daß Breitreifen, die im Anschluß an schmalere Reifen untersucht werden im Bereich ihrer Reifenflanken eine griffigere Fahrbahn vorfinden und dadurch „bevorzugt“ werden.

Um das zu verhindern, müssen die Versuchsreifen, ausgehend von der größten Breite in der Reihenfolge fallender Reifenbreiten, untersucht werden.

Dadurch ergibt sich der Versuchsablauf. Die Versuche beginnen mit dem breitesten Reifen, dieser wird bei allen erforderlichen Parameterkombinationen untersucht, bevor der nächste Reifen montiert wird. Sind die Reifen einer Reifenbreite mit jeder Profilhöhe untersucht worden, wird der nächstschmalere Reifen montiert. Dieser läuft dann innerhalb der Fahrspur des vorhergehenden Reifens und findet dadurch innerhalb seiner Latschbreite den gleichen Fahrbahnzustand vor, wie der vorausgegangene Breitreifen.

Damit ist das Problem der Griffigkeitsunterschiede verschieden breiter Reifen für die eigentlichen Versuchsläufe gelöst.

Die oben gemachten Aussagen treffen allerdings auch für Referenzmessungen mit einem speziellen Referenzreifen zu. Dieser hat eine bestimmte Breite mit einer entsprechenden Polierwirkung.

Aus den oben genannten Gründen kann ein Referenzreifen mit einer Breite nicht für die gesamte Untersuchung von unterschiedlich breiten Versuchsreifen für Referenzmessungen des Fahrbahnzustandes verwendet werden. Erforderlich sind mindestens drei Referenzreifen mit den Versuchsreifen entsprechenden Reifenbreiten.

Diese Überlegung führt schnell zu dem Ansatz, der bei der hier diskutierten Untersuchung angewendet wurde.

Es wird kein spezieller Referenzreifen mehr verwendet, sondern eine Vielzahl von Referenzreifen mit unterschiedlichen Breiten. Genauer gesagt wird jeder Versuchsreifen durch Bezug auf ein vorher definiertes Referenzniveau zum Referenzreifen.

Der Ablauf stellt sich dabei wie folgt dar:

Ein vorher ausgewählter Breitreifen (225/45 ZR 16 Hersteller A) wird bei einer bestimmten Parameterkombination im Prüfstand Bremsversuchen unterzogen. Nach mehreren Bremsversuchen und anschließendem Aufrauen ist der Fahrbahnzustand (das Referenzniveau,  $\mu_{\max} = 0,65$ ) definiert.

Nach dem letzten Aufrauen wird einer der Versuchsreifen montiert und dann in der vorher präparierten Fahrspur unter gleichen Umgebungsparametern gebremst. Je nach Reifenbreite wird er dabei in bis zu drei versetzten Spuren gefahren, so daß die gesamte, durch den vorausgegangenen breiten Reifen vorbereitete Spur abgedeckt ist.

Der durch Mittelung aus den drei Bremsversuchen gewonnene  $\mu$ -max Wert, ist dann auf das durch den ersten Reifen definierte Fahrbahnniveau bezogen und wird später als das Referenzniveau des betreffenden Reifens verwendet, um den momentanen Fahrbahnzustand zu kontrollieren.

Während der Messungen mit dem Versuchsreifen wird die Fahrbahn nicht aufgeraut, erst nachdem die drei „Referenzniveaumessungen“ durchgeführt worden sind, wird die Fahrbahn mit Hilfe der Aufrauhkette und dem vorher eingesetzten Breitreifen wieder auf das Ausgangsniveau eingestellt.

Auf diese Art werden alle Versuchsreifen untersucht und ihr Kraftschlußniveau wird auf das durch den oben erwähnten Breitreifen definierten Fahrbahnniveau bezogen.

Dadurch ist für jeden Versuchsreifen ein Kraftschlußmaximalwert bekannt, der bei einer bestimmten Parameterkombination erreicht werden muß, wenn der Fahrbahnzustand konstant geblieben sein soll.

Während der Untersuchung konnte so zu jedem beliebigen Zeitpunkt unter Verwendung eines beliebigen Versuchsreifens das Kraftschlußniveau der Fahrbahn überprüft werden. Dazu mußte nur die vorher definierte Parameterkombination eingestellt und ein Bremsversuch durchgeführt werden. Entsprechend der gemessene Wert dem vorher als Referenzniveau definierten, so konnte davon ausgegangen werden, daß sich die Griffigkeit der Fahrbahn nicht geändert hat.

Tabelle 3.3 enthält die Standardparameterkombination, bei der die Referenzmessungen durchgeführt wurden.

Radlast:	2500 N
Innendruck:	2,5 bar
Geschwindigkeit:	80 km/h
Wasserfilmhöhe:	0,2 mm
Bremsschlupf:	0-15 %
Fahrbahn-, Luft-, Wassertemperatur:	20 °C
Referenzniveau Fahrbahn:	

Reifen 225/45 16, Hersteller A,  $\mu_{\max} = 0,65$   
 $\approx \mu_{SRM} = 0,62$

Tab. 3.3: Standardparameter Referenzmessungen

Für die eigentlichen Versuchsläufe wurde ebenfalls eine spezielle Vorgehensweise angewendet:

Wie bereits oben beschrieben, wird jeder Reifen nacheinander allen Parameterkombinationen unterzogen, bevor wieder ein Reifenwechsel erfolgt.

Um den Reifen- und Fahrbahnverschleiß möglichst gering zu halten, wird dabei für jede Parameterkombination nur ein Bremsversuch durchgeführt. Danach erfolgt das Aufrauen, wobei das für den jeweiligen Reifen erforderliche Maß vorher ermittelt worden ist. Anschließend wird die nächste Parameterkombination eingestellt.

Zwischenzeitlich wird der Fahrbahnzustand immer wieder mit Referenzmessungen überprüft, wobei wie oben beschrieben, nur die Referenzparameterkombination eingestellt werden muß. Ein Aufwärmen des Reifens in einer separaten Fahrspur ist nur zu Beginn einer Versuchsreihe notwendig, später ist der Reifen andauernd im Betrieb und benötigt kein spezielles Aufwärmen mehr.

Auf mehrere Bremsversuche bei einer Parameterkombination wurde verzichtet. Diese dienen normalerweise dazu, das richtige Maß für das Aufrauen der Fahrbahn zu finden und den Fahrbahnzustand wieder exakt einzustellen. Statt dessen erfolgt nur ein Bremsversuch mit anschließendem Aufrauen, dabei wird immer um das gleiche Maß aufgeraut. Die Überprüfung des richtigen Fahrbahnzustand erfolgt nur durch Referenzmessungen in größeren Abständen und durch den Vergleich der Meßwerte in Abhängigkeit von den durchgeführten Parameterkombinationen.

Da die Referenzmessungen nicht mit einem bestimmten Referenzreifen erfolgten, sondern mit vielen verschiedenen Reifen, die vorher auf ein bestimmtes Referenzniveau bezogen worden sind, ist der Begriff „Referenzmodell“ zutreffender als der Begriff „Referenzmessungen“.

Die Genauigkeit der Einzelmessung ergibt sich somit aus dem Referenzmodell, also aus den Referenzmessungen in Kombination mit den Ergebnissen der eigentlichen Versuchsläufe.

Die Referenzmessungen mit den jeweiligen Versuchsreifen sind in Form von  $\mu$ -Schlupf Kurven im Anhang dieses Berichts dargestellt (Kapitel 8.2.1)

### 3.2.3 Versuchssteuerung

Der Ablauf eines Bremsversuchs ist, abgesehen von den oben angesprochenen Randbedingungen, weitgehend automatisiert. Die Vorgabe der Schlupfwerte an die Prüfstandelektronik und die Regelung des Wasserfilms sowie die Erfassung und Speicherung aller Meßgrößen werden von einem PC mit entsprechender Meßdatenerfassungssoftware ausgeführt [SCHUSTER, 1992].

Nach der Kalibrierung des dynamischen Reifenhalmessers mit Hilfe der Radumfangkraftmessung des Prüfstands wird der Versuch am PC gestartet. Dieser steuert den Versuch bis zum vorgegebenen Schlupfwert, oder bis zum Versuchsabbruch per Hand.

Im Anschluß an die Messung wird die berechnete  $\mu$ -Schlupf Kurve grafisch dargestellt, gespeichert und kann ausgedruckt werden.

Mit Hilfe dieses „vorläufigen Versuchsergebnisses“ kann die Messung auf Qualität und Plausibilität überprüft werden, um zu entscheiden, ob noch weitere Versuche folgen müssen.

Dabei muß entschieden werden, ob das der Messung vorausgegangene Aufrauen der Fahrbahn ausgereicht hat, die Polierwirkung des Reifens auszugleichen.

Die gesamte Versuchsdurchführung ist also ein komplexes Verfahren, in dem exakte Meßtechnik mit der Beurteilung auf Grund von Erfahrungswerten kombiniert wird, um eine möglichst hohe Reproduziergenauigkeit zu erhalten.

## 4 Kraftschluß bei Nässe, Aquaplaning, theoretische Grundlagen

Kraftschluß ist die Bezeichnung für die in der etwa poskartengroßen Reifenaufstandsfläche (Reifenlatsch) tangential zur Fahrbahnoberfläche übertragenen Kräfte. Je nach Richtung werden diese Kräfte als Antriebskräfte (in Fahrtrichtung), Brems-

kräfte (entgegen der Fahrtrichtung), oder Seitenführungskräfte (quer zur Fahrtrichtung) bezeichnet. Die auf die Vertikalkraft (Radlast) bezogene Umfangskraft wird Kraftschlußbeiwert genannt. Er ist dimensionslos.

Der für die Übertragung von Antriebs- Brems- und Seitenkräften zur Verfügung stehende Kraftschluß wird durch das Vorhandensein eines Mediums zwischen dem Reifen und der Fahrbahn, z.B.: Wasser, erheblich reduziert. Die Ursache dafür liegt in den spezifischen Gesetzen der Gummireibung. Nach [EULER, 1989] ist das Unfallrisiko auf regennasser Straße mindestens doppelt so hoch wie bei Trockenheit, d. h. der Anteil der Unfällen bei Regen ist erheblich höher als der zeitliche Anteil des Zustands nasse Fahrbahn.

Die Gummireibung kann durch das Wirken von zwei unterschiedlichen Mechanismen erklärt werden [MITSCHE, 1982].

a.) Adhäsionskomponente: Durch hohe Normaldrücke zwischen Gummi und den einzelnen Rauheitserhebungen der Fahrbahn wirken Molekularkräfte, deren horizontale Komponenten den Kraftschluß bestimmen.

b.) Hysterese Komponente: Durch Gleiten über die Rauheiten der Fahrbahnoberfläche wird Energie durch den Unterschied zwischen der dabei wirkenden Kompressions- und Expansionsphase verbraucht.

Das Zwischenmedium Wasser führt dazu, daß sich weniger Bindungen auf molekularer Ebene zwischen Gummi und Fahrbahn ausbilden können, die Adhäsionskomponente der Gummireibung sinkt. Der Kraftschluß auf nasser Fahrbahn wird also vor allem durch die Hysterese Komponente bestimmt und diese wiederum wird sehr stark von der Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche beeinflusst.

Die Profilstaltung und Breite des Reifens, die Höhe des Wasserfilms auf der Fahrbahn und die Fahrgeschwindigkeit haben wegen den im Reifenlatsch herrschenden Strömungsverhältnissen einen großen Einfluß auf den Kraftschluß bei Nässe.

Um einen ausreichenden Kraftschluß zur Straße aufbauen zu können, muß der Reifen im Einlaufbereich das Wasser in der zur Verfügung stehenden Zeit (bei 100 km/h Fahrgeschwindigkeit lediglich wenigen tausendstel Sekunden) unter den Profilstollen verdrängen und in den Profillillen aufnehmen bzw. zur Seite abführen. Dies gelingt um so unvollständiger, je höher der Wasserfilm und die Fahrgeschwindigkeit sind, aber auch je kleiner die Rillenquerschnitte (z.B.: bei abgefahretem Profil)

und je länger die erforderlichen Strömungswege zur Seite sind (z.B.: bei Breitreifen).

Die im Reifenlatsch herrschenden Verhältnisse unter Aquaplaningbedingungen sind in Bild 4.1 dargestellt. Das dort dargestellte Modell [GNADLER] unterteilt die Kontaktfläche des rollenden Reifens (Reifenlatsch) in drei Zonen.

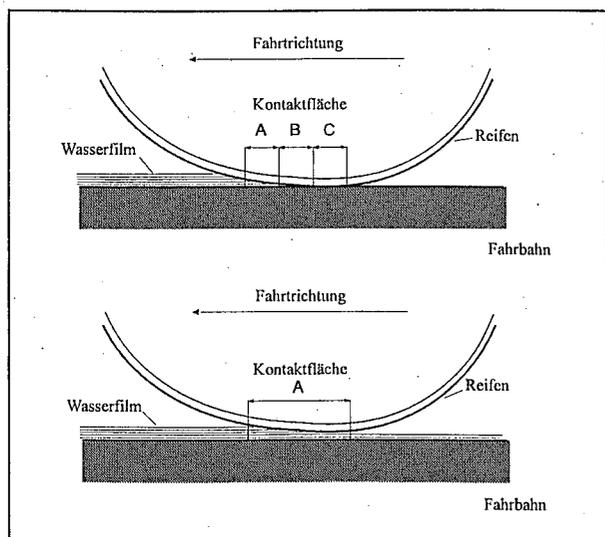


Bild 4.1: Reifenaufstandsfläche bei Nässe

Die obere Abbildung zeigt den Reifen auf nasser Fahrbahn bei noch vorhandenem Fahrbahnkontakt. In der Einlaufzone A hat der Reifen keinen Fahrbahnkontakt. Die Profilrillen haben hier das verdrängte Wasser noch nicht vollständig aufnehmen können. Das unter den Profilstollen verbliebene Wasser bildet im Einlaufbereich des Reifens einen Keil aus und hebt die Reifenkontur in diesem Bereich von der Fahrbahn ab.

In der Übergangszonen B ist der Wasserfilm schon teilweise durchbrochen. Einige Profilstollen berühren die Fahrbahn bereits, während andere noch durch den Wasserfilm von der Straßenoberfläche getrennt sind.

In der Kontaktzonen C ist es dem Reifen gelungen, das Wasser unter den Profilstollen vollständig zu verdrängen, so daß der Reifen hier Fahrbahnkontakt hat, der zur Kraftübertragung genutzt werden kann.

Wird die Fahrgeschwindigkeit gesteigert, oder der Wasserfilm erhöht bzw. das Drainagevermögen des Reifens vermindert (geringere Profilhöhe), so gelingt es dem Reifen immer weniger, das Wasser aus der Latschfläche zu verdrängen.

Die Zone A dehnt sich dann immer weiter in Richtung der Zonen B und C aus, bis schließlich die Verhältnisse der unteren Abbildung herrschen. Der Reifen ist vollständig aufgeschwommen.

In diesem Zustand kann der Reifen keine Kraft mehr auf die Fahrbahn übertragen.

Besonders gefährlich ist dabei die Tatsache, daß der Fahrer eines Kraftfahrzeugs auf nasser Straße von der fortschreitenden Ausdehnung der Zone A, in der der Reifen aufgeschwommen ist, nichts bemerkt. Erst bei Inanspruchnahme des Kraftschlusses durch ein Brems- oder Lenkmanöver kommt es dann zu einem plötzlichen Überschreiten des momentan herrschenden Kraftschlußpotentials und damit zu einer nicht mehr kontrollierbaren Fahrsituation.

## 5 Versuchsergebnisse

### 5.1 Kenngrößen der Auswertung

Die Kenngrößen, die aus den gemessenen Kraftschlußkurven zur Auswertung herangezogen wurden, sind in Bild 5.1 dargestellt.

Die Größen bedeuten im einzelnen:

Die Anfangssteigung  $\delta\mu/\delta s$  charakterisiert den Verlauf der  $\mu$ -Schlupf Kurve für kleine Schlupfwerte.

Der Kraftschlußmaximalwert  $\mu$ -max ist der höchste Kraftschlußbeiwert, den die  $\mu$ -Schlupf Kurve erreicht hat (optimaler Betriebspunkt für ein ABS).

Der Schlupfwert, bei dem dieser Kraftschlußmaximalwert auftritt wird als Lage des  $\mu$ -max Werts bezeichnet.

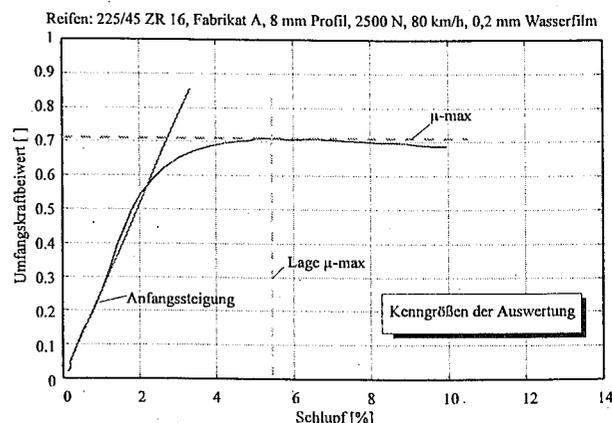


Bild 5.1: Kraftschlußkurve, Kenngrößen der Auswertung

Die Darstellung der Meßergebnisse im folgenden Teil des Berichts beschränkt sich hauptsächlich auf die Kraftschlußmaximalwerte der jeweiligen Kraftschlußkurven. Die Anfangssteigung und die Lage des  $\mu$ -max Wertes werden in einem gesonderten Kapitel betrachtet (Kapitel 5.7, Korrelationen).

## 5.2 Einfluß von Radlast und Reifeninnendruck

Bild 5.2 zeigt den Einfluß der Radlast auf die Kraftschlußkurven eines Versuchsreifens. Mit steigender Radlast steigt das Niveau der  $\mu$ -Schlupf Kurven fast linear an. Höhere Radlasten bewirken, daß der Reifen das Wasser besser verdrängen kann. Der sich durch die Fahrgeschwindigkeit ausbildende Wasserkeil, der den Reifen anzuheben versucht kann weniger weit in die Reifenaufstandsfläche eindringen. Dadurch steigen Umfangskraftbeiwerte an. Dies gilt vor allem für einen Betriebsbereich, in dem schon teilweises Aufschwimmen des Reifens herrscht. Unter weniger kritischen Umgebungsbedingungen, z. B.: bei niedrigen Wasserfilmhöhen oder geringen Geschwindigkeiten, hat die Radlast kaum einen Einfluß auf den zur Verfügung stehenden Kraftschluß.

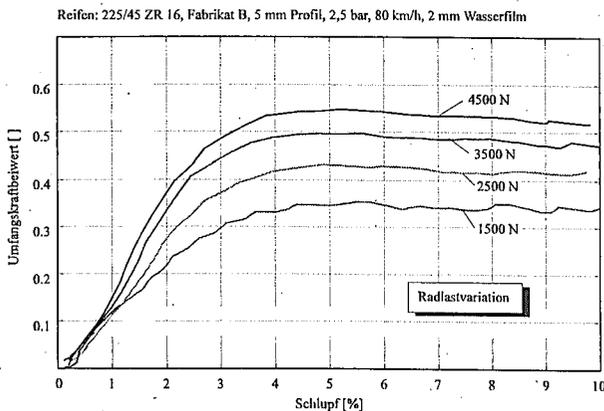


Bild 5.2: Kraftschlußkurven, Radlastvariation

Bild 5.3 zeigt den Einfluß des Reifeninnendrucks auf die Kraftschlußkurven. Ähnlich wie bei einer Erhöhung der Radlast steigen die übertragbaren Kräfte mit höherem Reifeninnendruck an. Die steigende Flächenpressung im Reifenlatsch begünstigt die Wasserverdrängung. Gleichzeitig verkürzt sich jedoch die Latschfläche [EULER, 1989], so daß ein gegenläufiger Effekt ausgelöst wird, der das Aufschwimmen des Reifens erleichtert.

Es bildet sich dadurch ein Maximum aus, von dem aus eine weitere Steigerung des Reifeninnendrucks keine höheren Kraftschlußbeiwerte mehr hervorruft. Bemerkenswert ist hier der starke Abfall der maximal möglichen Umfangskräfte bei zu niedrigem Reifeninnendruck. Ein zu niedriger Fülldruck stellt also eine nicht zu unterschätzende Gefahr für den Autofahrer dar.

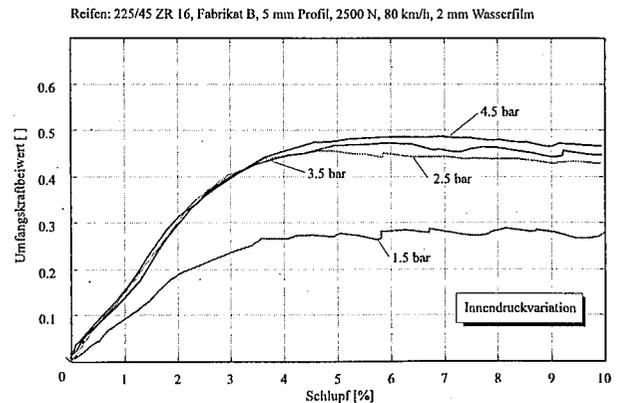
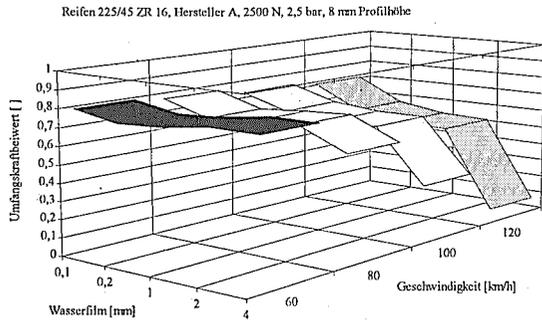


Bild 5.3: Kraftschlußkurven, Reifeninnendruckvariation

## 5.3 Einfluß von Geschwindigkeit und Wasserfilmhöhe

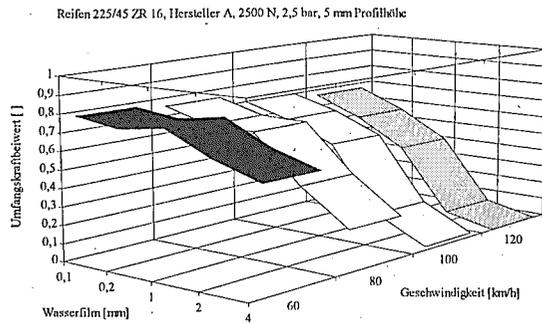
Bild 5.4 stellt die gemessenen Umfangskraftmaximalwerte in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Wasserfilmhöhe dar.

Steigende Geschwindigkeit verringert die maximal übertragbaren Bremskräfte drastisch. Ein steigender Wasserfilm auf der Fahrbahn bewirkt zuerst einen leichten Anstieg der Kraftschlußmaximalwerte, da sich unter günstigen Umständen (niedrige Geschwindigkeit, volle Profilhöhe) der Schwallwiderstand des Reifens und die im Latsch übertragene Bremskräfte zu einem Maximum addieren. Bei höheren Geschwindigkeiten, oder wie sich nachfolgend zeigt, bei nachlassender Profiltiefe, fallen die maximalen Umfangskräfte mit steigendem Wasserfilm rapide ab.

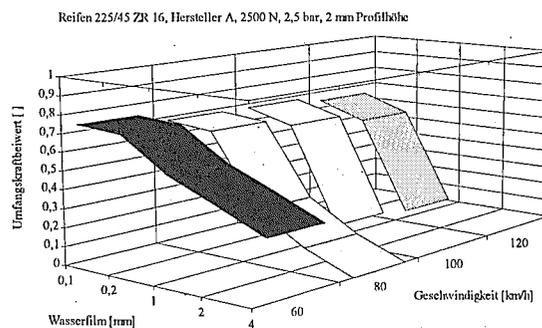


**Bild 5.4:** Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Die Bilder 5.5 und 5.6 zeigen den gleichen Reifen unter Variation der Geschwindigkeit und der Wasserfilmhöhe bei einer Profiltiefe von 5 mm bzw. 2 mm.



**Bild 5.5:** Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

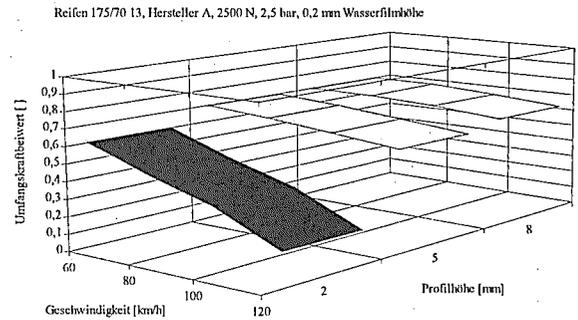


**Bild 5.6:** Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

### 5.4 Einfluß der Profilhöhe

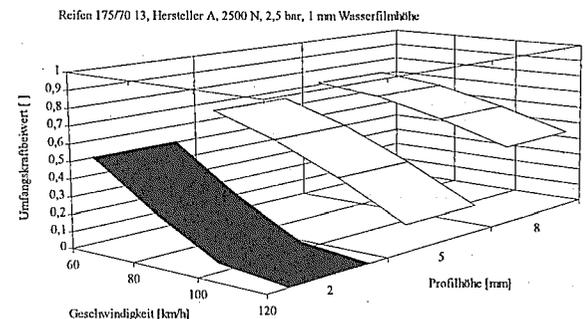
Der Vergleich der Bilder 5.4, 5.5 und 5.6 zeigt den Einfluß der Profiltiefe auf das Aquaplaningverhalten. Mit abnehmender Profiltiefe verstärkt sich die Neigung des Reifens aufzuschwimmen, da dem verdrängten Wasser weniger Raum zum Abfließen zur Verfügung steht.

Wie Bild 5.7 (schmaler Reifen) zeigt, macht sich dieser Effekt bei niedrigen Wasserfilmhöhen und niedrigen Geschwindigkeiten noch nicht sehr stark bemerkbar. Im Zusammenhang mit höheren Geschwindigkeiten und steigendem Wasserfilm führt der Effekt allerdings zu einem krassen Abfall der Kraftschlußbeiwerte (vgl.: Anhang 8.2.5, 8.2.6, 8.2.7, ff)



**Bild 5.7:** Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Profiltiefenvariation

Bild 5.8 zeigt, ebenfalls für den schmalen Reifen, die Verhältnisse bei einer Wasserfilmhöhe von 1 mm. Hier zeigt sich bereits deutlich der negative Einfluß einer niedrigen Profilhöhe auf die maximal übertragbaren Bremskräfte.



**Bild 5.8:** Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Profiltiefenvariation

Dies ist für den Autofahrer besonders gefährlich, da ein abgefahrenere Reifen bei niedrigen Wasserfilmhöhen fast das gleiche Kraftschlußpotential bietet wie ein Neureifen, aber der Abfall der Kraftschlußbeiwerte schon bei leicht erhöhtem Wasserfilm sehr viel drastischer erfolgt als bei voll profiliertem Reifen. Dadurch kann es leicht zu einer Fehleinschätzung der noch vertretbaren Fahrgeschwindigkeit bei Nässe kommen.

## 5.5 Einfluß der Reifenbreite

Der Einfluß der Reifenbreite auf das Kraftschlußverhalten der Versuchsreifen des Herstellers A ist uneinheitlich. Bild 5.9 zeigt die Kraftschlußmaximalwerte von drei unterschiedlich breiten Reifen bei niedriger Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Profiltiefe. Die beiden schmaleren Reifen der Dimension 155 und 175 zeigen hier bei hoher Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn Vorteile gegenüber dem Reifen der Dimension 225. Die Annahme, daß eine breitere Latschfläche die Wasserverdrängung erschwert und dadurch das Aufschwimmen des Reifens begünstigt, findet sich hier bestätigt.

Vergleicht man die drei Reifen bei höheren Geschwindigkeiten und niedrigem Wasserfilm, so zeigen sich umgekehrte Verhältnisse. Steigt die Fahrgeschwindigkeit an, so fällt das Kraftschlußniveau zwar insgesamt ab, der Reifen der Dimension 225 ist aber bei höheren Geschwindigkeiten den beiden schmaleren Reifen überlegen. Bild 5.10 belegt diesen Zusammenhang. Dieser Effekt ist auf die spezielle Profilstellung der hier untersuchten Breitreifen zurückzuführen. Die Optimierung der Profilkonstruktion auf Nassgriff bei höheren Geschwindigkeiten, z.B.: durch laufrichtungsgebundene Profilanordnung, zeigt hier Wirkung.

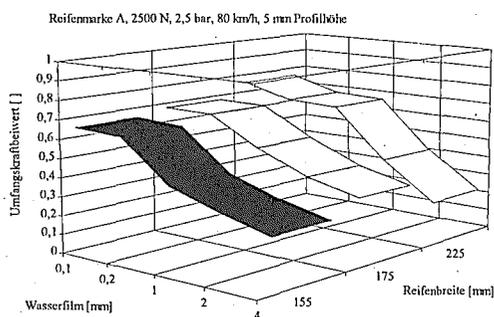


Bild 5.9: Kraftschlußmaximalwerte, Wasserfilm- und Reifenbreitenvariation

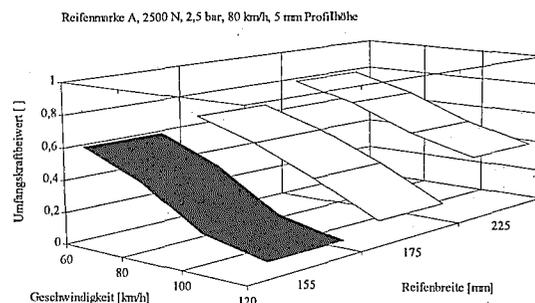


Bild 5.10: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Reifenbreitenvariation

## 5.6 Einfluß der Reifenmarke

Die Bilder 5.11 und 5.12 zeigen die Kraftschlußmaximalwerte von drei Reifen der Dimension 225/45 ZR 16 mit jeweils unterschiedlicher Profilstellung. Im Unterschied zum Reifen des Herstellers B verfügen die Reifen der Hersteller A und C über ein laufrichtungsgebundenes Profil. Die Bilder zeigen, daß die drei unterschiedlich profilierten Reifen in ihrem Kraftschlußverhalten in Abhängigkeit von der Wasserfilmhöhe kaum unterscheiden. Das Kraftschlußniveau insgesamt ist zwar bei den drei Reifenherstellern unterschiedlich hoch, die charakteristischen Änderungen bei Variation der Umgebungsparameter sind jedoch nahezu identisch.

Es kann also davon ausgegangen werden, daß die Eigenschaften von Pkw Serienreifen gleicher Dimension von der Profilstellung weitgehend unabhängig sind. Dies läßt den Schluß zu, daß das Kraftschlußverhalten von Pkw-Reifen bei Nässe vor allem von den übrigen Parametern abhängt und durch diese auch beschrieben werden kann.

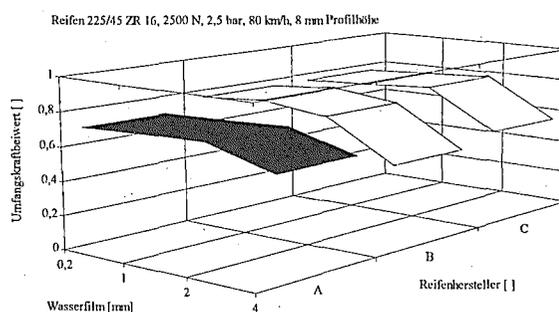


Bild 5.11: Kraftschlußmaximalwerte, Wasserfilmhöhen- und Reifenmarkenvariation

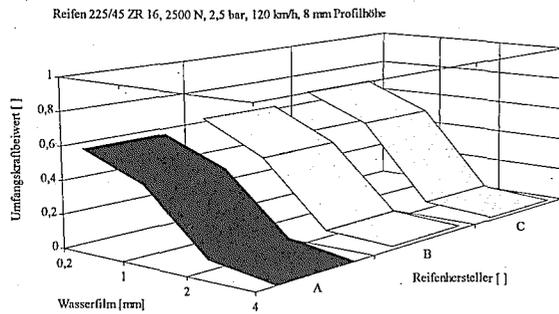


Bild 5.12: Kraftschlußmaximalwerte, Wasserfilmhöhen - und Reifenmarkenvariation

## 5.7 Korrelationen

Neben der Bewertung der Kraftschlußmaximalwerte in Abhängigkeit von den durchgeführten Parametervariationen wurden bei der Auswertung der Versuche auch die Kenngrößen Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve und Lage des Kraftschlußmaximums (Kapitel 5.1) betrachtet.

Die Darstellung der Auswirkungen der durchgeführten Parametervariationen auf diese Kenngrößen würde den Umfang dieser Arbeit sprengen. Der Einfluß der einzelnen Parameter auf die Anfangssteigung und die Lage des Kraftschlußmaximums ist Gegenstand weiterer geplanter Forschungsprojekte.

Es soll jedoch an einigen Beispielen auf die Korrelationsbeziehungen zwischen den drei betrachteten Kenngrößen eingegangen werden. Dazu werden folgende Beziehungen untersucht:

- Lage des Kraftschlußmaximums  $\Leftrightarrow$  Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve
- Lage des Kraftschlußmaximums  $\Leftrightarrow$  Kraftschlußmaximalwert
- Kraftschlußmaximalwert  $\Leftrightarrow$  Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve

Bild 5.13 zeigt den Zusammenhang zwischen der Lage des Kraftschlußmaximums und der Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve.

Aufgetragen ist die Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve, die mit Hilfe einer Polynomregression ermittelt worden ist, über dem Schlupfwert, bei dem das Umfangskraftmaximum aufgetreten ist. Jeder Punkt in dem Diagramm stellt eine Parameterkombination

dar (Geschwindigkeits- bzw. Wasserfilmhöhenvariation). Es sind alle Parameterkombinationen enthalten, die mit dem angegebenen Reifen durchgeführt worden sind.

Man kann erkennen, daß ein Zusammenhang zwischen der Steigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve zu Beginn und dem Schlupfwert, bei dem später das Maximum auftritt, besteht. In dem Diagramm ist die Regressionsgerade der beiden Kenngrößen aufgetragen.

Eine kleine Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve (flacher Verlauf zu Beginn) bedeutet, daß bei niedrigen Umfangskräften schon hohe Schlupfwerte auftreten, dementsprechend wird auch das Maximum der Umfangskraftbeiwerte erst bei höheren Schlupfwerten erreicht. Allerdings ist diese Signifikanz nicht besonders ausgeprägt (Korrelationskoeffizient: 0,7402). Der Vergleich dieser Analyse mit den Werten für die anderen Reifen zeigt, daß deren Korrelation eine ähnliche Signifikanz aufweist.

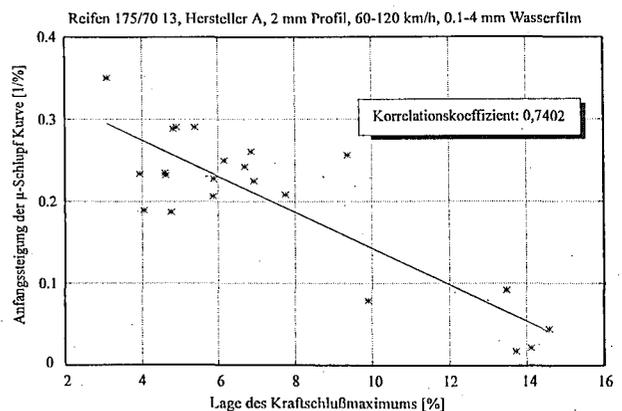


Bild 5.13: Korrelation zwischen Lage des Kraftschlußmaximums und Anfangssteigung

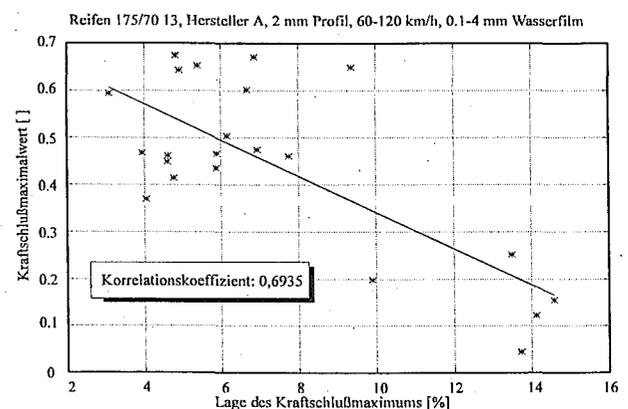


Bild 5.14: Korrelation zwischen Lage und Höhe des Umfangskraftmaximums

Bild 5.14 zeigt die Korrelation zwischen dem Betrag des Umfangskraftmaximums und dem Schlupfwert, bei dem es erreicht wird.

Auch hier entspricht jeder eingetragene Meßpunkt einer Parameterkombination mit dem angegebenen Reifen. Aufgetragen ist dabei das bei der jeweiligen Parameterkombination erreichte Umfangskraftmaximum über dem Schlupfwert, der sich dabei eingestellt hat.

Hier erkennt man, ähnlich wie oben, daß bei ungünstigen Randbedingungen (hoher Wasserfilm, hohe Geschwindigkeiten) die Umfangskraftmaximalwerte sinken und die dabei auftretenden Schlupfwerte steigen. Dies läßt sich dadurch erklären, daß unter Aquaplaningbedingungen die lokalen Gleitvorgänge im Reifenlatsch zunehmen. Folge davon ist, daß das Maximum der Umfangskraftbeiwerte sich in Richtung höherer Schlupfwerte verschiebt und gleichzeitig ein niedrigeres Niveau erreicht.

Die Regressionsanalyse des Zusammenhangs liefert einen Korrelationskoeffizienten von 0,6935. Damit ist die Signifikanz ähnlich ausgeprägt, wie bei dem Zusammenhang zwischen der Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve und der Lage des Umfangskraftmaximums.

In Bild 5.15 ist die Höhe des Umfangskraftmaximums über der Anfangssteigung der dazu gehörenden  $\mu$ -Schlupf Kurve aufgetragen. Jeder Meßpunkt in dem Diagramm steht wieder für eine Parameterkombination. Der verwendete Reifen ist angegeben.

Der hier zu erkennende Zusammenhang ist eindeutig. Niedrige Kraftschlußmaximalwerte, hervorgerufen durch entsprechende Parametereinstellungen (hohe Geschwindigkeiten, hohe Wasserfilmdicken), führen zu einem flacheren Verlauf der  $\mu$ -Schlupf Kurven. Dies zeigt sich schon bei kleinen Umfangskraft- bzw. Schlupfwerten. Diese Beobachtung entspricht der Theorie [DIECKMANN, 1992], nach der sich aus der Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve das Maximum der Kurve extrapolieren läßt. An dieser Stelle kann jedoch nur im Rahmen der hier durchgeführten Parametervariation eine Bewertung dieses Zusammenhangs erfolgen. Andere Einflüsse auf den Zusammenhang zwischen Anfangssteigung und Maximum der  $\mu$ -Schlupf Kurve sind nicht untersucht worden und müssen daher unberücksichtigt bleiben (z.B.: Fahrbahntextur, Temperatur, etc.).

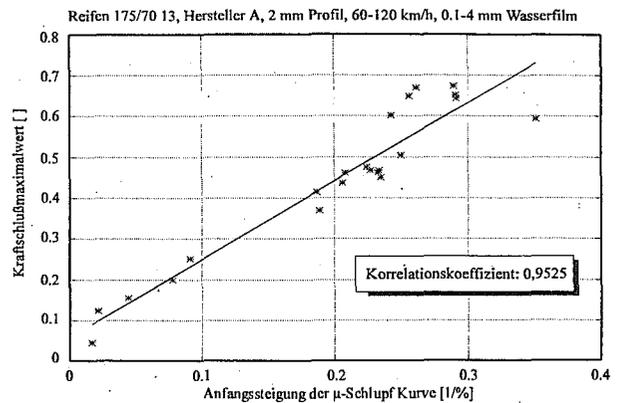


Bild 5.15: Korrelation zwischen Kraftschlußmaximalwert und Anfangssteigung

Bild 5.16 zeigt die gleiche Darstellung für einen anderen Reifen. Die Verhältnisse sind ähnlich, der Korrelationskoeffizient entspricht in etwa dem oben genannten. Es ist aber zu erkennen, daß der Verlauf der Regressionsgerade eine andere Steigung aufweist. Daraus kann geschlossen werden, daß der Zusammenhang zwischen den beiden Kennwerten eine reifenspezifische Größe ist, wobei der breitere Niederquerschnittsreifen erwartungsgemäß steifer in Umfangskrafttrichtung ist.

Die Untersuchung der Korrelationen zwischen den einzelnen Kenngrößen der  $\mu$ -Schlupf Kurven hat gezeigt, daß offensichtlich physikalische Zusammenhänge bestehen, die noch näherer Untersuchung bedürfen. Die Abhängigkeiten der hier diskutierten Kenngrößen von den Eigenschaften der verwendeten Versuchsreifen (Breite, Querschnittsverhältnis, Profilhöhe), von weiteren Umgebungsparametern (Temperatur, Radlast, Reifendruck), werden in einem nachfolgenden Forschungsprojekt untersucht.

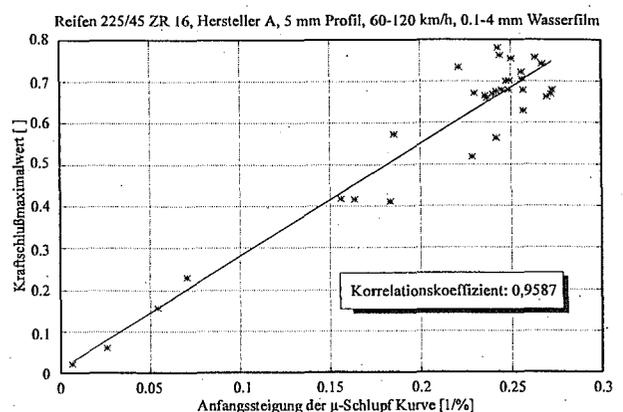


Bild 5.16: Korrelation zwischen Kraftschlußmaximalwert und Anfangssteigung

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Innentrommelprüfstand der Bundesanstalt für Straßenwesen wurden Kraftschlußuntersuchungen von Pkw Reifen unter Variation folgender Betriebsparameter durchgeführt:

- Reifenmarke
- Reifenbreite
- Profiltiefe
- Fahrgeschwindigkeit
- Wasserfilmhöhe
- Radlast
- Reifeninnendruck

Der prinzipielle Einfluß der jeweiligen Parameter auf die gemessenen Kraftschlußkurven läßt sich wie folgt beschreiben:

Steigende Fahrgeschwindigkeit, geringere Profiltiefen und höherer Wasserfilm verringern die maximal übertragbaren Bremskräfte.

Höhere Radlasten verringern die Tendenz des Reifens unter dem Druck des sich ausbildenden Wasserkeils aufzuschwimmen und verbessern dadurch das Kraftschlußverhalten bei Nässe. Ebenso, allerdings betragsmäßig geringer, wirkt sich eine Erhöhung des Reifeninnendrucks aus, wobei aber der gegenläufige Effekt der kürzer werdenden Latschfläche die Neigung des Reifens aufzuschwimmen wieder begünstigt. Hier bildet sich also ein Maximum aus, von dem aus eine weitere Erhöhung des Reifeninnendrucks keinen Vorteil mehr bringt. Niedrige Profilhöhen führen wegen der schlechter werdenden Wasserverdrängung im Reifenlatsch zu einem stärkeren Abfall der Kraftschlußmaximalwerte bei steigender Geschwindigkeit oder höherem Wasserfilm.

Die Untersuchung der drei verschiedenen Reifenbreiten hat unterschiedliche Tendenzen aufgezeigt. Bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten zeigen die schmalen Reifen Vorteile, während bei höheren Fahrgeschwindigkeiten die Breitreifen das - allerdings insgesamt niedrigere - Niveau der schmalen Reifen erreichen, oder sogar übertreffen können.

Die spezielle Optimierung dieser Reifen auf Nassgriff bei höheren Geschwindigkeiten (z.B.: Laufrichtungsgebundenes Profil) zeigt hier Wirkung. Es kann also nicht von einem prinzipiellen Nachteil von Breitreifen auf nasser Fahrbahn ausgegangen

werden, der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit spielt eine große Rolle.

Insgesamt birgt die Kombination von hoher Fahrgeschwindigkeit, niedriger Profiltiefe und hohem Wasserfilm eine extrem hohe Aquaplaninggefahr, die sich noch verstärkt, wenn der korrekte Reifeninnendruck unterschritten wird. Die einzige Maßnahme, die der Fahrzeugführer in dieser Situation ergreifen kann, ist eine drastische Herabsetzung der Fahrgeschwindigkeit auf nasser Fahrbahn.

Der Vergleich der drei Reifenmarken hat gezeigt, daß die Profilstaltung bei Reifen gleicher Breite keine gravierende Auswirkung auf das Kraftschlußverhalten zeigt.

Insbesondere daraus und aus den übrigen Ergebnissen kann abgeleitet werden, daß eine Möglichkeit besteht, das Kraftschlußverhalten von Pkw Reifen in einem empirischen Modell näherungsweise zu beschreiben.

Dabei würden die übrigen oben genannten Größen als Eingangsparameter dienen und das Modell würde als Ergebnis eine Kraftschlußvorhersage (für Bremskräfte, ev. auch für Seitenkräfte) in Abhängigkeit von der jeweilige Parameterkombination liefern.

Um ein solches Modell entwickeln und experimentell absichern zu können, müssen allerdings noch weitere Kombinationen der hier betrachteten Parameter untersucht werden. Darüber hinaus muß der Einfluß von hier nicht berücksichtigten Parametern geklärt werden, darunter fällt insbesondere die Fahrbahntextur, aber auch die Temperatur.

Nicht zuletzt müssen auch andere, das Kraftschlußverhalten des Reifens beschreibende Kenngrößen wie z.B.: Anfangssteigung der  $\mu$ -Schlupf Kurve, Lage des Maximalwerts der Umfangskraft etc. betrachtet und in das Modell einbezogen werden.

Gelingt die Integration der oben aufgeführten Parameter, kann das Modell dann Eingangsgröße für Rechnersimulationen des Fahrverhaltens auf nasser Fahrbahn oder auch ein Hilfsmittel für Fahrerwarnstrategien oder Fahrdynamikregelsysteme sein.

## 7 Literatur

ALBERT, B.J.: Reifen und Hydroplaning, Berichte des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen der Technischen Universität Berlin, Heft 2, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, 1970

DIECKMANN, T.: Der Reifenschlupf als Indikator für das Kraftschlußpotential, Dissertation Universität Hannover, 1992

EULER, G., SCHRÖDER, R.C.M., LANG, J., PLHAK, R., RETZLAFF, G.: Ermittlung der zeitlichen Feuchte- und Nässeverteilung auf Fahrbahnen, Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, BMV, Heft 567, 1989

FACH, M.: Erweiterung der Leistungsfähigkeit des Innentrommelprüfstands, Abschlußbericht zum Forschungsprojekt Nr. 95 532 der BAST, 1995

FGSV, Entwurf einer Richtlinie zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuß 4.3 „Rauheit“, 1994

GNADLER, R.: Naßgriff- und Aquaplaningverhalten von Pkw Reifen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 11/1988, 12/1988

HEINRICHS, R.: Entwicklung und Realisierung einer Meßeinrichtung zur Bestimmung der Wasserfilmdicke bei Aquaplaningversuchen im Prüfstand, Interner Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, 1992

KELLER, H.: Die Errichtung eines Innentrommelprüfstands für Straßenbeläge, Straße und Autobahn 26, 1975

KREMPEL, G.: Experimenteller Beitrag zu Untersuchungen an Kraftfahrzeugreifen, Dissertation TH Karlsruhe, 1965

KROPF, K.: Aufstellung von Standardversuchen zur Prüfung des Verschleißes von Straßenbelägen im Innentrommelprüfstand der BAST, Schlußbericht zum Forschungsauftrag 4.019 B 74 F der FGSV, 1975

MITSCHE, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band A, zweite Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1982

SCHULZE, K.-H.: Zur quantitativen Bewertung der Rauheit von Straßenoberflächen in Beziehung zum Reibungswiderstand bei Nässe, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 103, 1970

SCHUSTER, K.: Steuer- und Datenerfassungsprogramm zur Durchführung von Kraftschlußmessungen im Innentrommelprüfstand der BAST, Interner Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, 1992

SOLLFRANK, E.: Prüfanlage für Straßenbeläge, BBC-Nachrichten, Heft 7, 1975

## 8 Anhang

### 8.1 Kraftschlußmaximalwerte

#### 8.1.1 Reifenbreite 225

Reifen 225/45 ZR 16, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 8 mm Profilhöhe

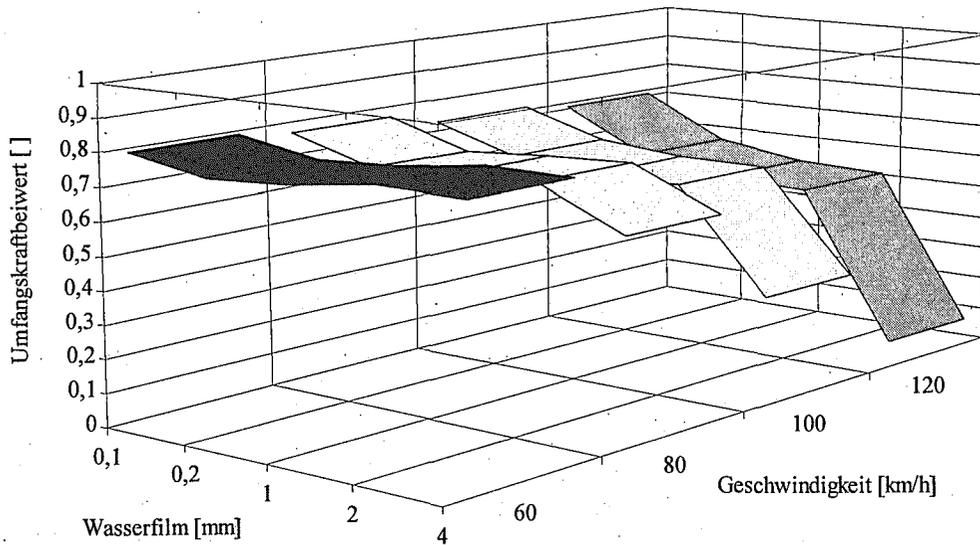


Bild 8.1: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 225/45 ZR 16, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 5 mm Profilhöhe

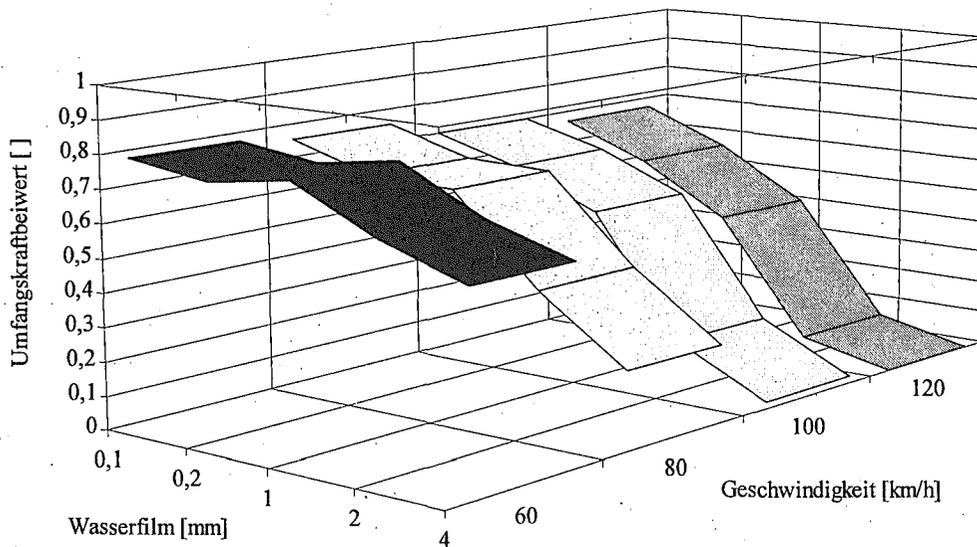


Bild 8.2: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 225/45 ZR 16, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 2 mm Profilhöhe

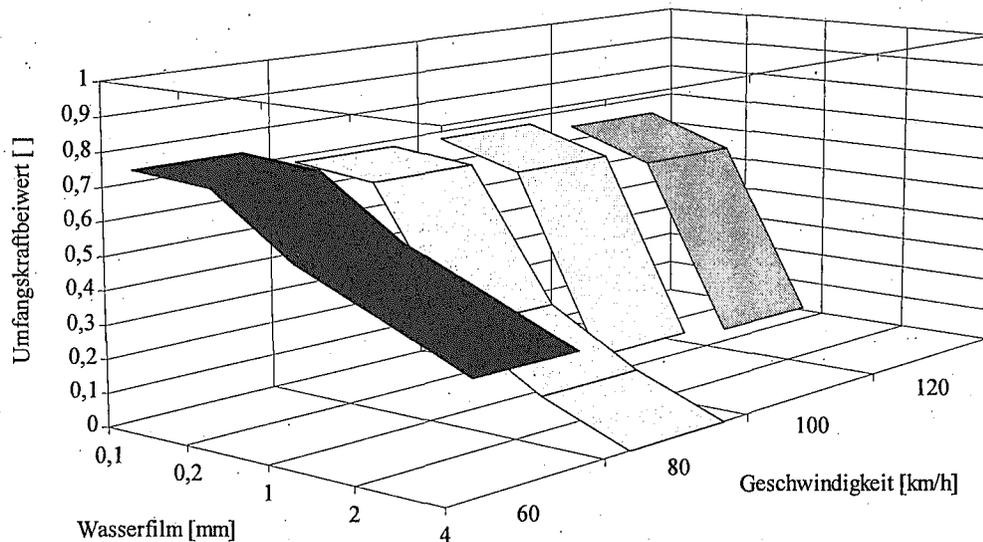


Bild 8.3: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 225/45 ZR 16, Hersteller B, 2500 N, 2,5 bar, 8 mm Profilhöhe

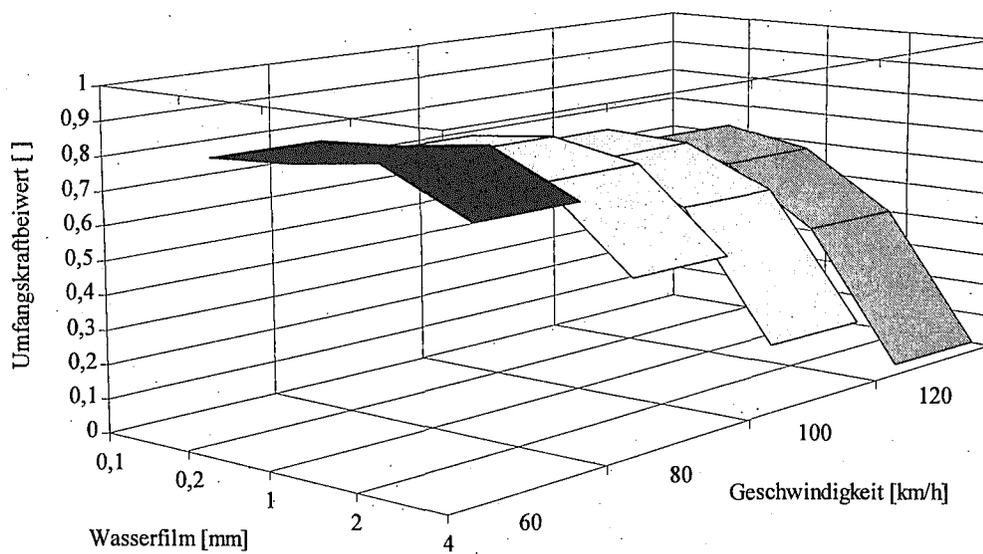


Bild 8.4: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 225/45 ZR 16, Hersteller B, 2500 N, 2,5 bar, 5 mm Profilhöhe

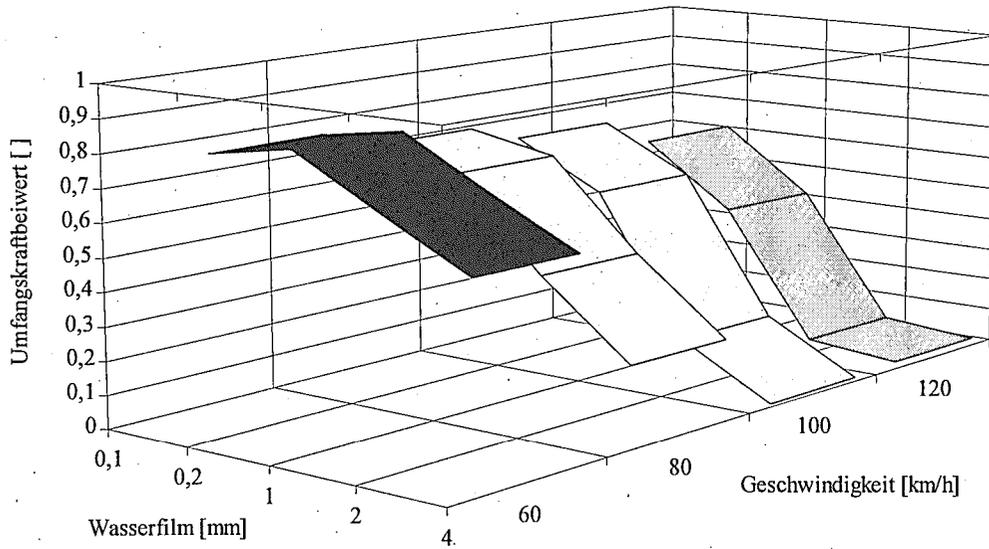


Bild 8.5: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 225/45 ZR 16, Hersteller B, 2500 N, 2,5 bar, 2 mm Profilhöhe

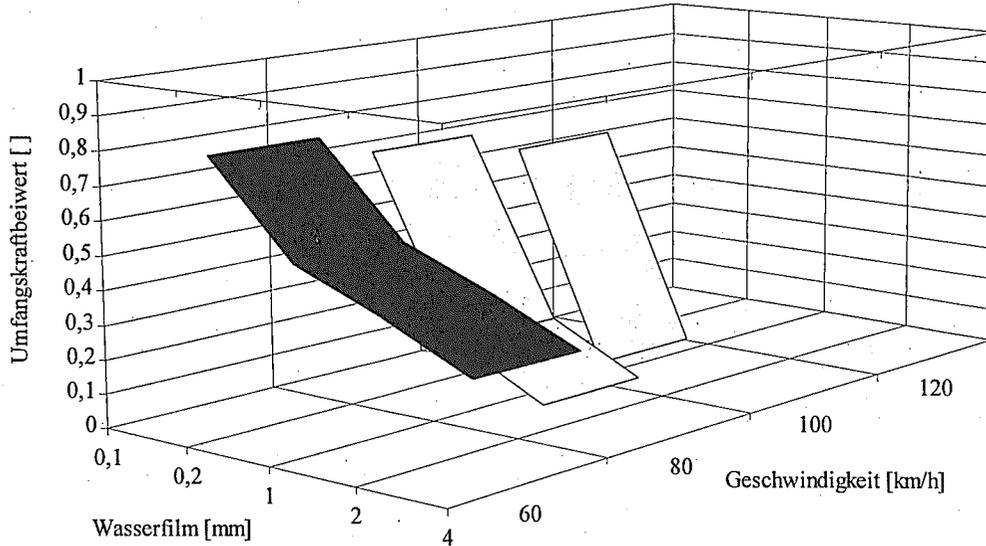


Bild 8.6: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

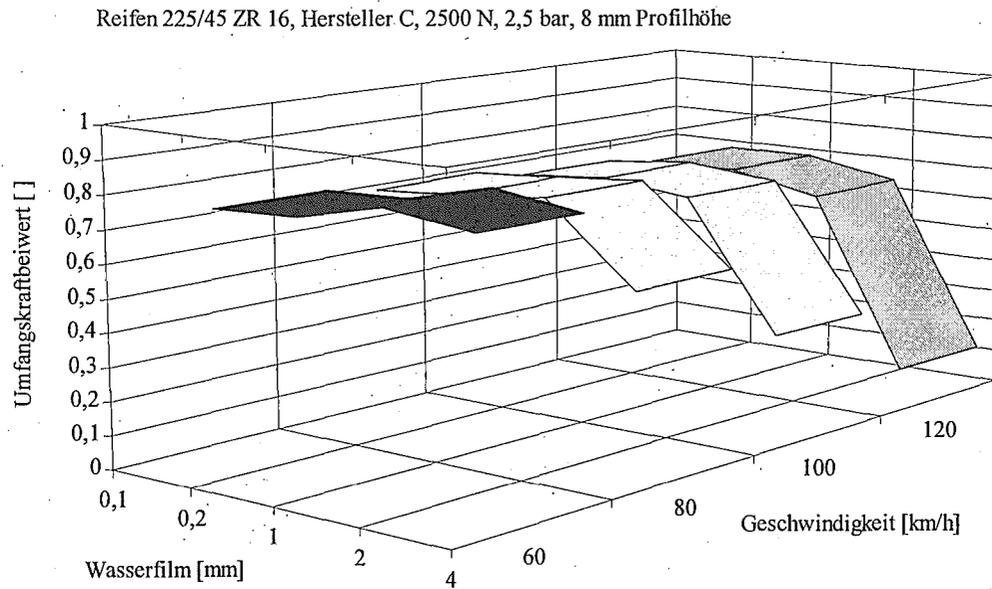


Bild 8.7: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

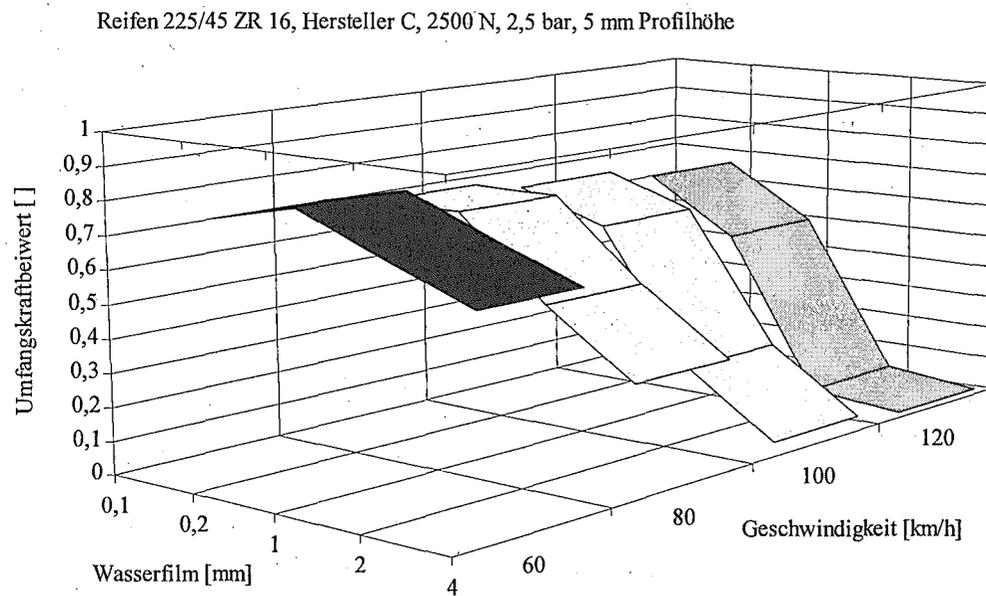


Bild 8.8: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 225/45 ZR 16, Hersteller C, 2500 N, 2,5 bar, 2 mm Profilhöhe

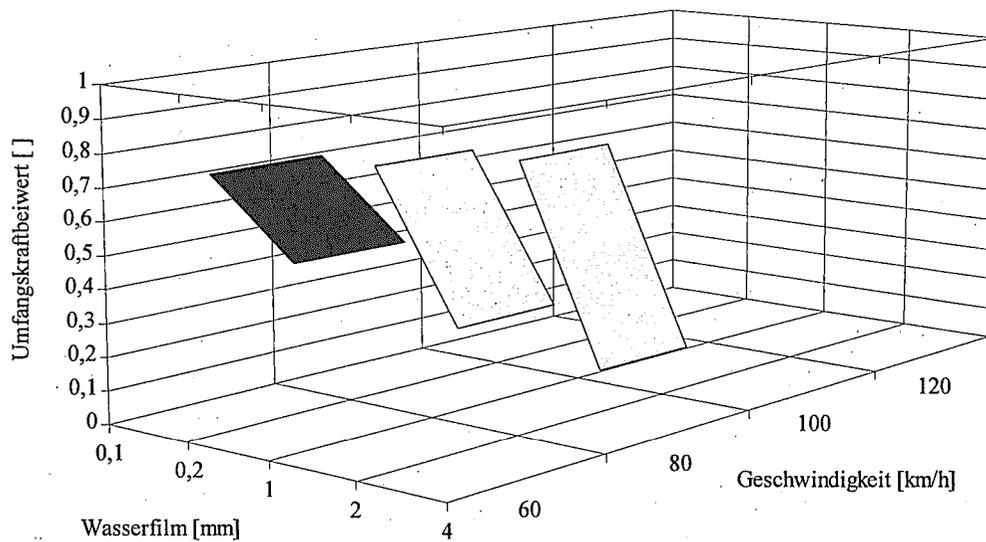


Bild 8.9: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

### 8.1.2 Reifenbreite 175

Reifen 175/70 13, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 8 mm Profilhöhe

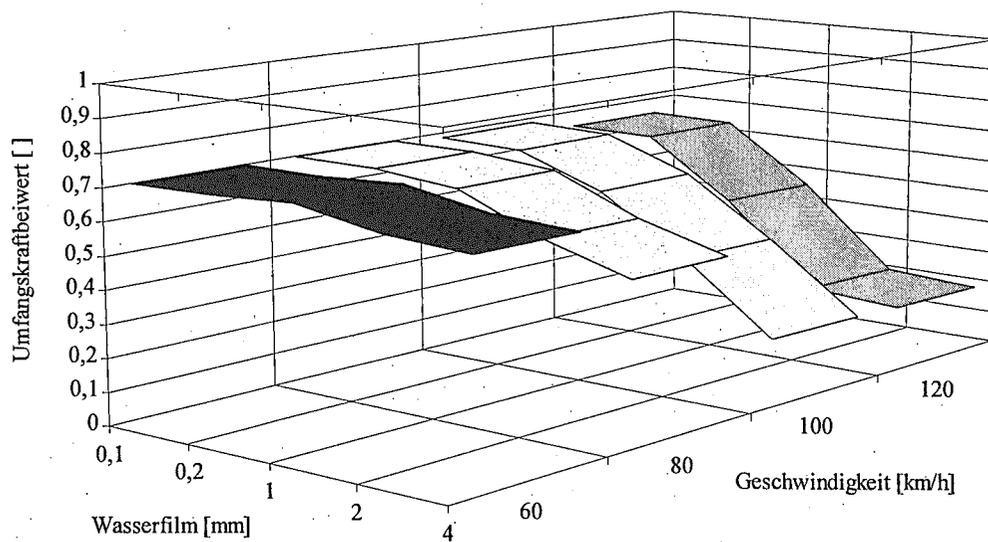


Bild 8.10: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 175/70 13, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 5 mm Profilhöhe

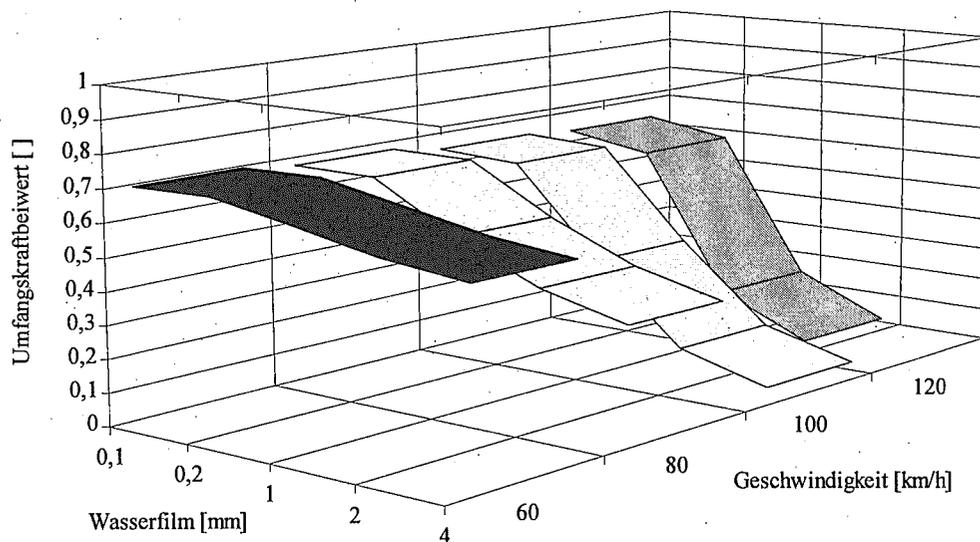


Bild 8.11: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 175/70 13, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 2 mm Profilhöhe

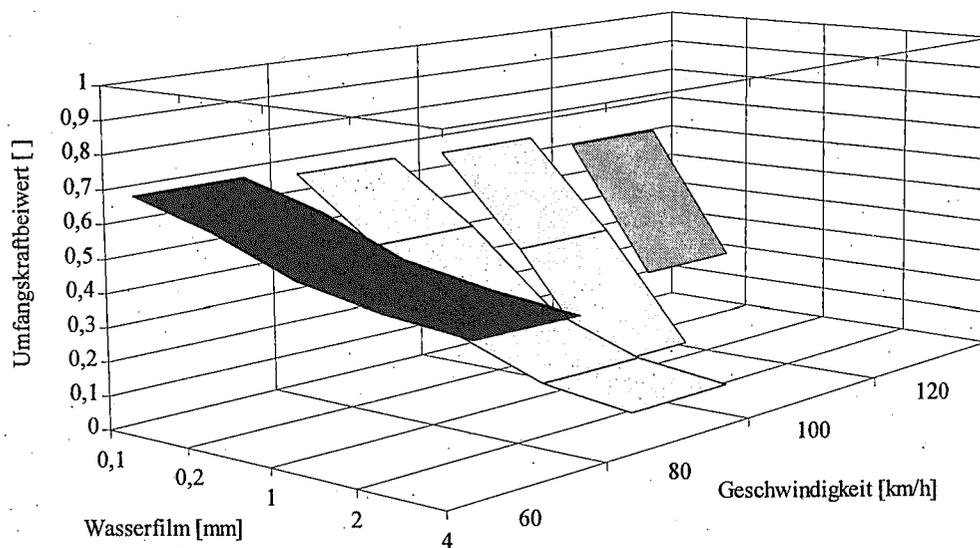


Bild 8.12: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

## 8.1.3 Reifenbreite 155

Reifen 155/70 13, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 8 mm Profilhöhe

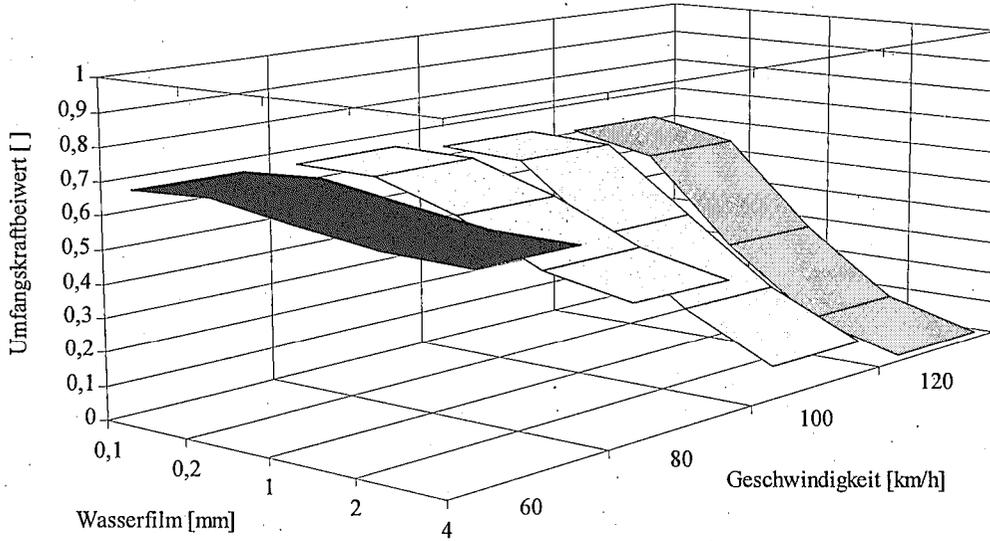


Bild 8.13: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 155/70 13, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 2 mm Profilhöhe

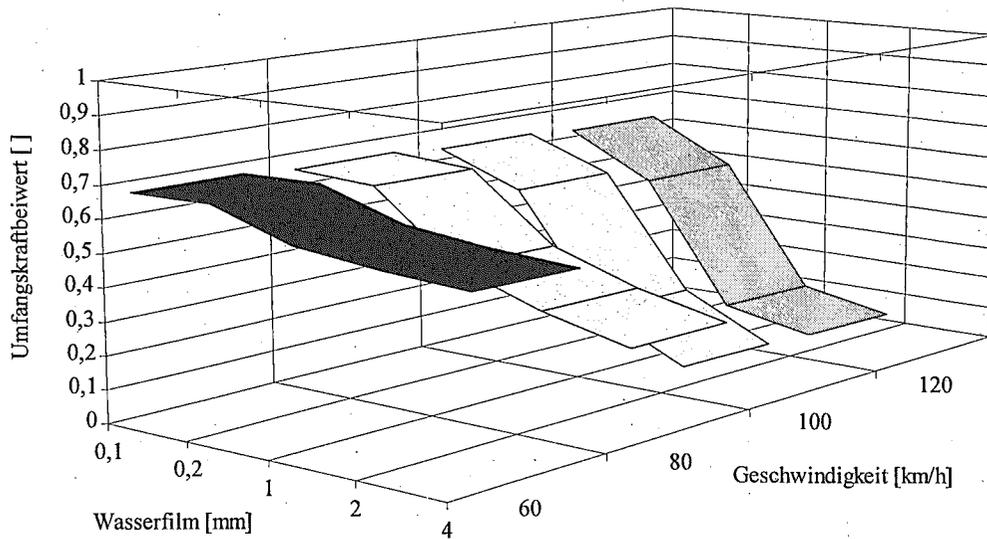


Bild 8.14: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

Reifen 155/70 13, Hersteller A, 2500 N, 2,5 bar, 2 mm Profilhöhe

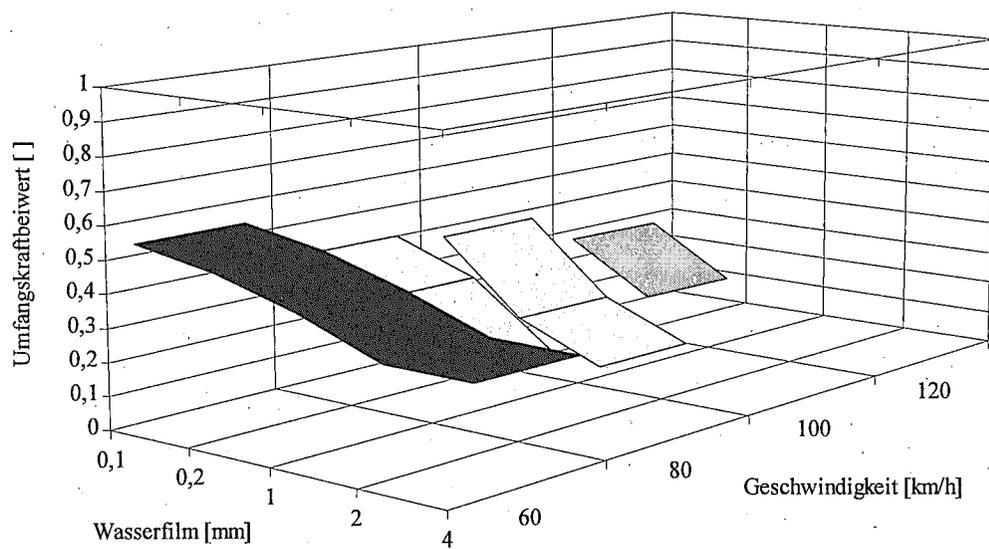


Bild 8.15: Kraftschlußmaximalwerte, Geschwindigkeits- und Wasserfilmhöhenvariation

## 8.2 Kraftschlußkurven

### 8.2.1 Referenzmessungen

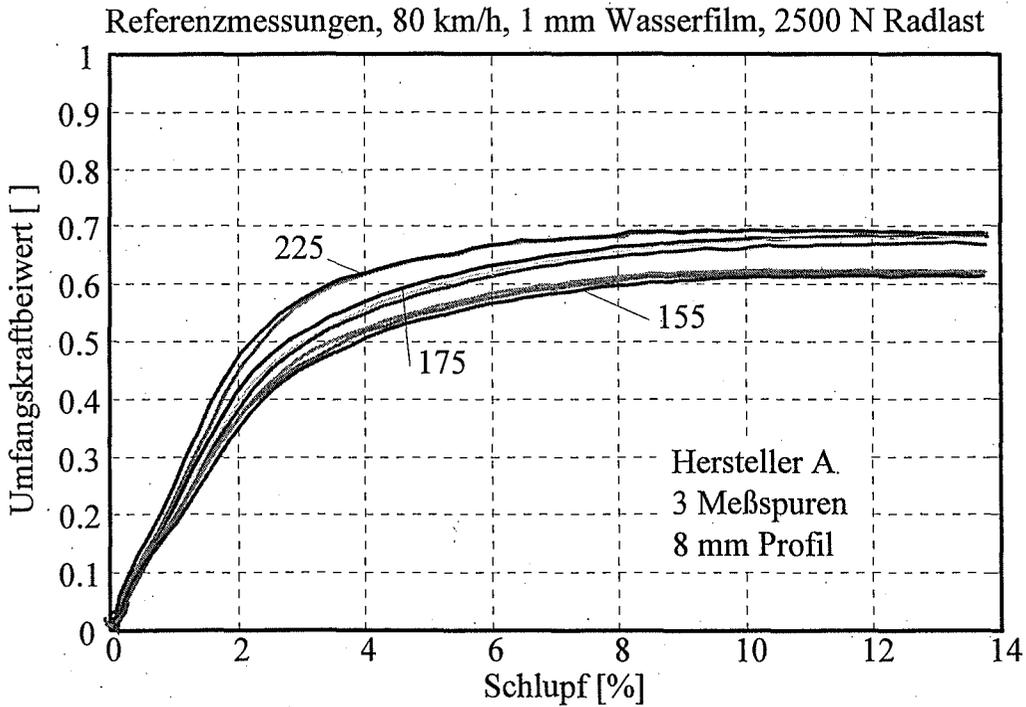


Bild 8.16: Referenzmessungen, Hersteller A, 3 Reifenbreiten

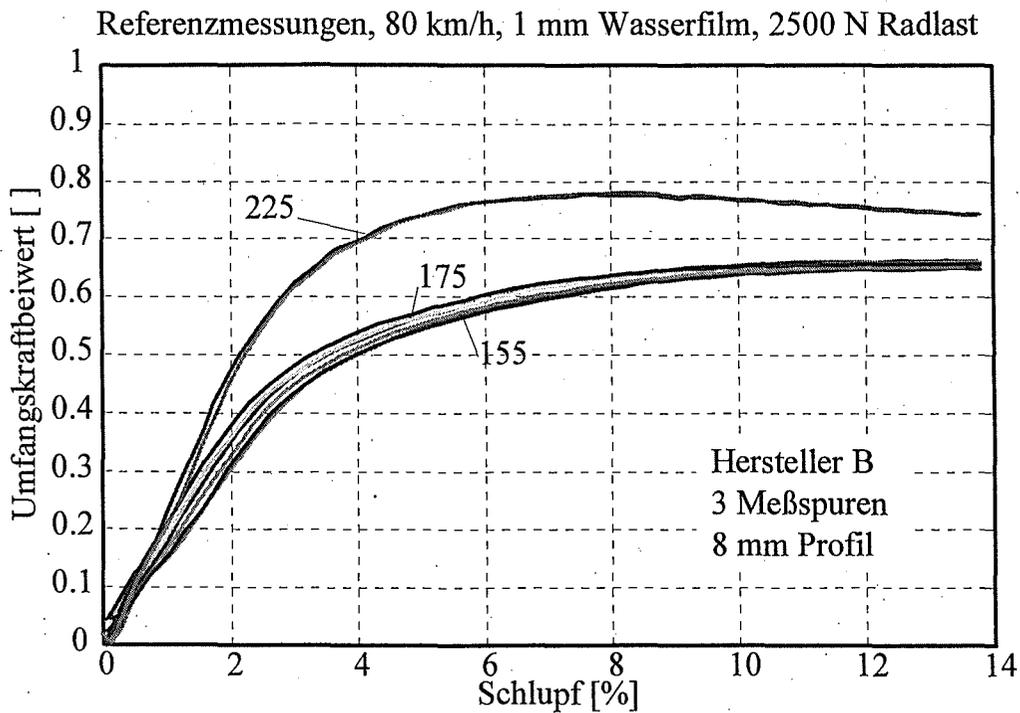


Bild 8.17: Referenzmessungen, Hersteller B, 3 Reifenbreiten

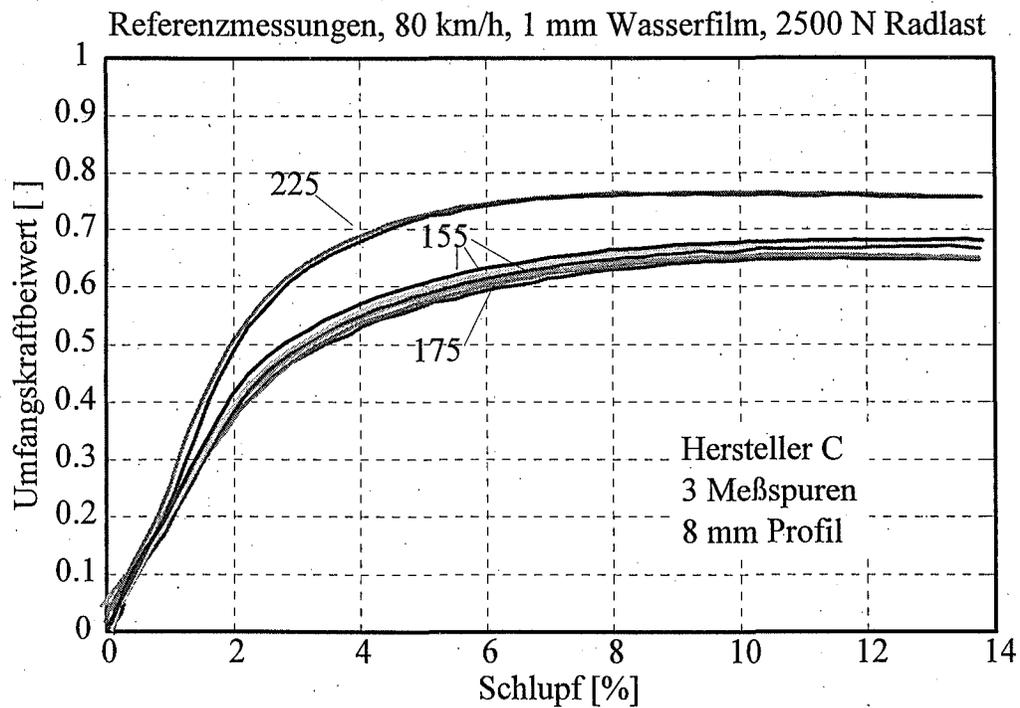


Bild 8.18: Referenzmessungen, Hersteller C, 3 Reifenbreiten

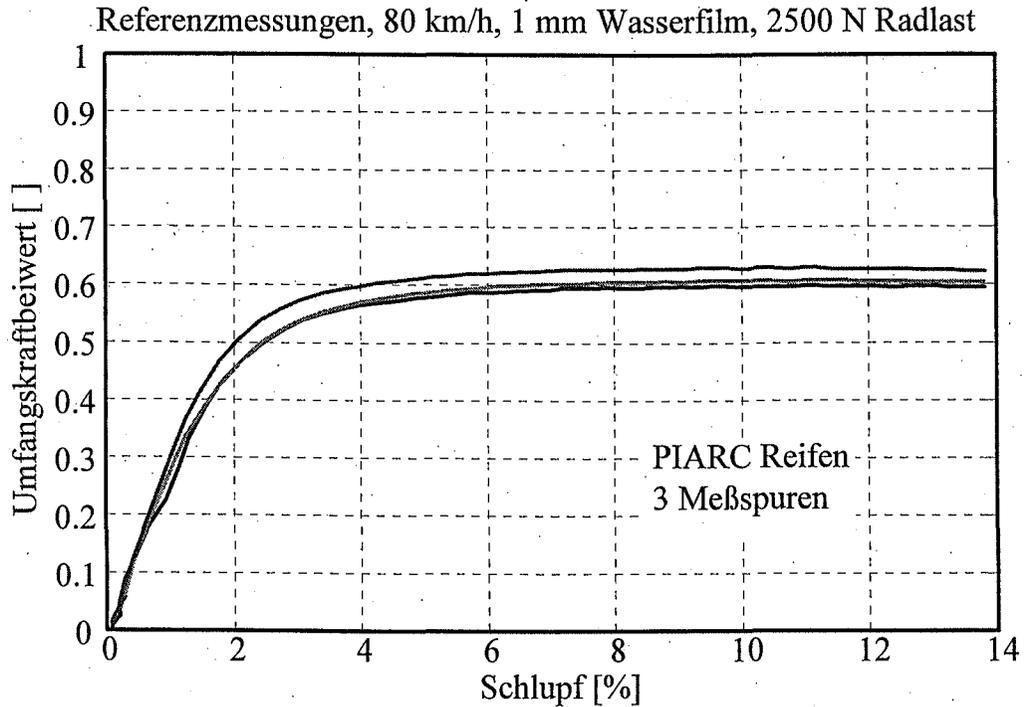


Bild 8.19: Referenzmessungen, PIARC Reifen

## 8.2.2 Reifenbreite 225, Hersteller A, 2 mm Profil

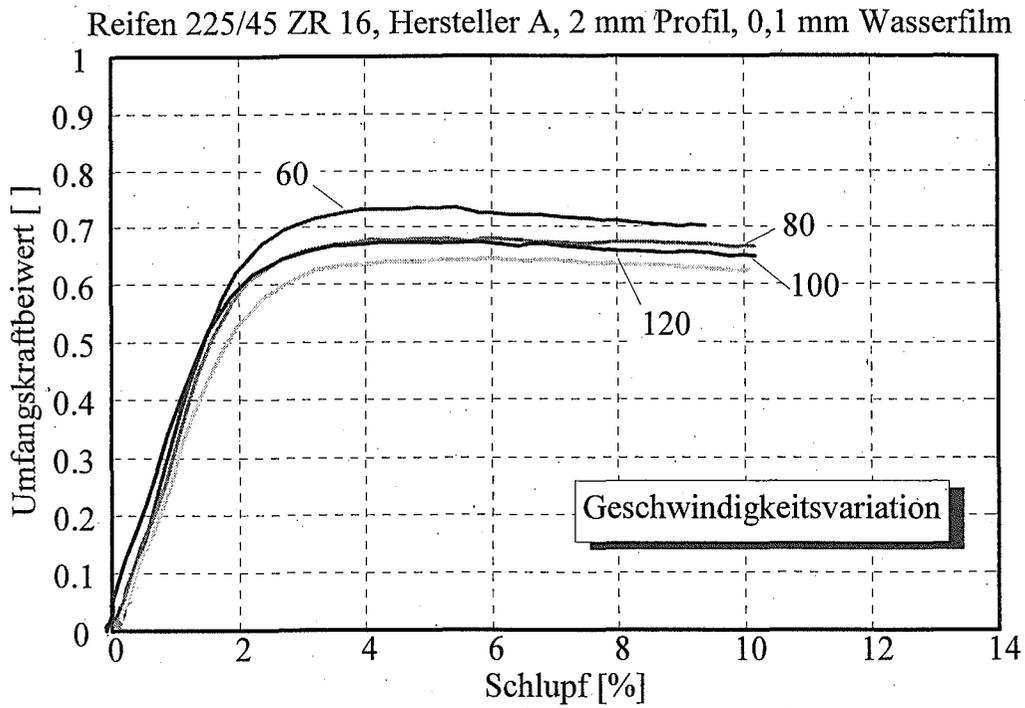


Bild 8.20: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

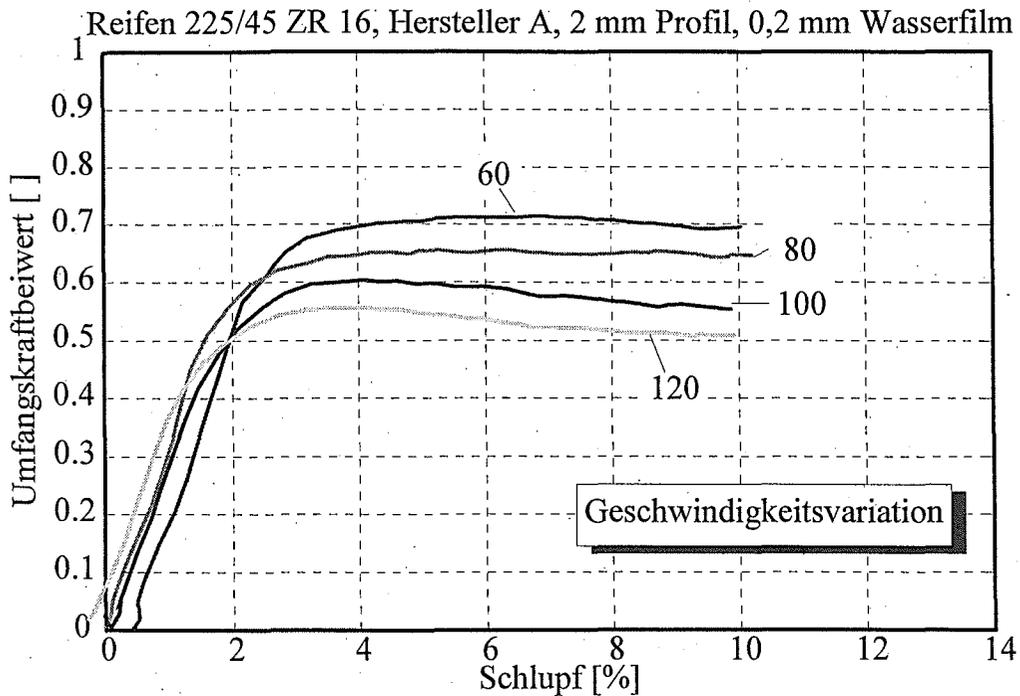


Bild 8.21: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

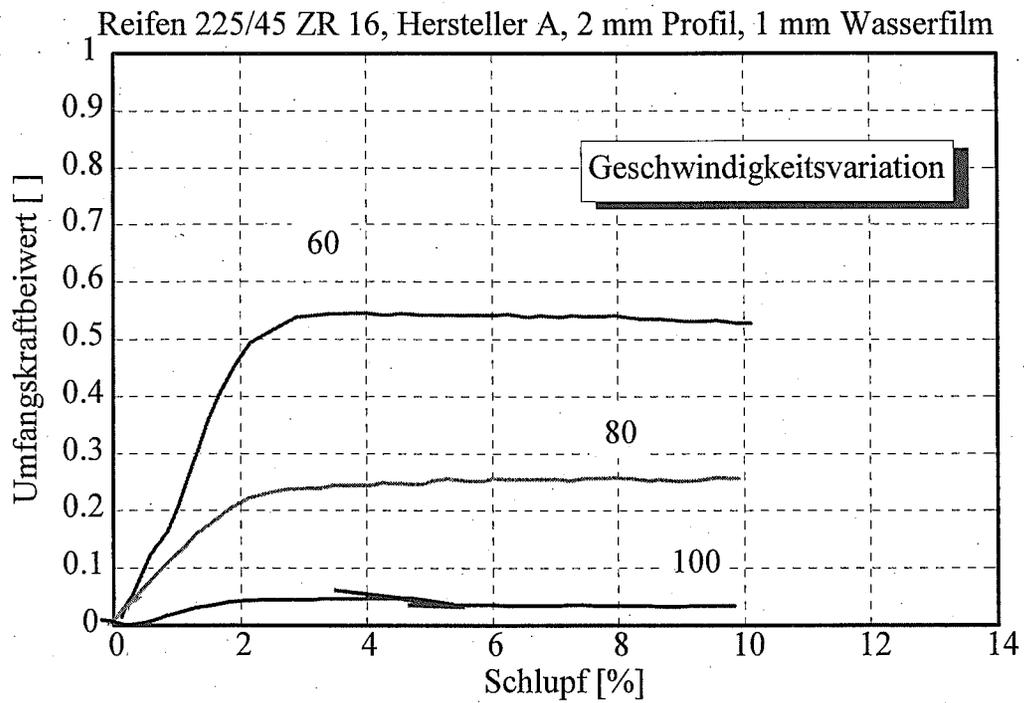


Bild 8.22: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

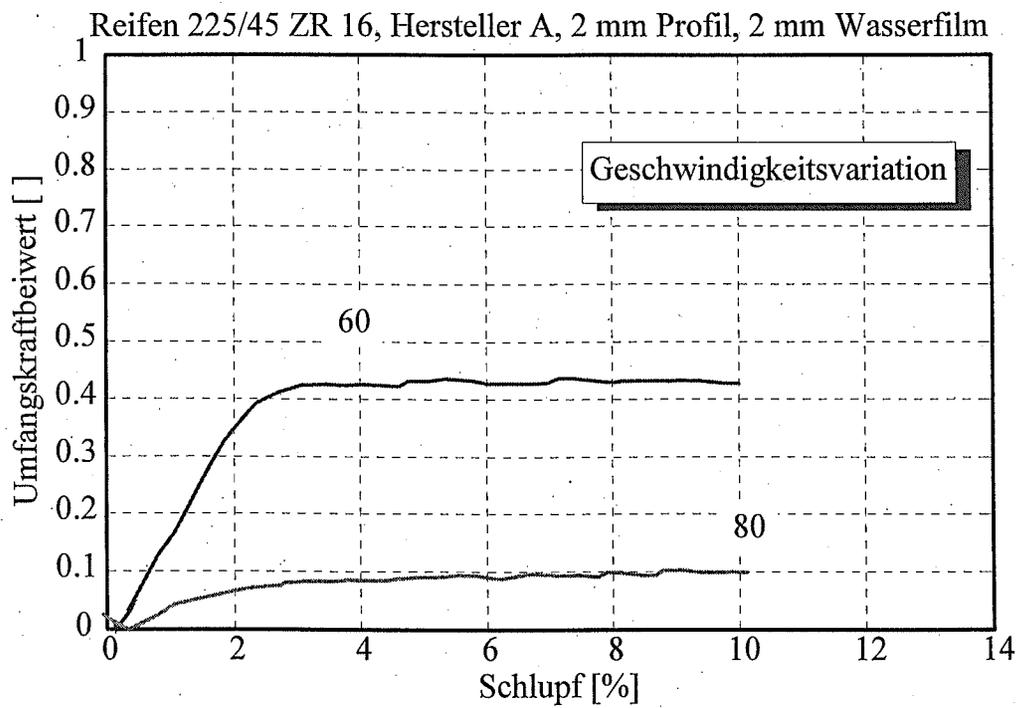


Bild 8.23: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

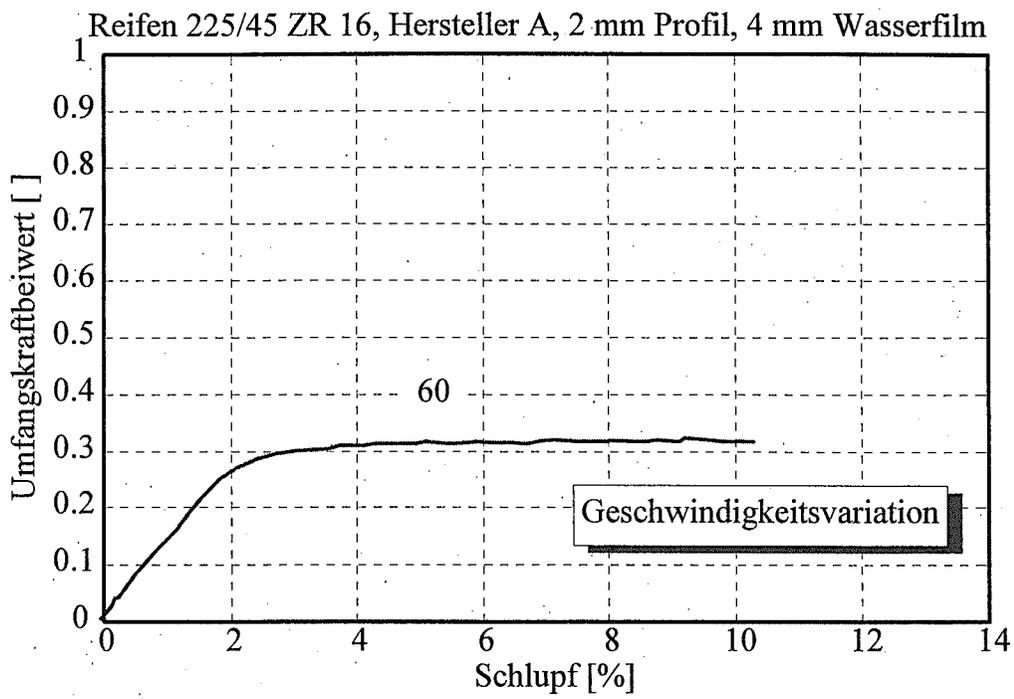


Bild 8.24: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.3 Reifenbreite 225, Hersteller A, 5 mm Profil

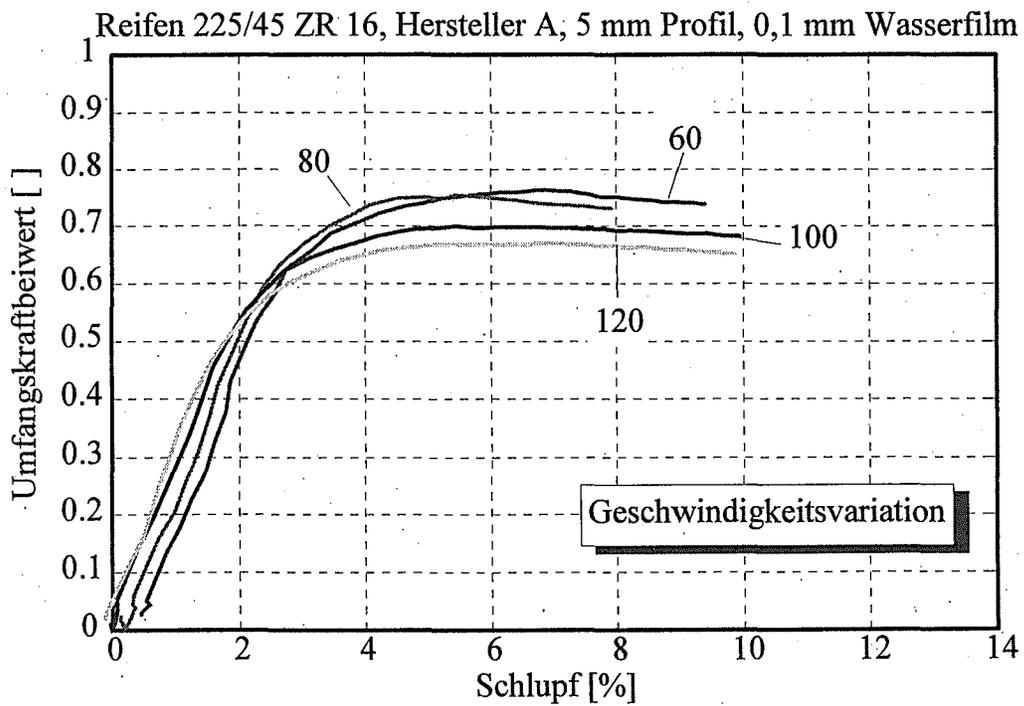


Bild 8.25: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

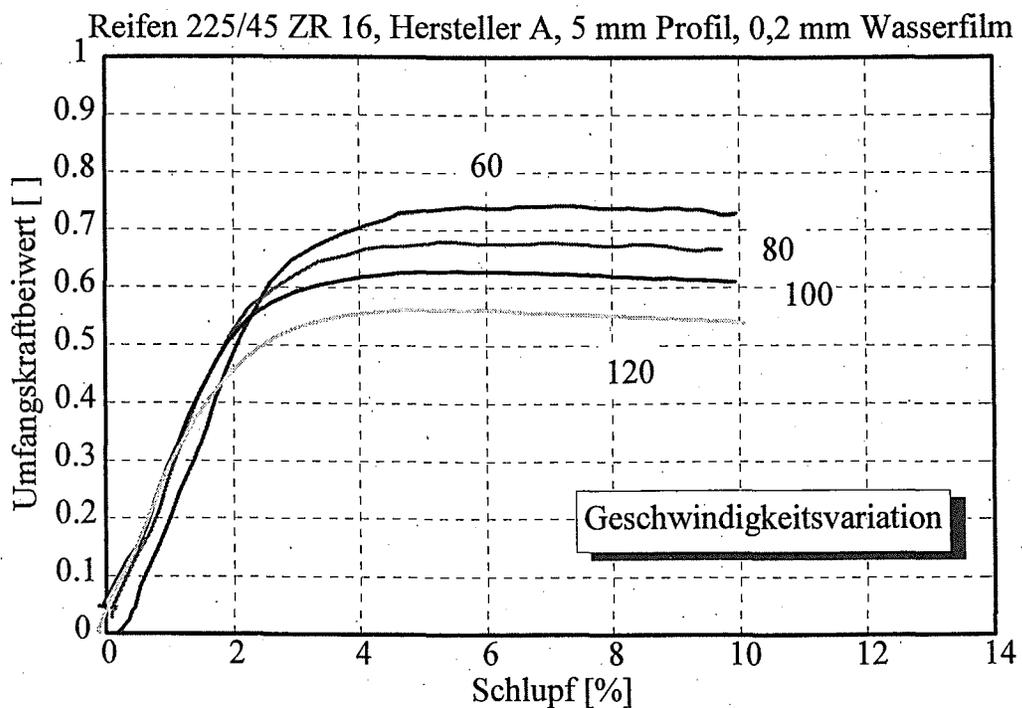


Bild 8.26: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

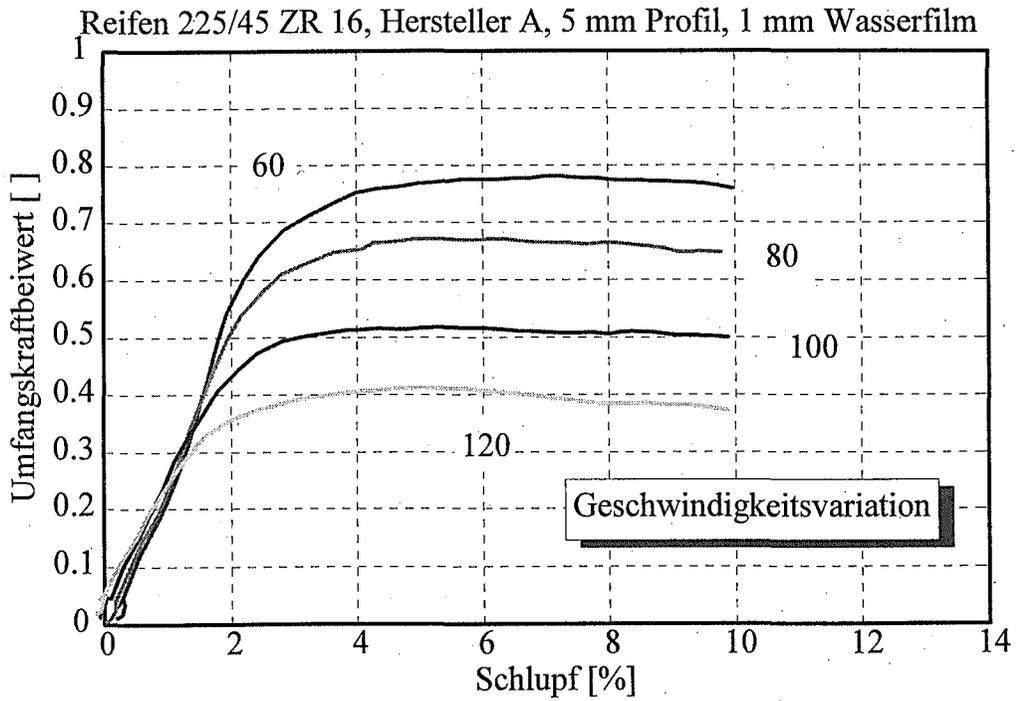


Bild 8.27: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

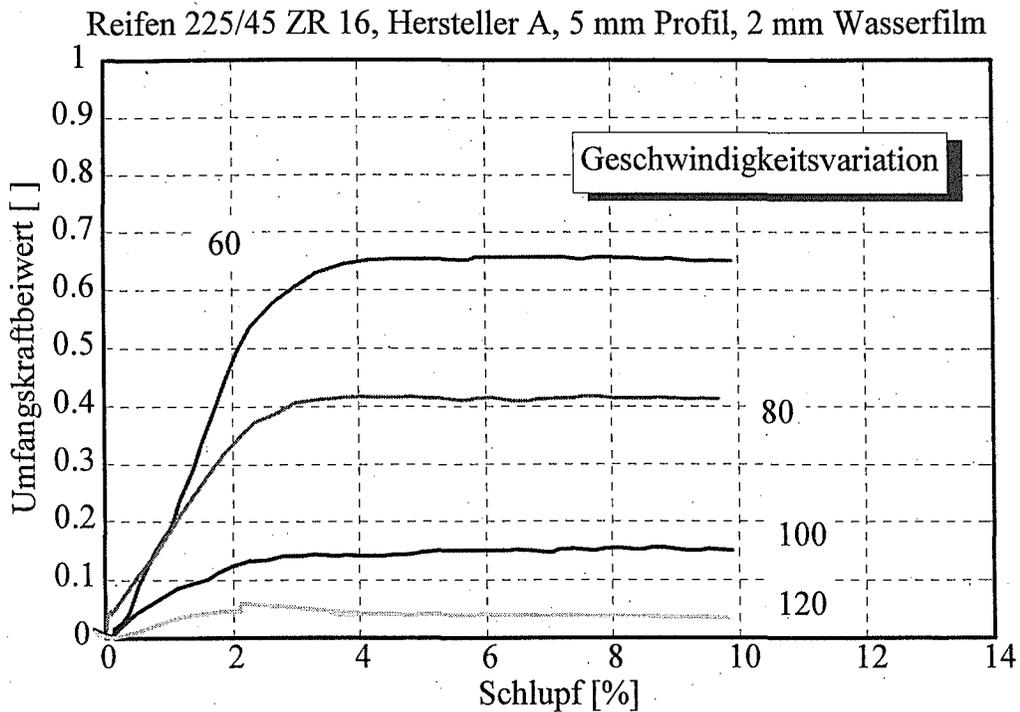


Bild 8.28: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

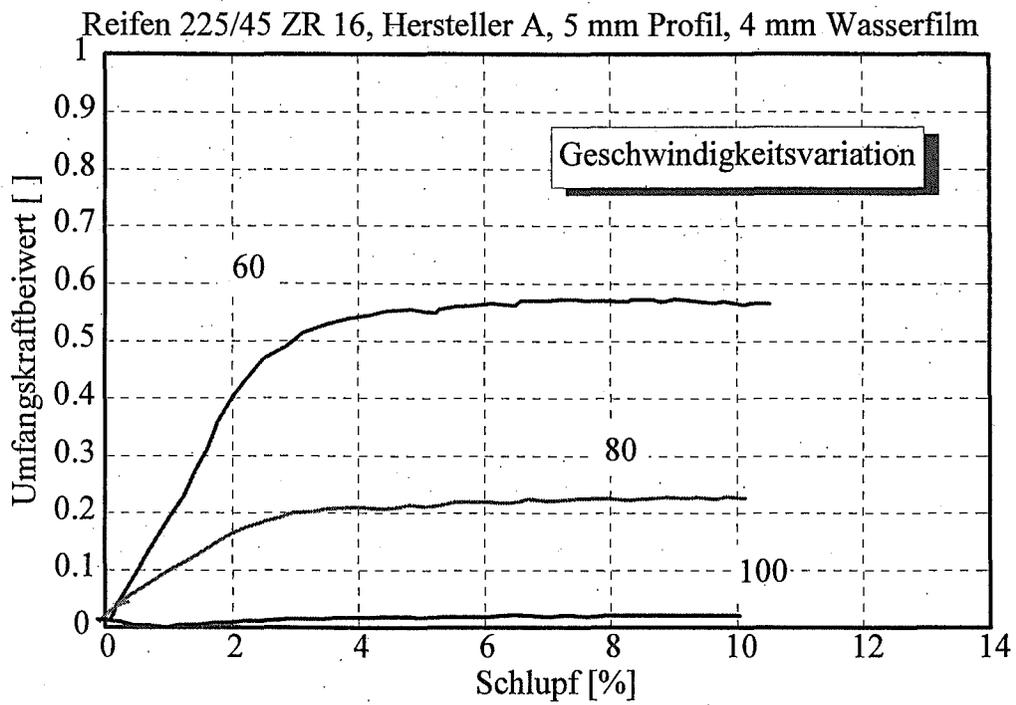


Bild 8.29: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.4 Reifenbreite 225, Hersteller A, 8 mm Profil

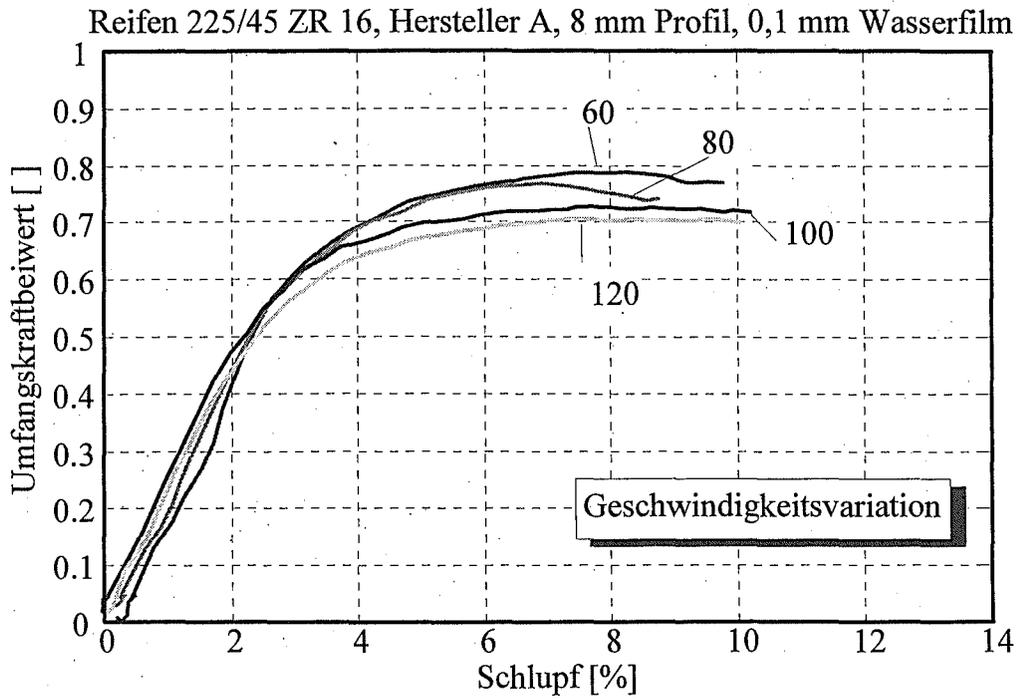


Bild 8.30: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

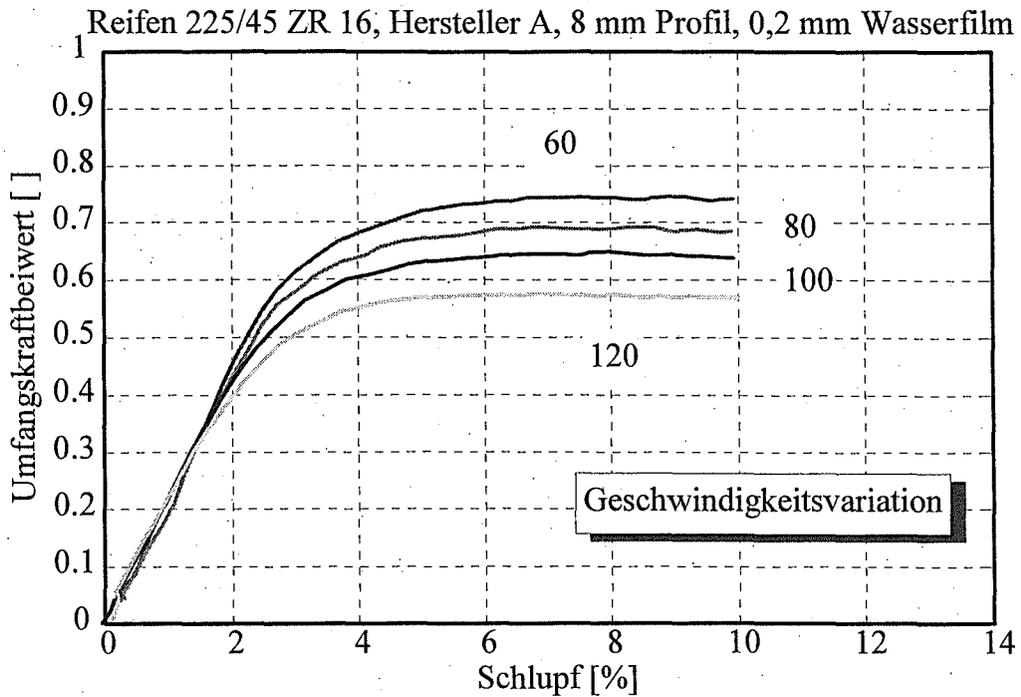


Bild 8.31: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

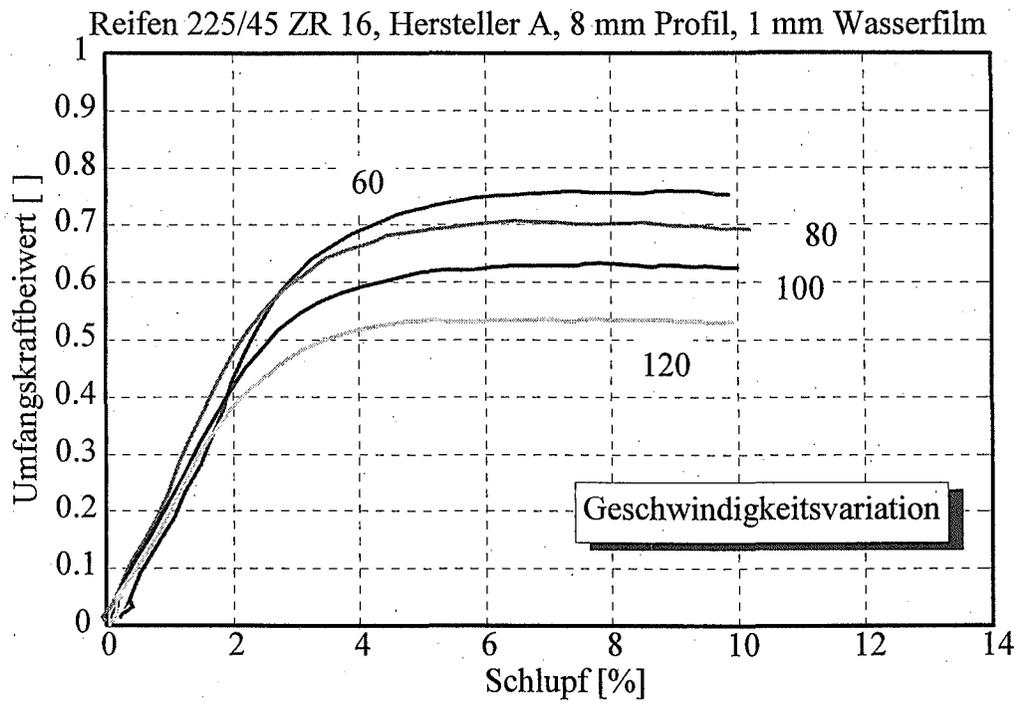


Bild 8.32: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

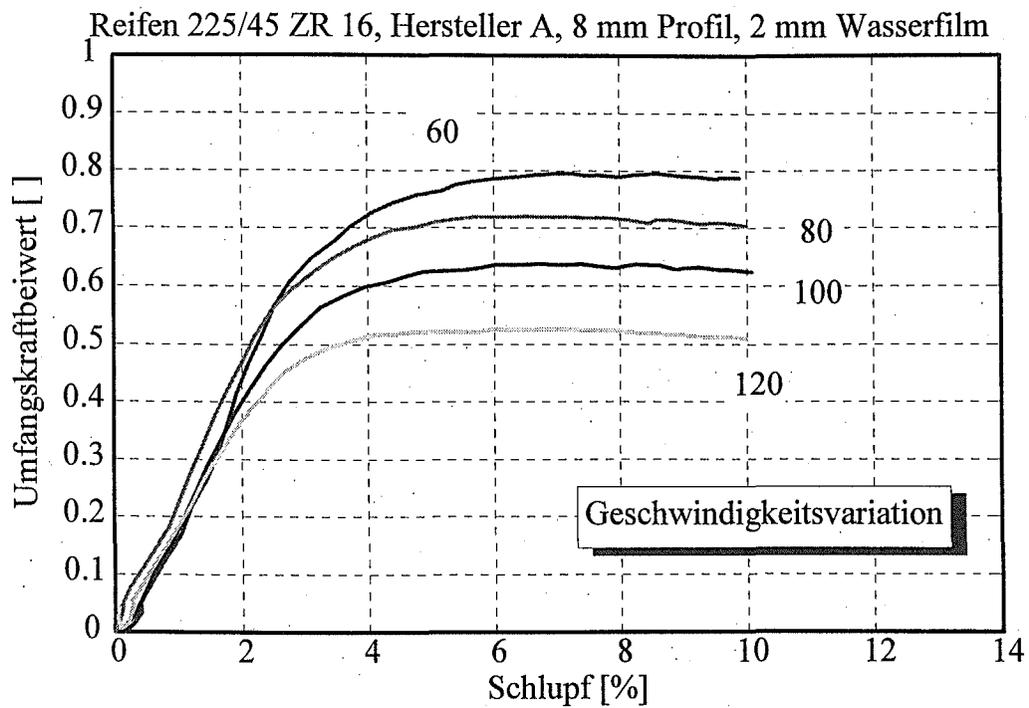


Bild 8.33: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

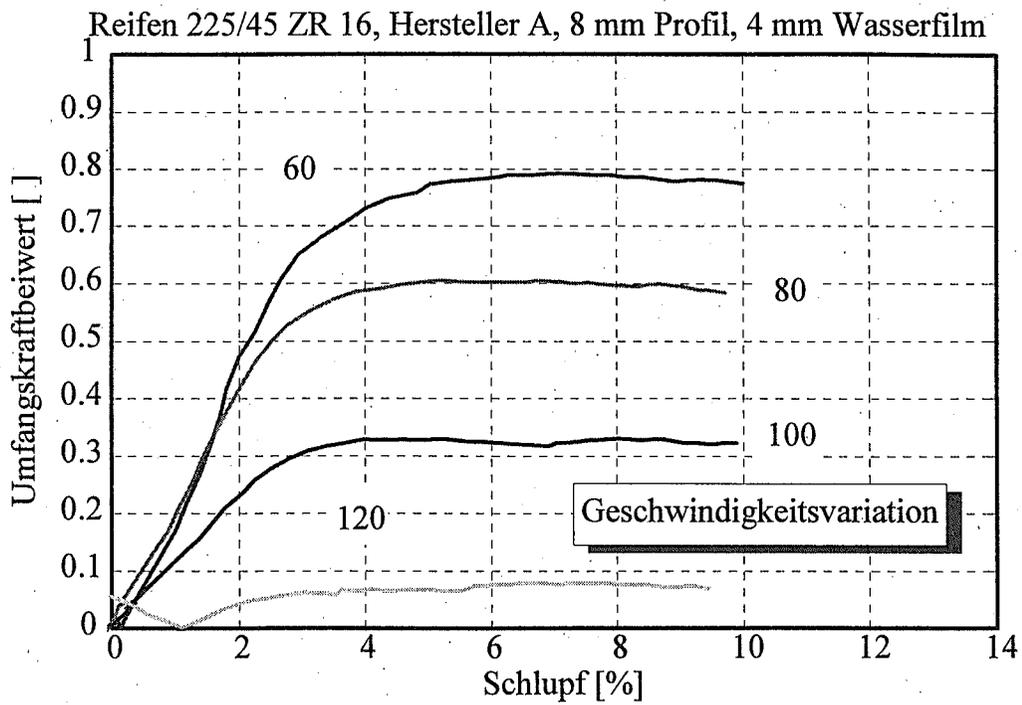


Bild 8.34: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.5 Reifenbreite 225, Hersteller B, 2 mm Profil

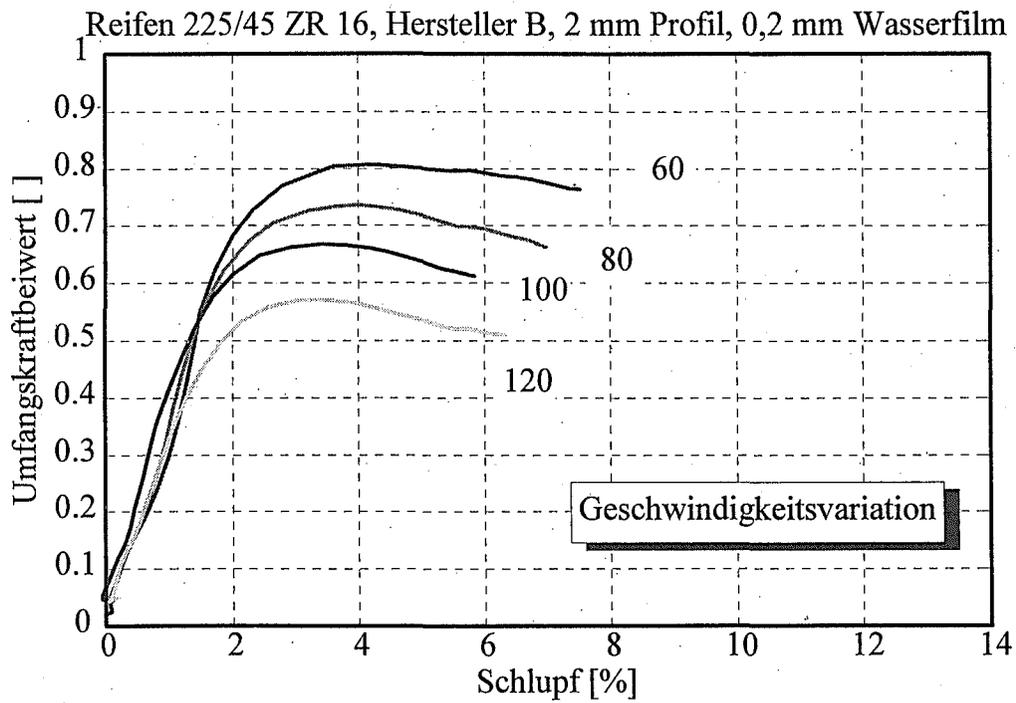


Bild 8.35: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

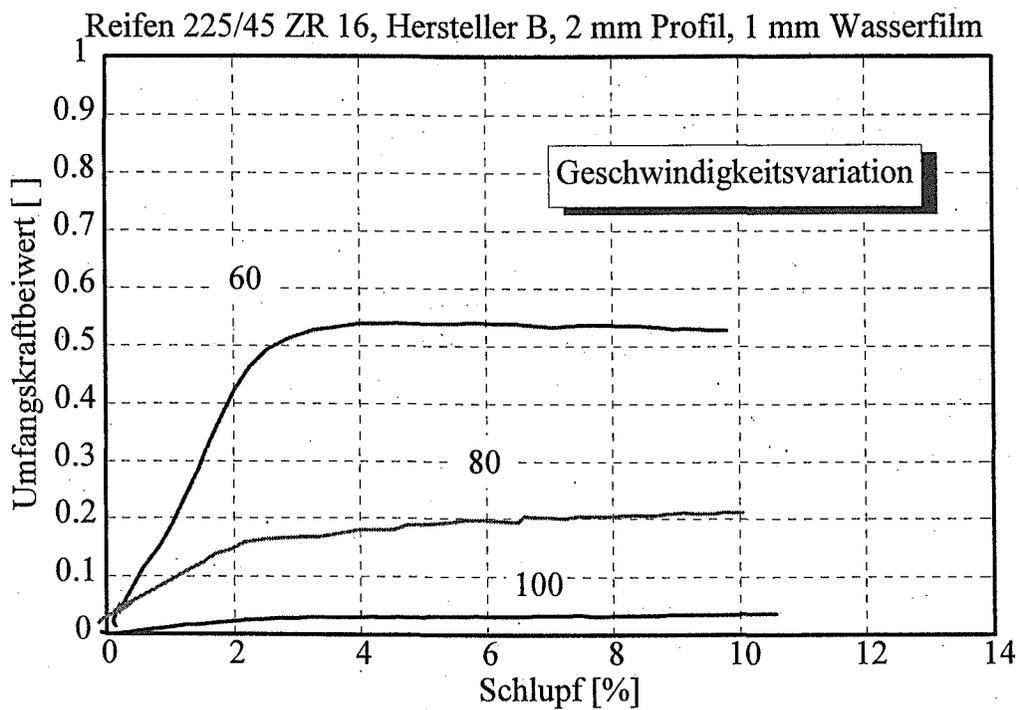


Bild 8.36: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

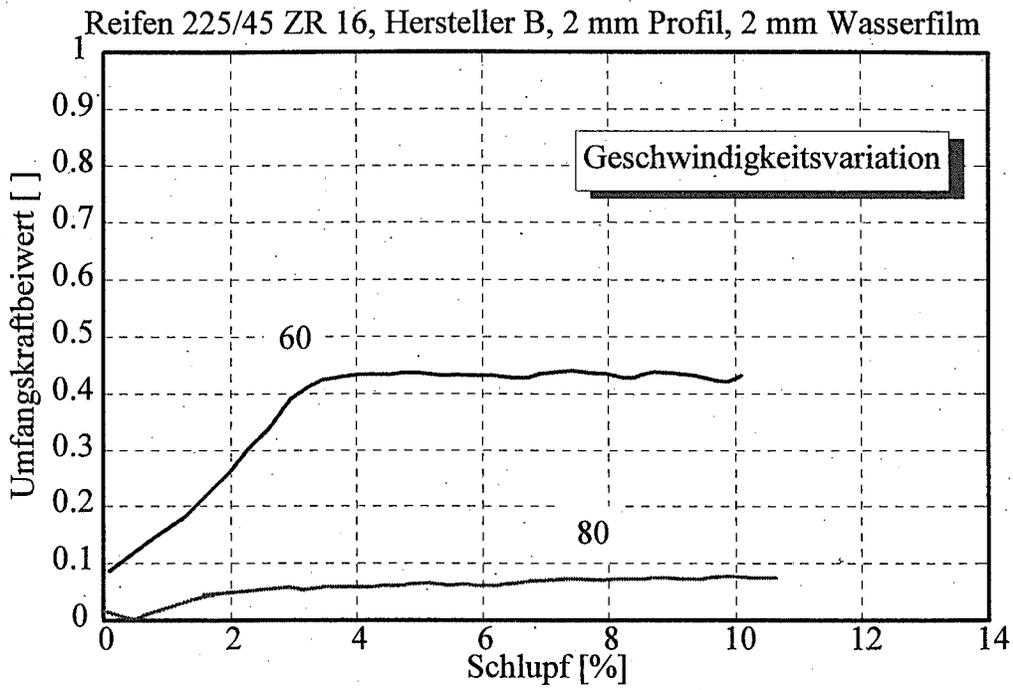


Bild 8.37: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

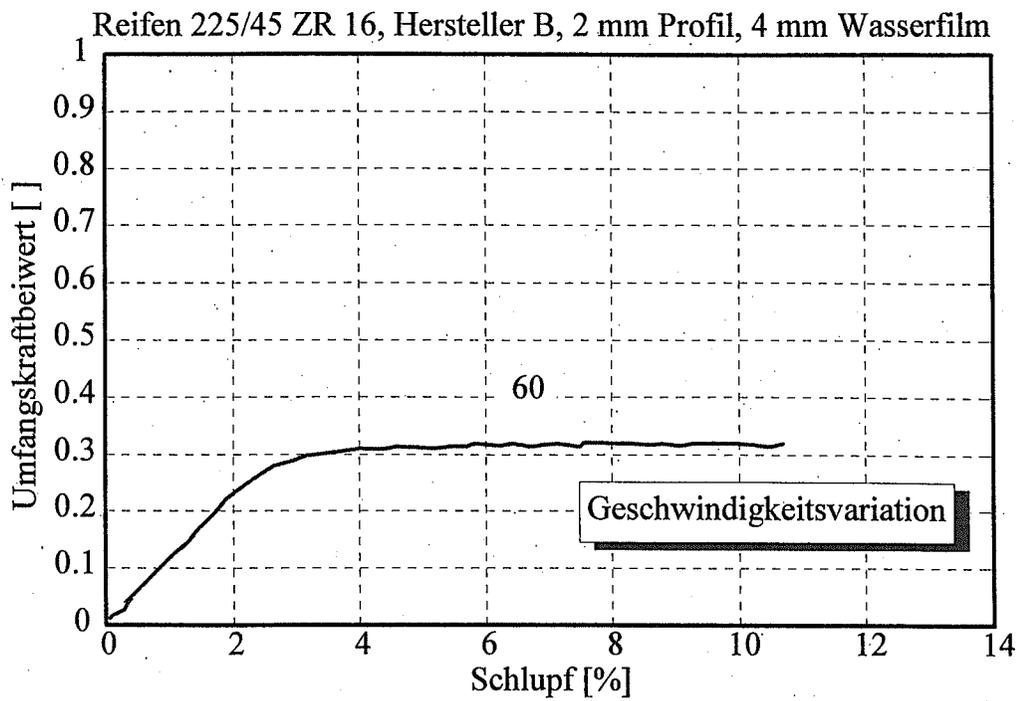


Bild 8.38: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.6 Reifenbreite 225, Hersteller B, 5 mm Profil

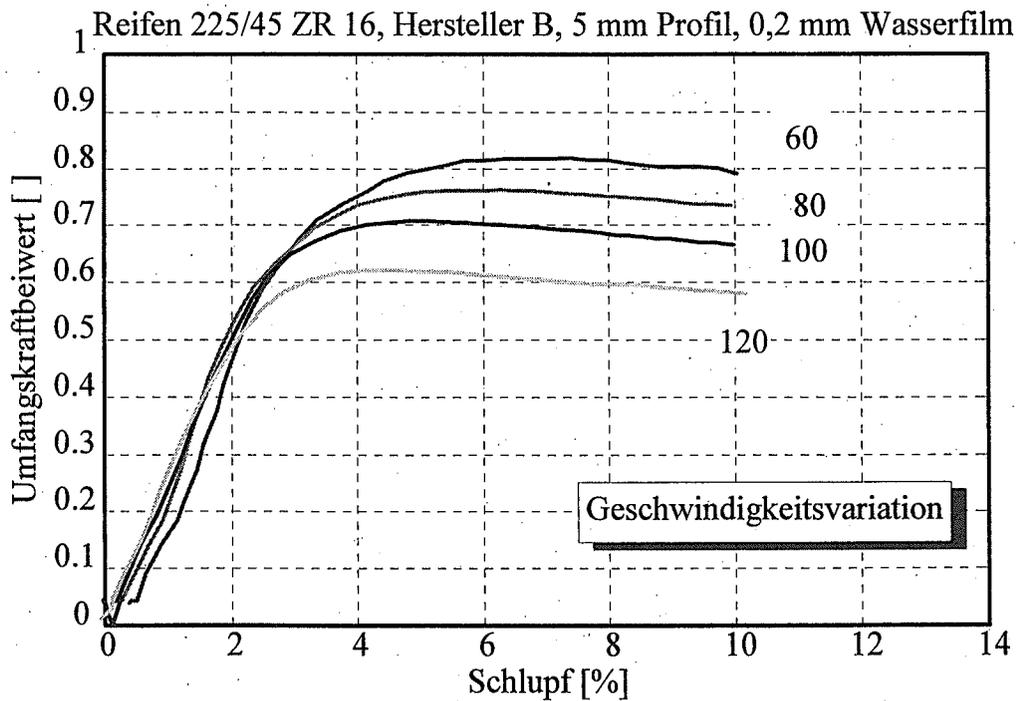


Bild 8.39: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

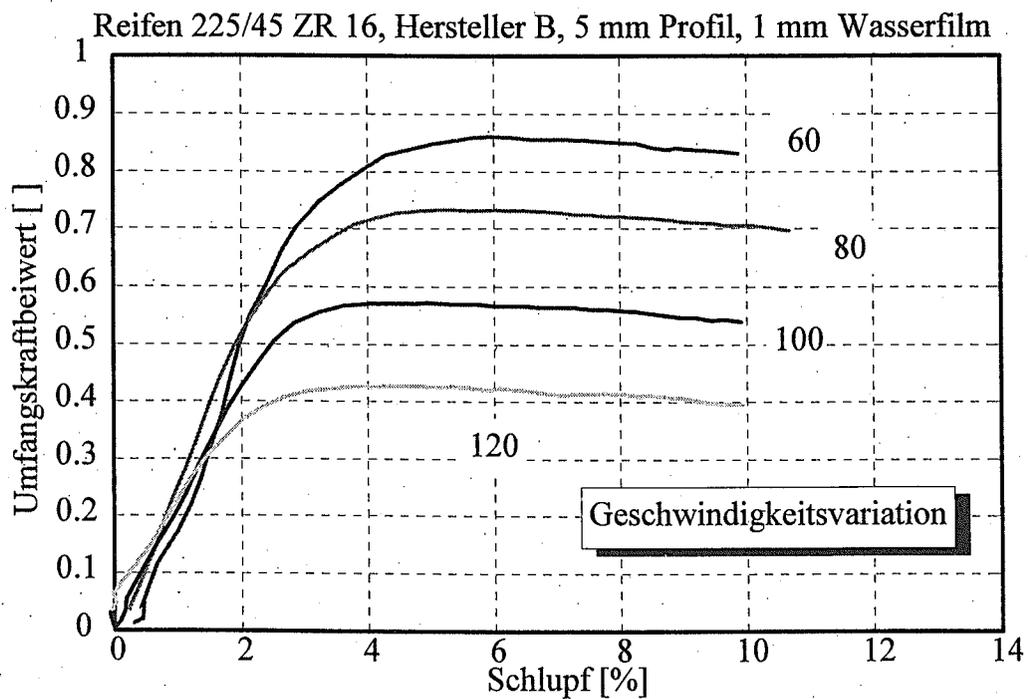


Bild 8.40: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

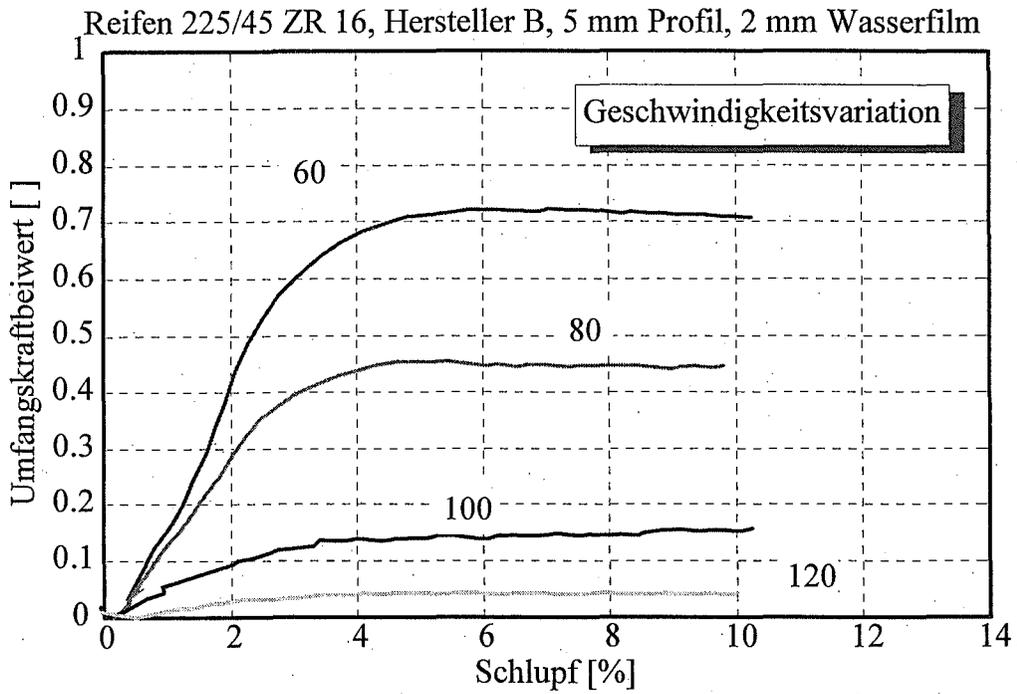


Bild 8.41: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

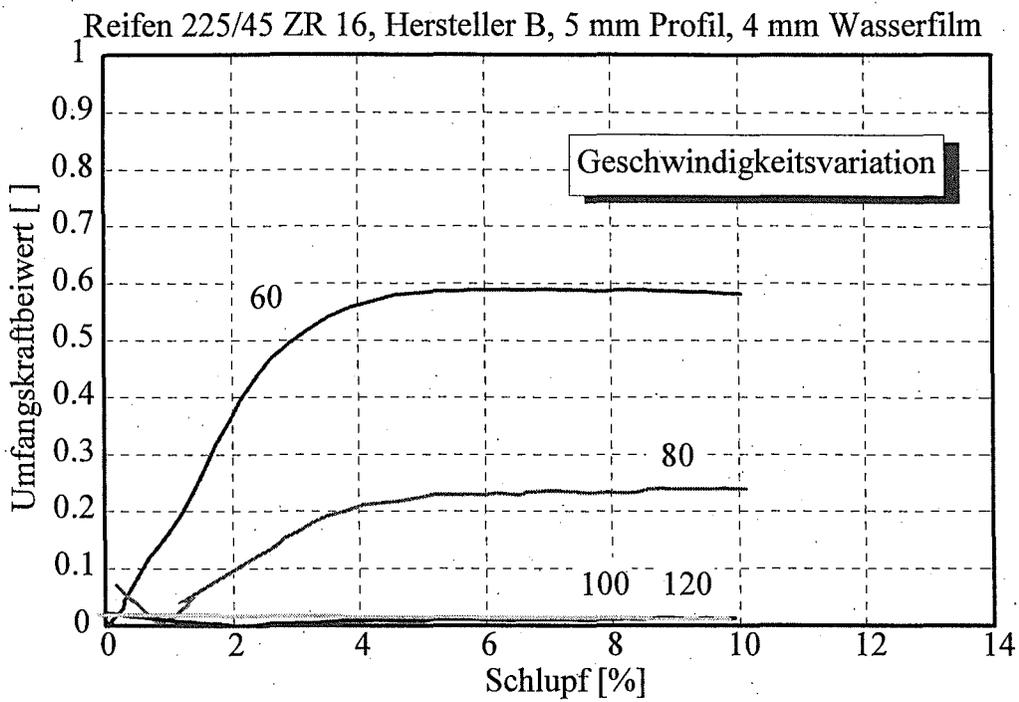


Bild 8.42: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.7 Reifenbreite 225, Hersteller B, 8 mm Profil

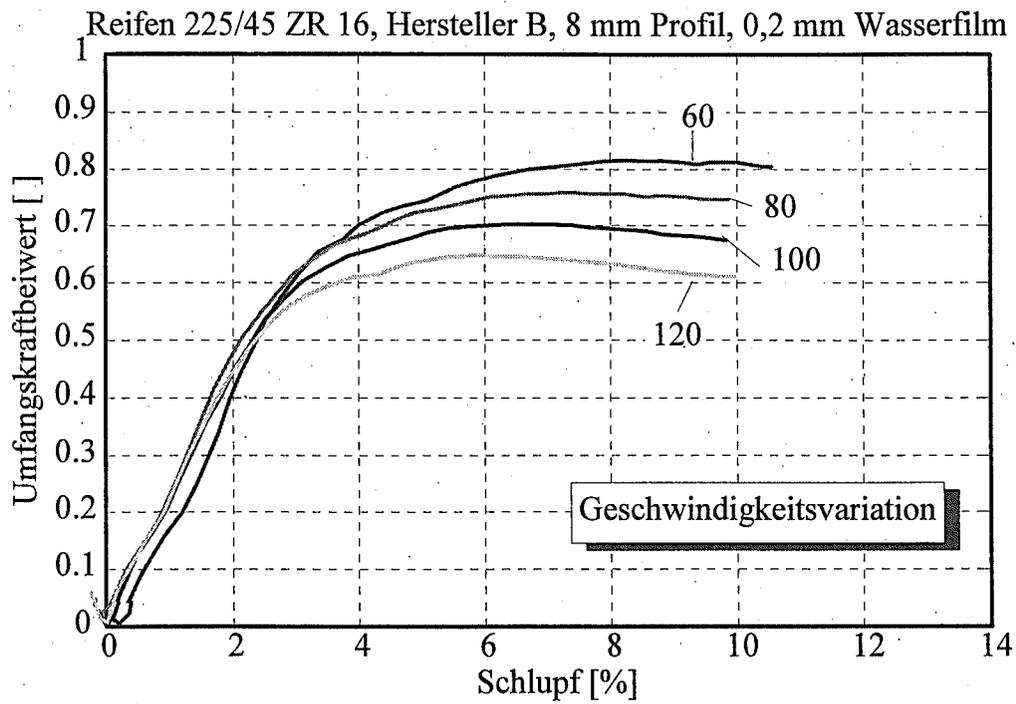


Bild 8.43: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

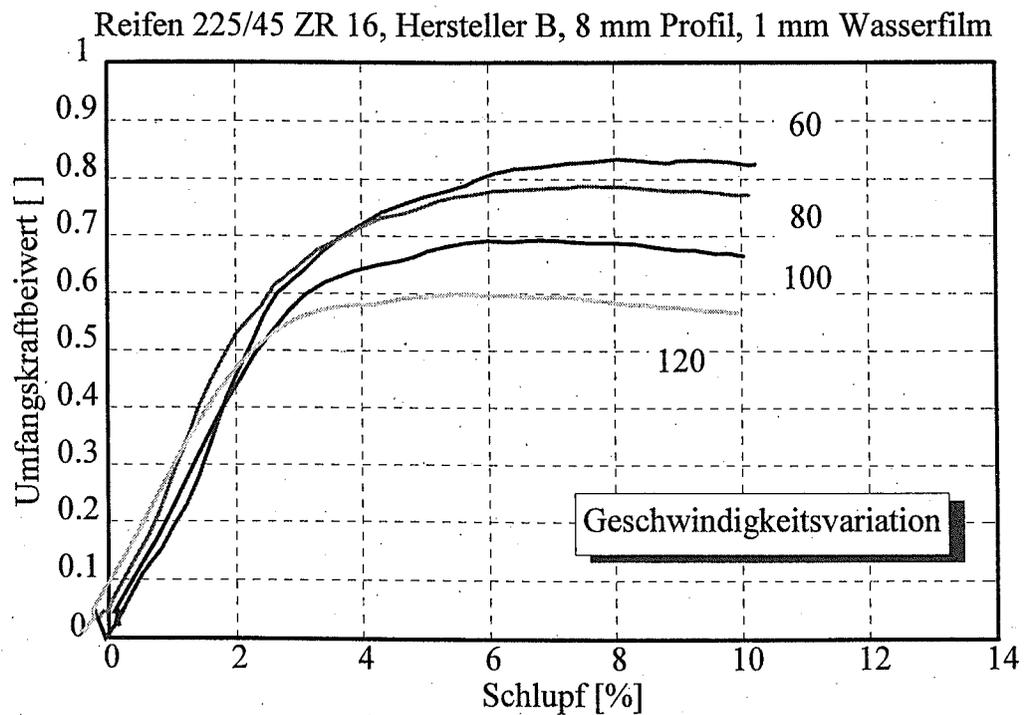


Bild 8.44: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

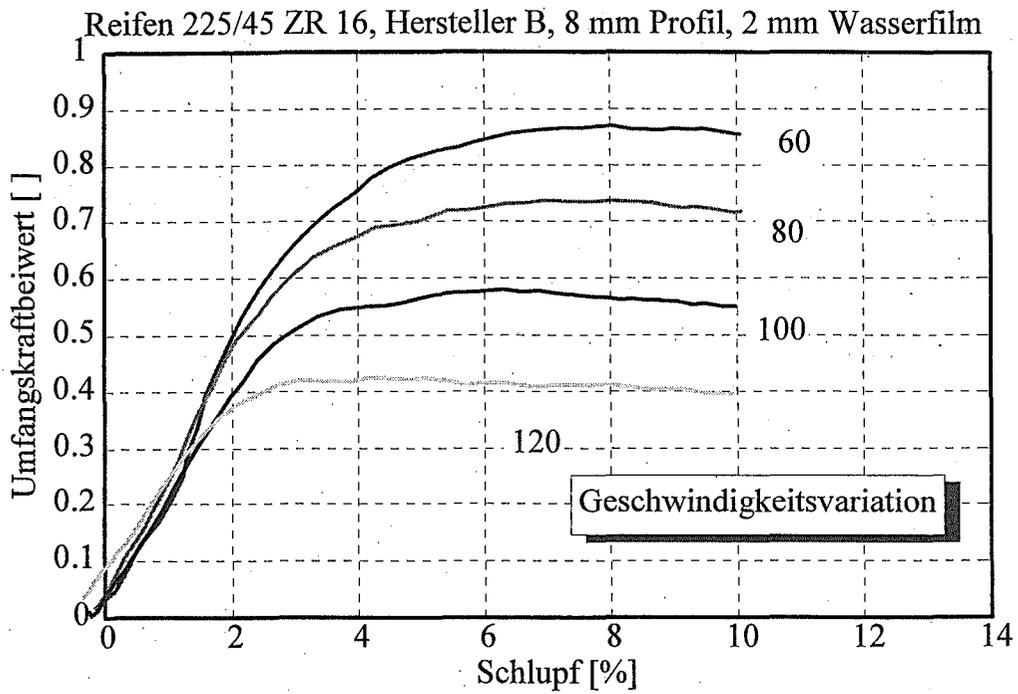


Bild 8.45: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

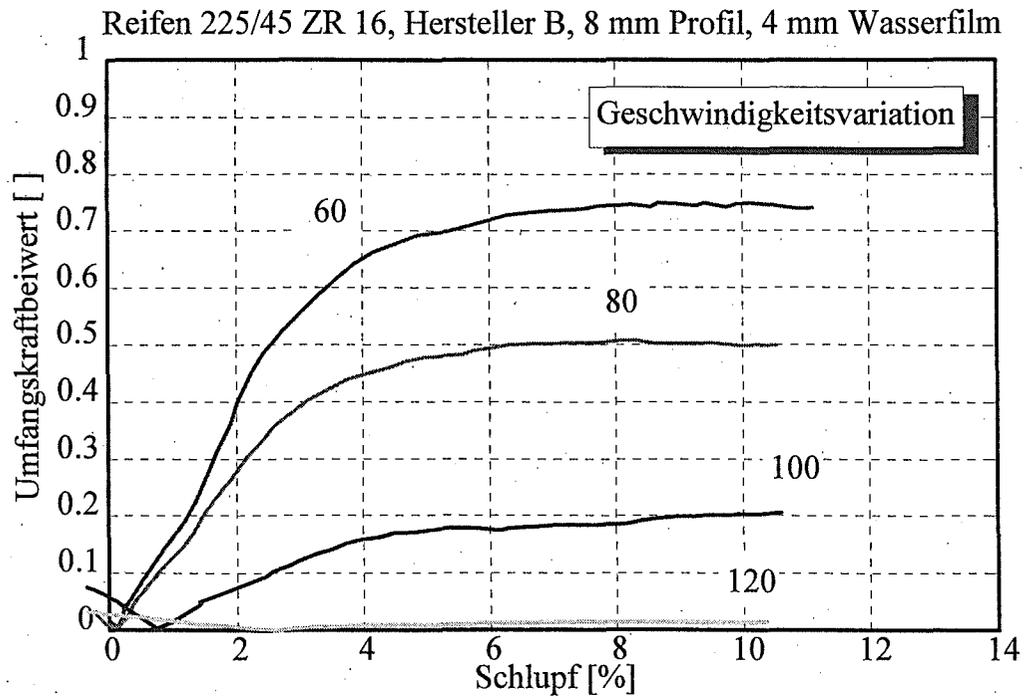


Bild 8.46: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.8 Reifenbreite 225, Hersteller C, 2 mm Profil

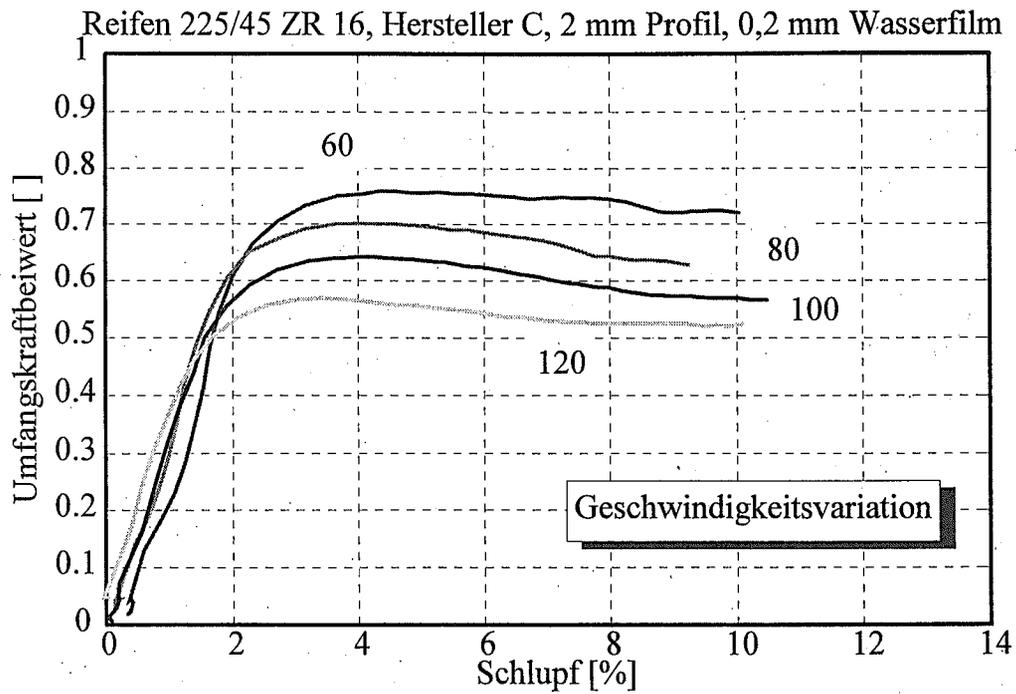


Bild 8.47: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

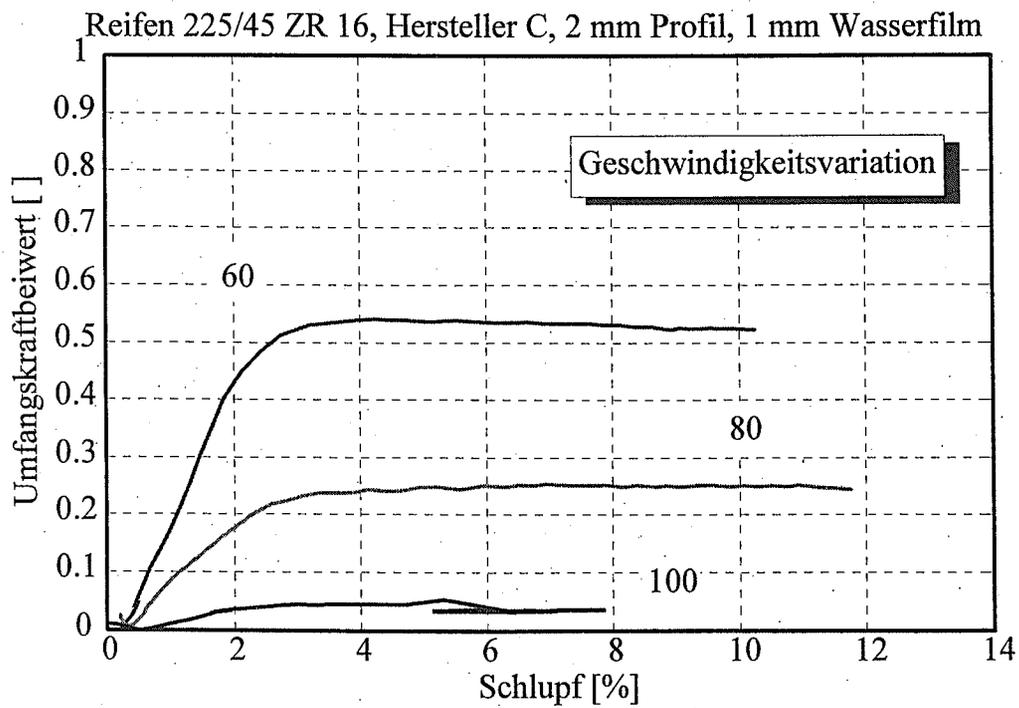


Bild 8.48: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

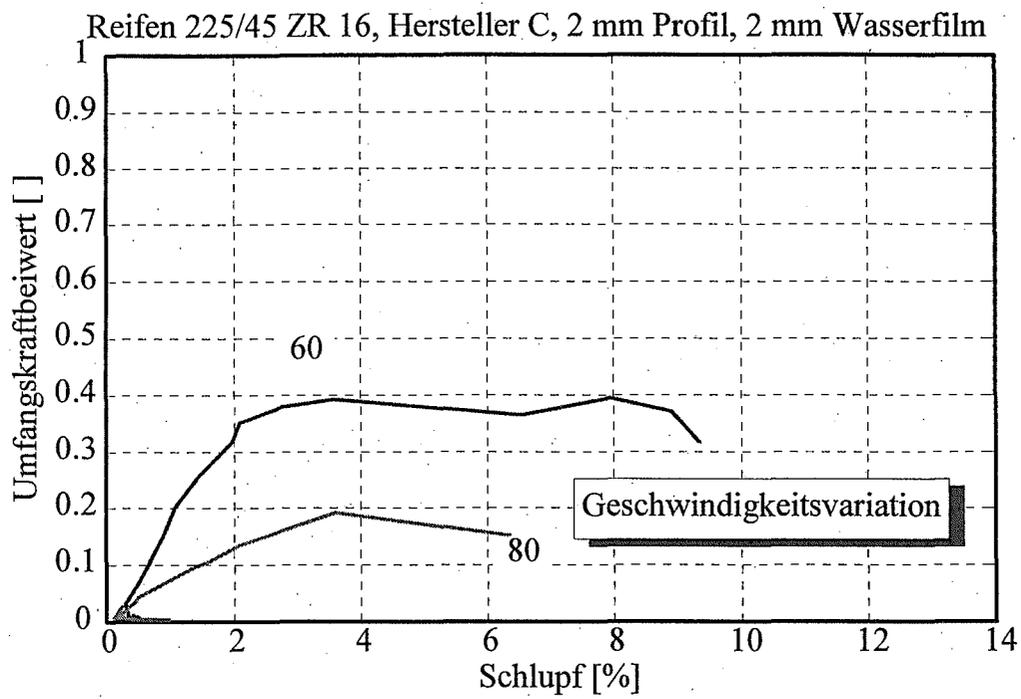


Bild 8.49: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.9 Reifenbreite 225, Hersteller C, 5 mm Profil

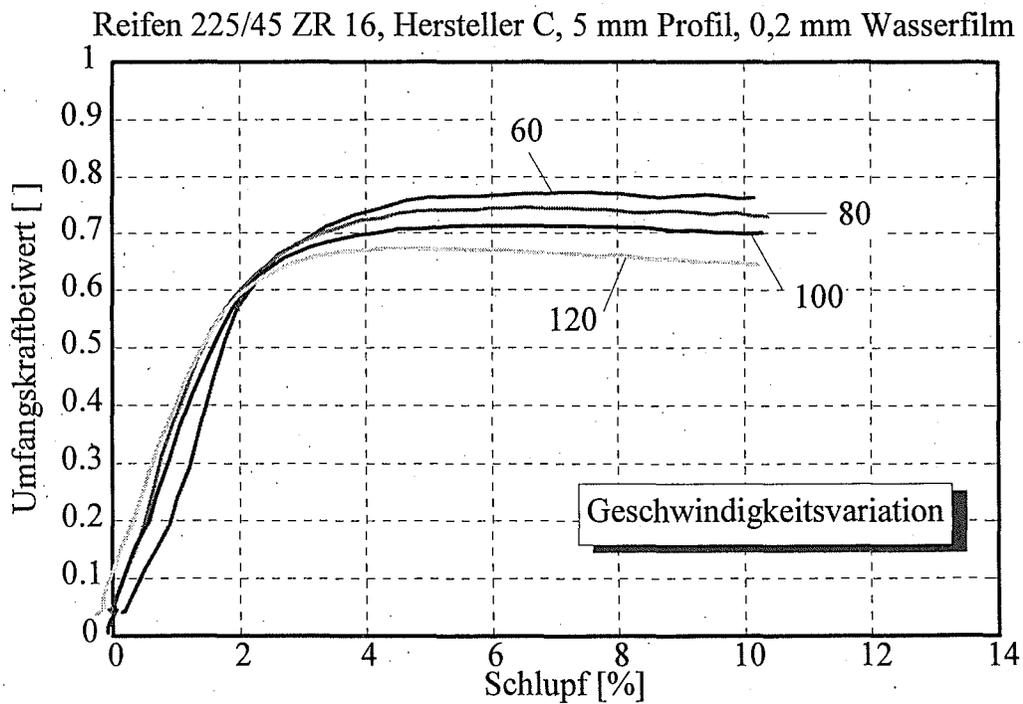


Bild 8.51: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

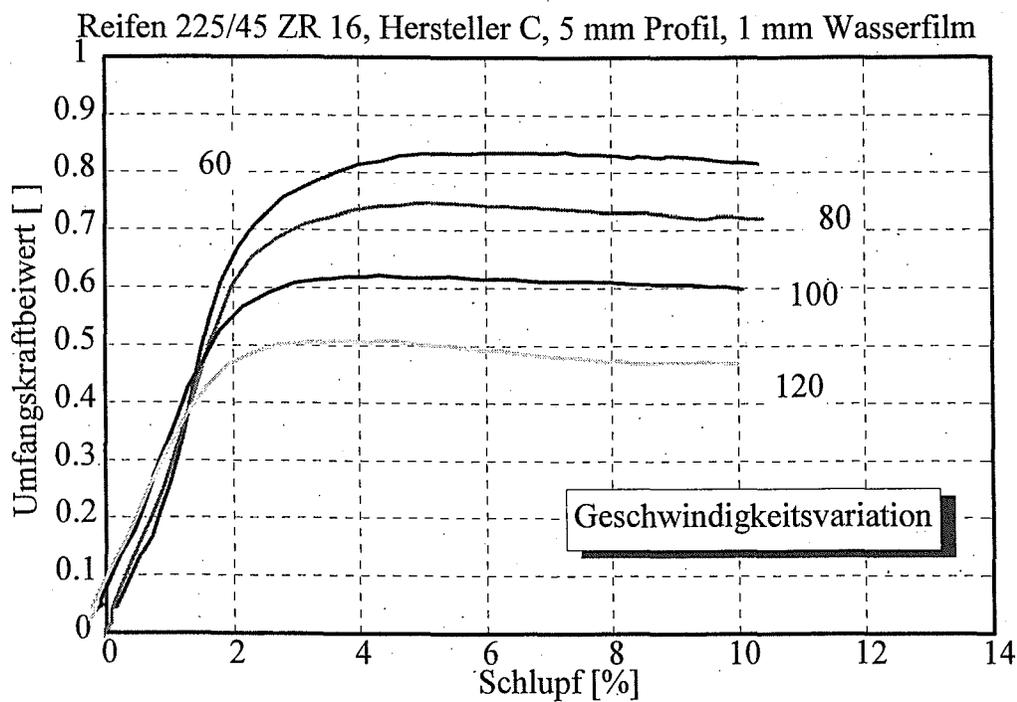


Bild 8.52: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

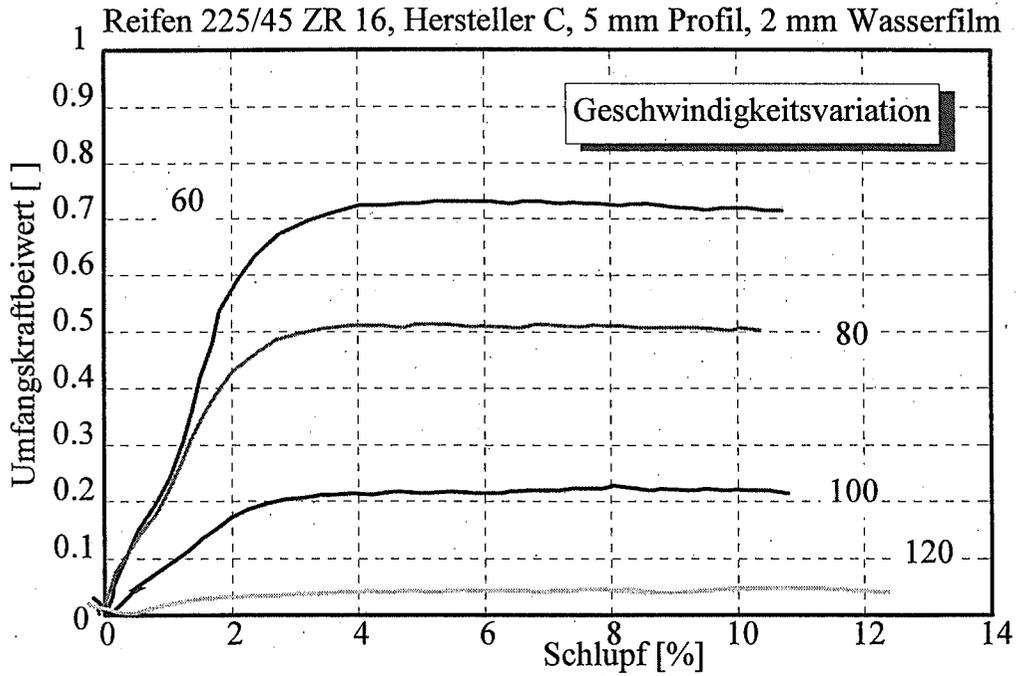


Bild 8.53: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

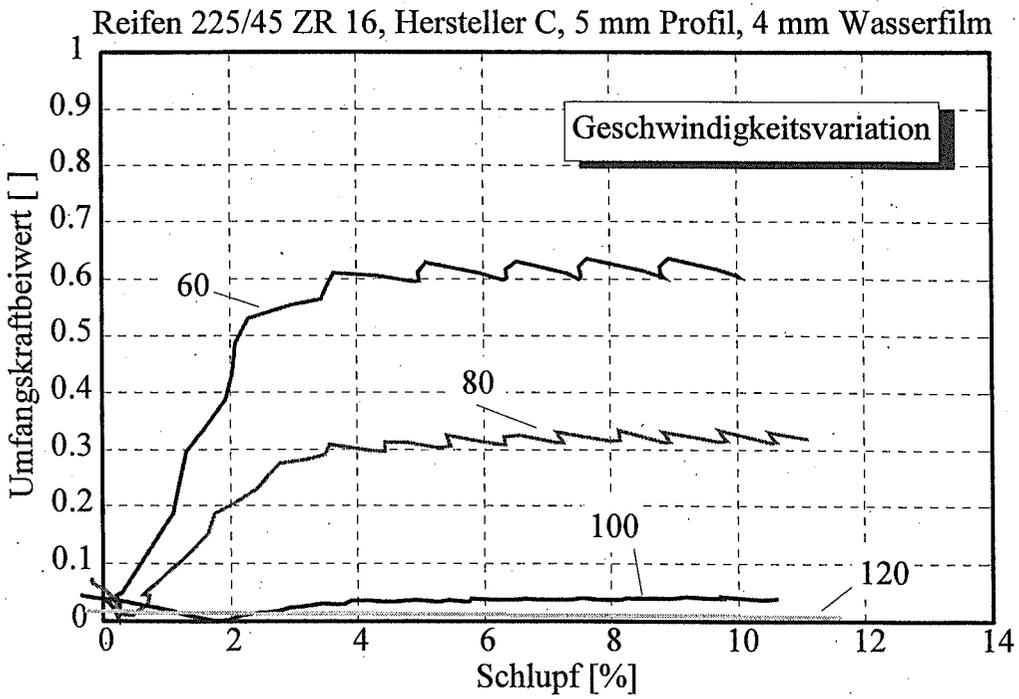


Bild 8.54: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.10 Reifenbreite 225, Hersteller C, 8 mm Profil

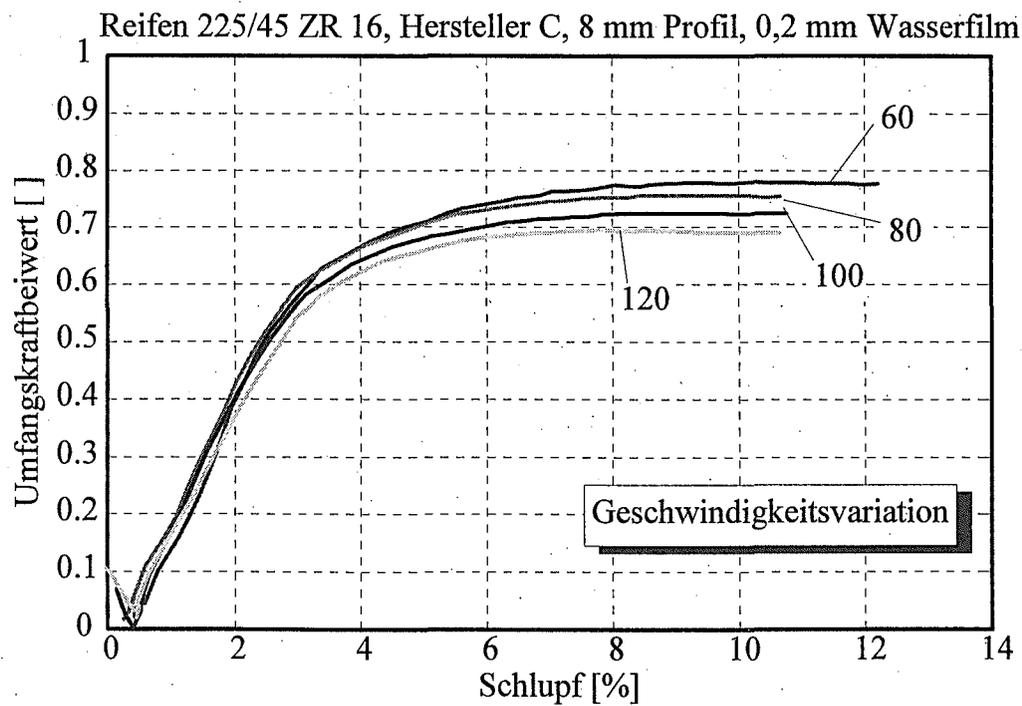


Bild 8.55: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

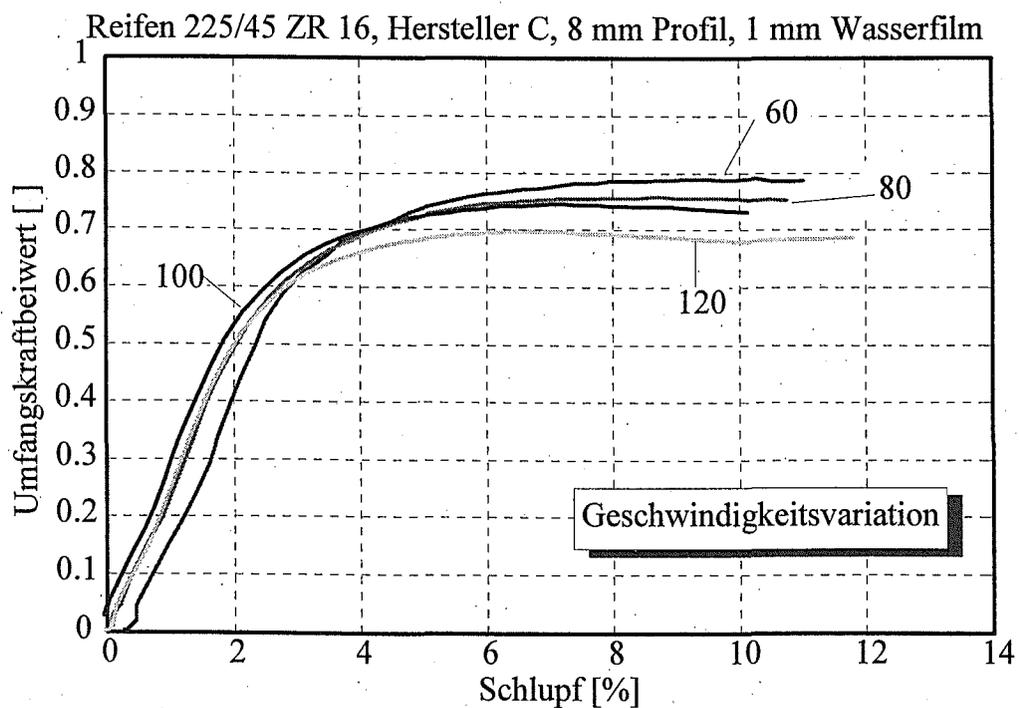


Bild 8.56: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

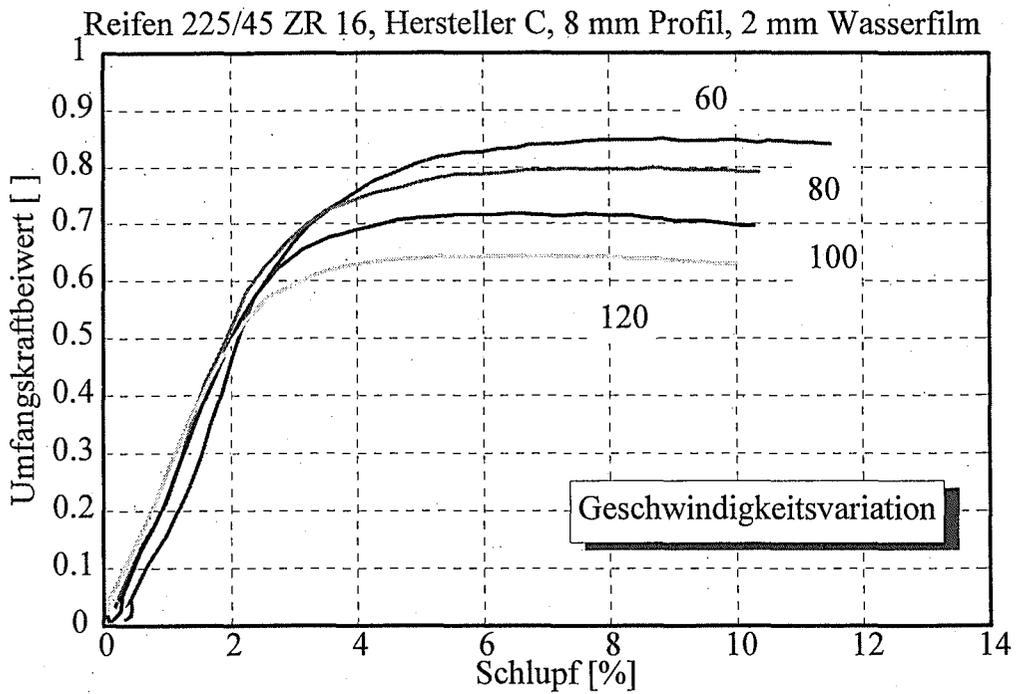


Bild 8.57: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

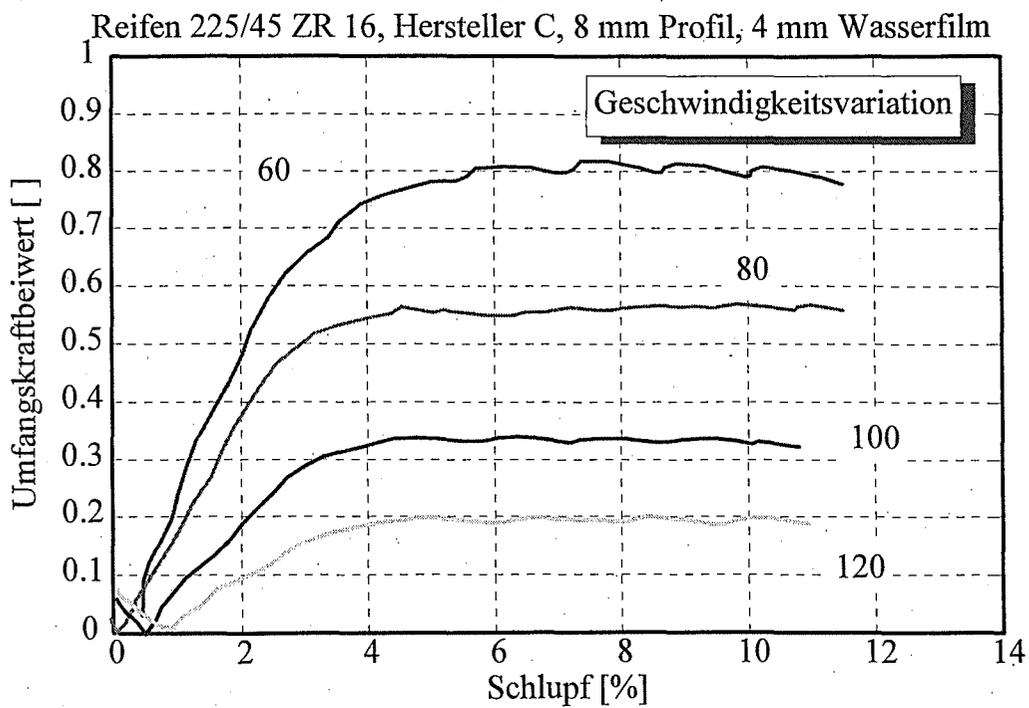


Bild 8.58: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.11 Reifenbreite 175, Hersteller A, 2 mm Profil

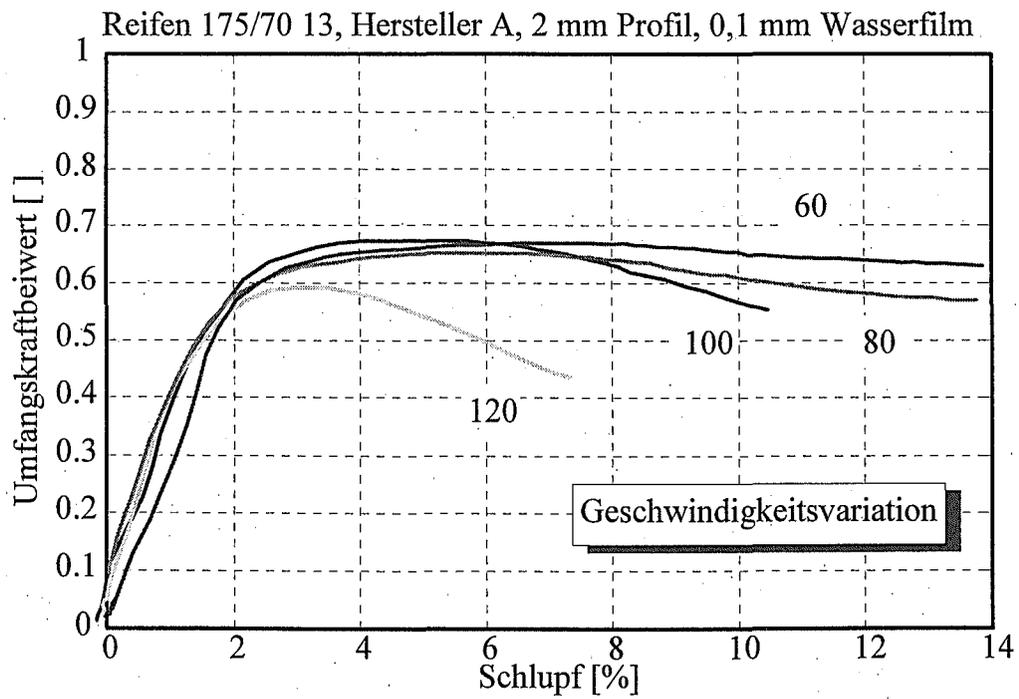


Bild 8.59: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

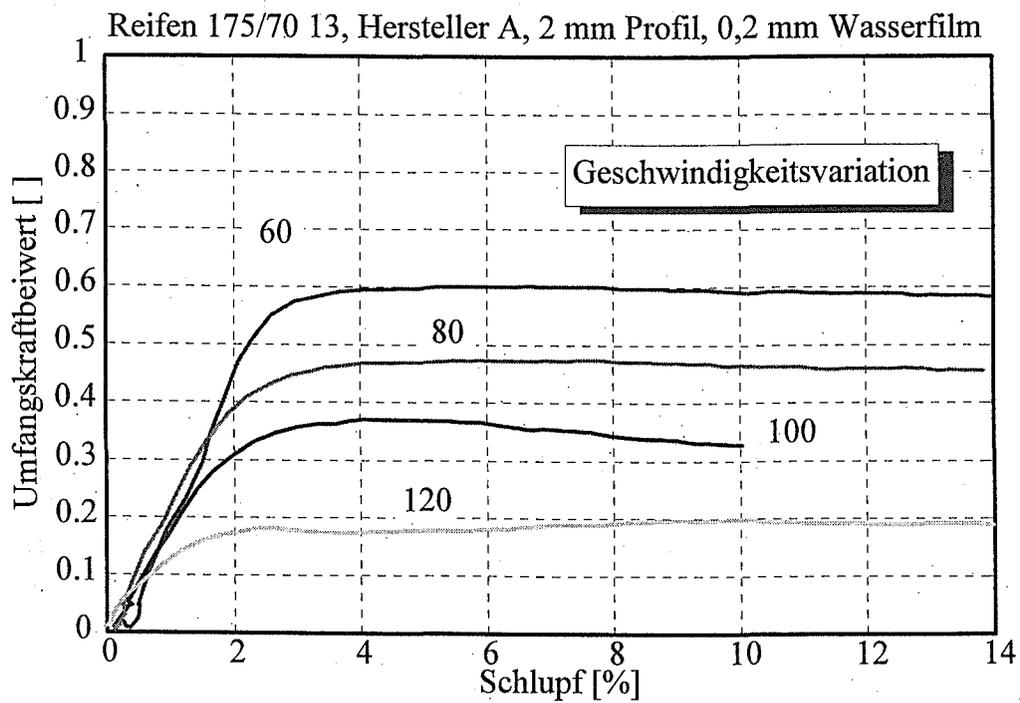


Bild 8.60: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

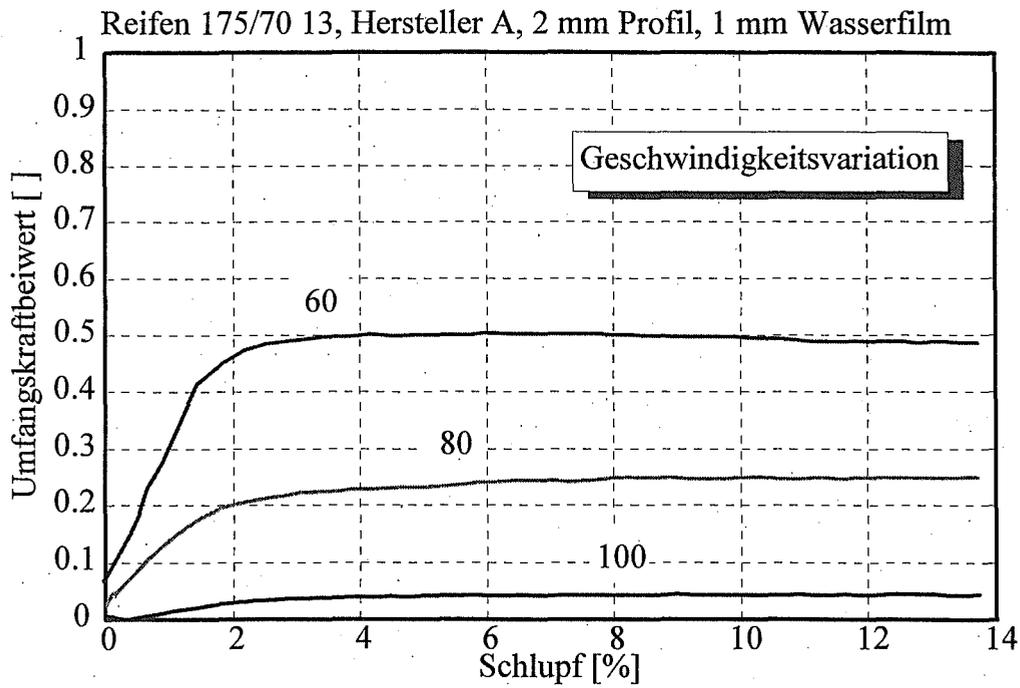


Bild 8.61: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

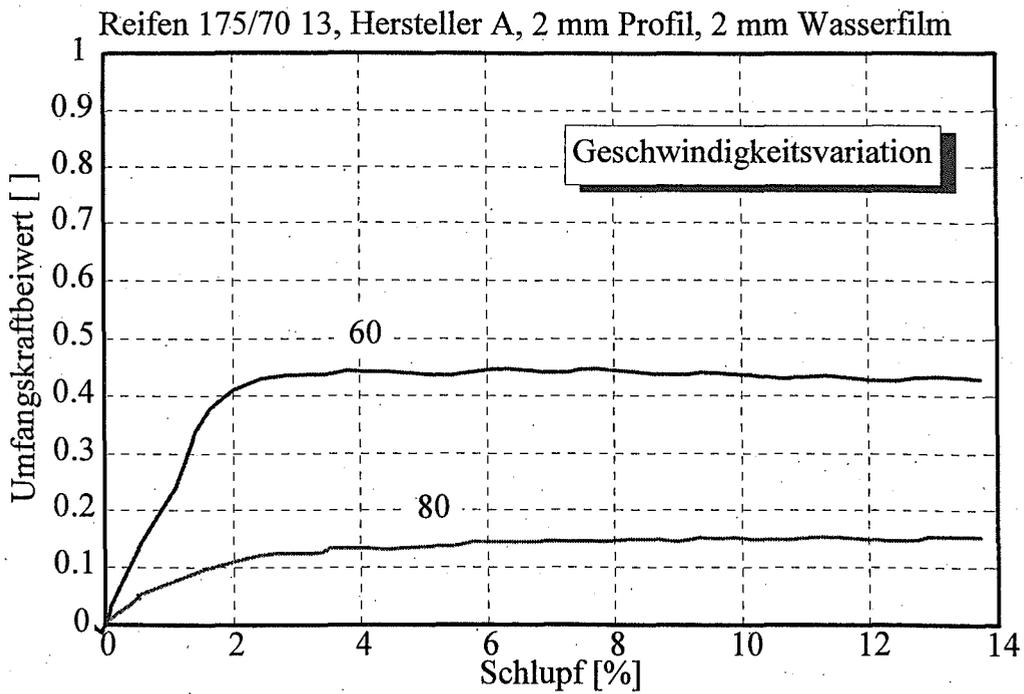


Bild 8.62: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

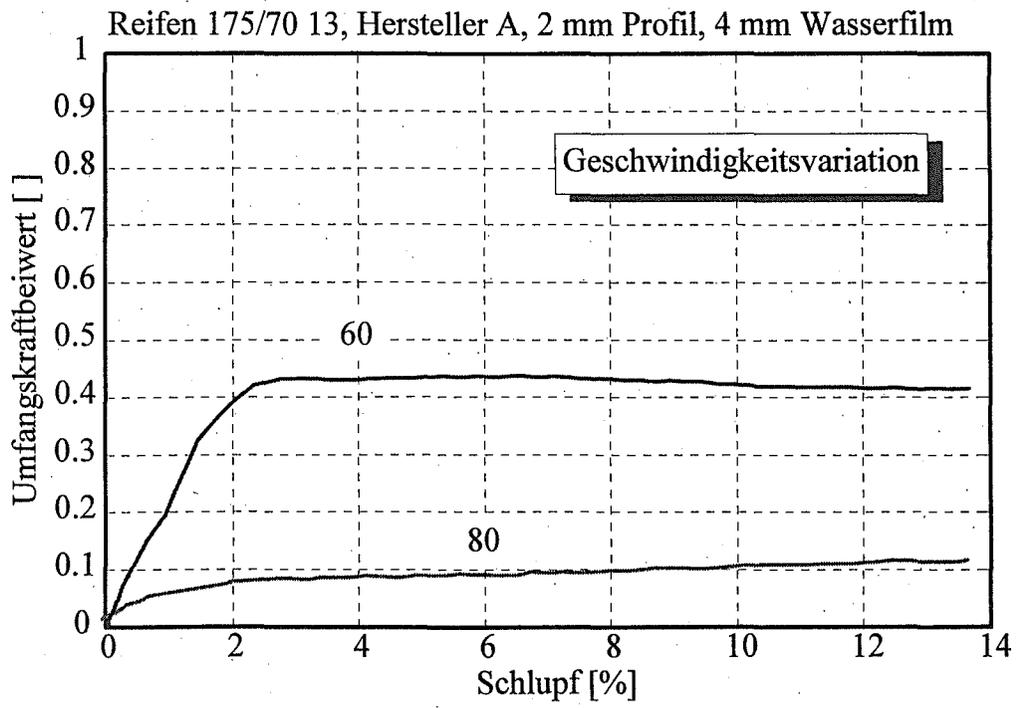


Bild 8.63: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.12 Reifenbreite 175, Hersteller A, 5 mm Profil

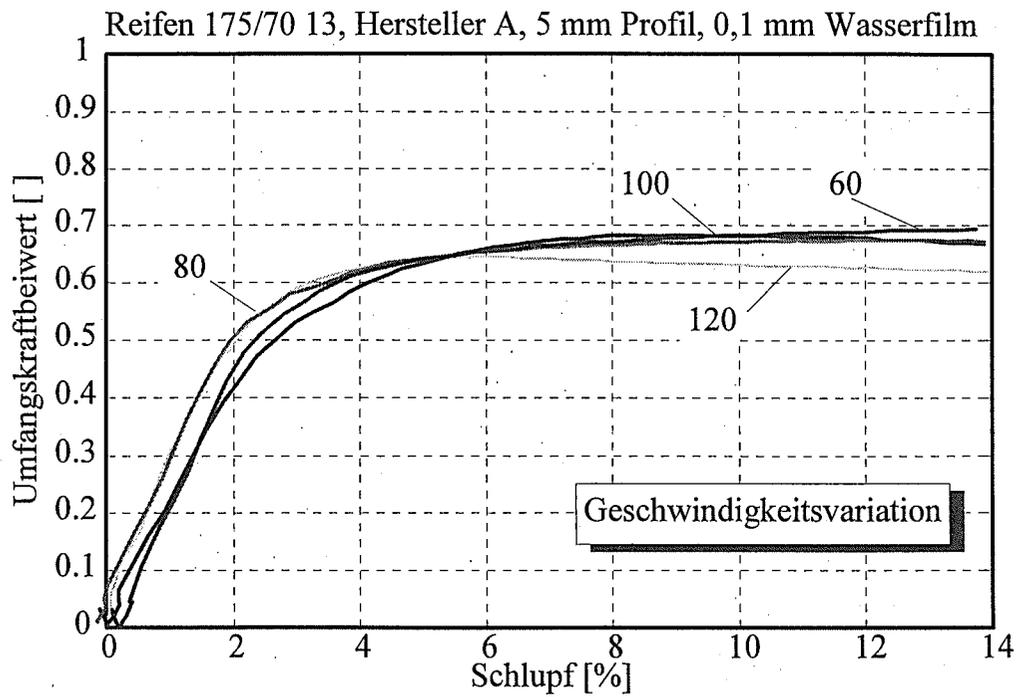


Bild 8.64: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

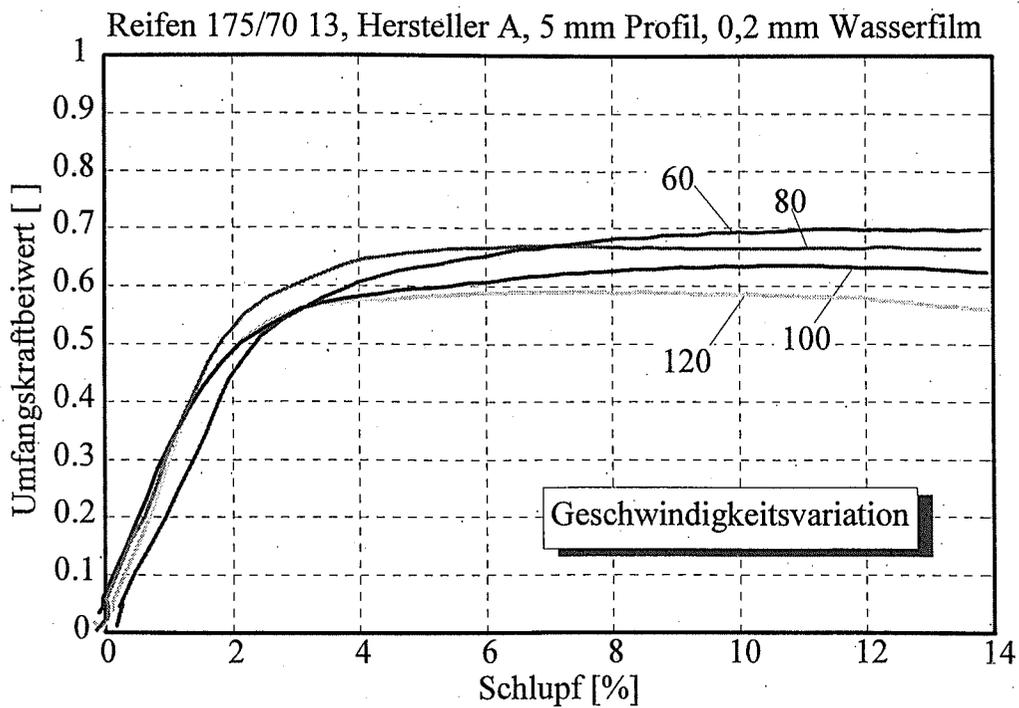


Bild 8.65: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

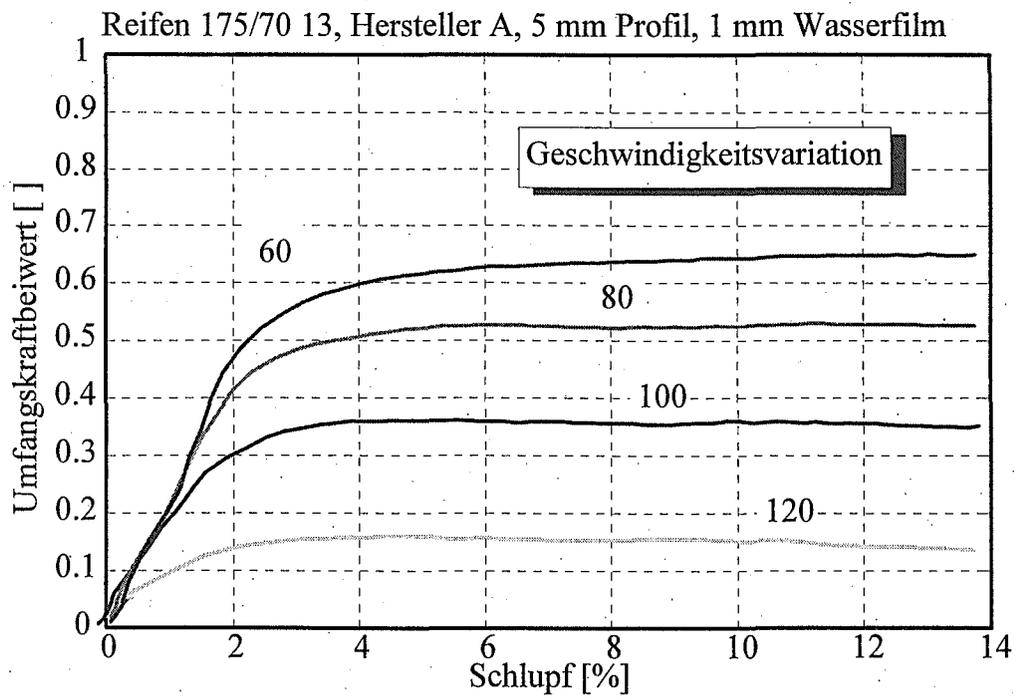


Bild 8.66: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

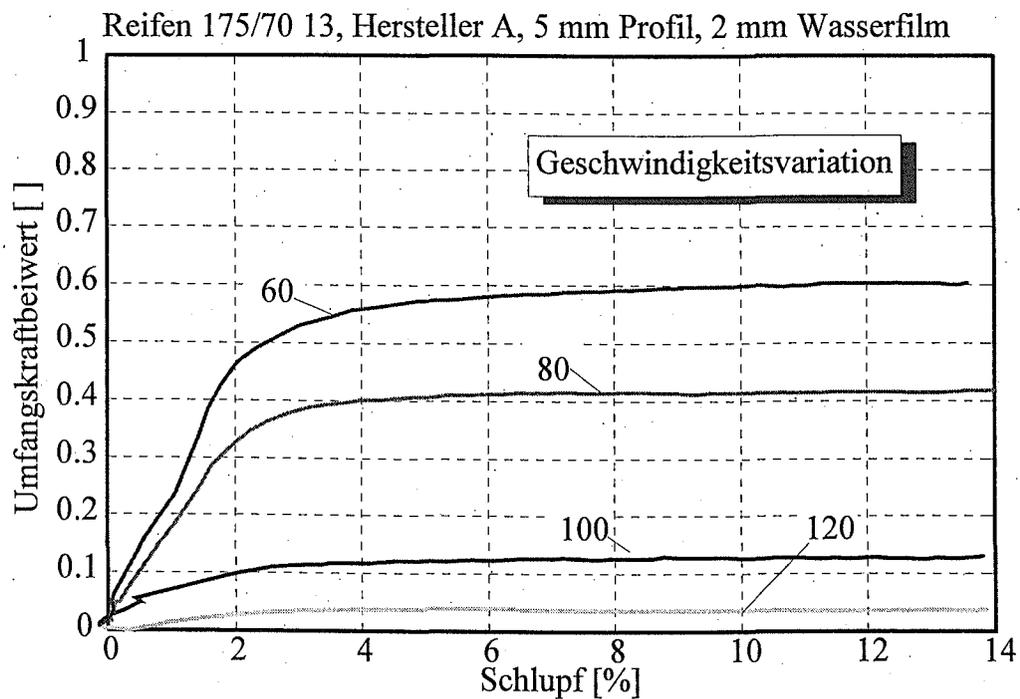


Bild 8.67: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

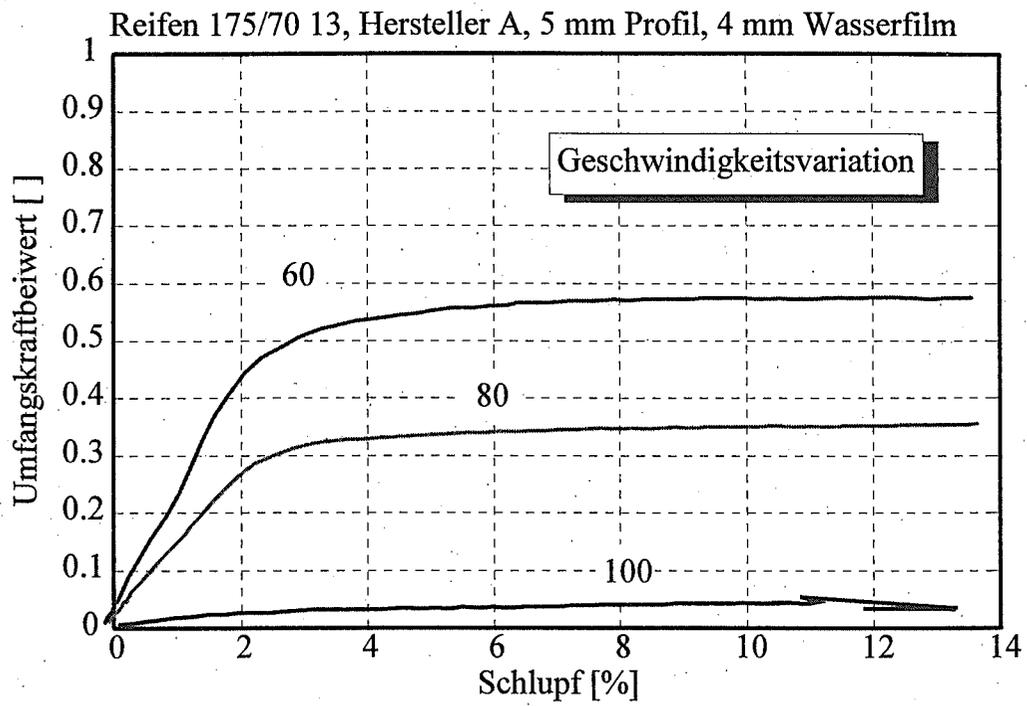


Bild 8.68: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.13 Reifenbreite 175, Hersteller A, 8 mm Profil

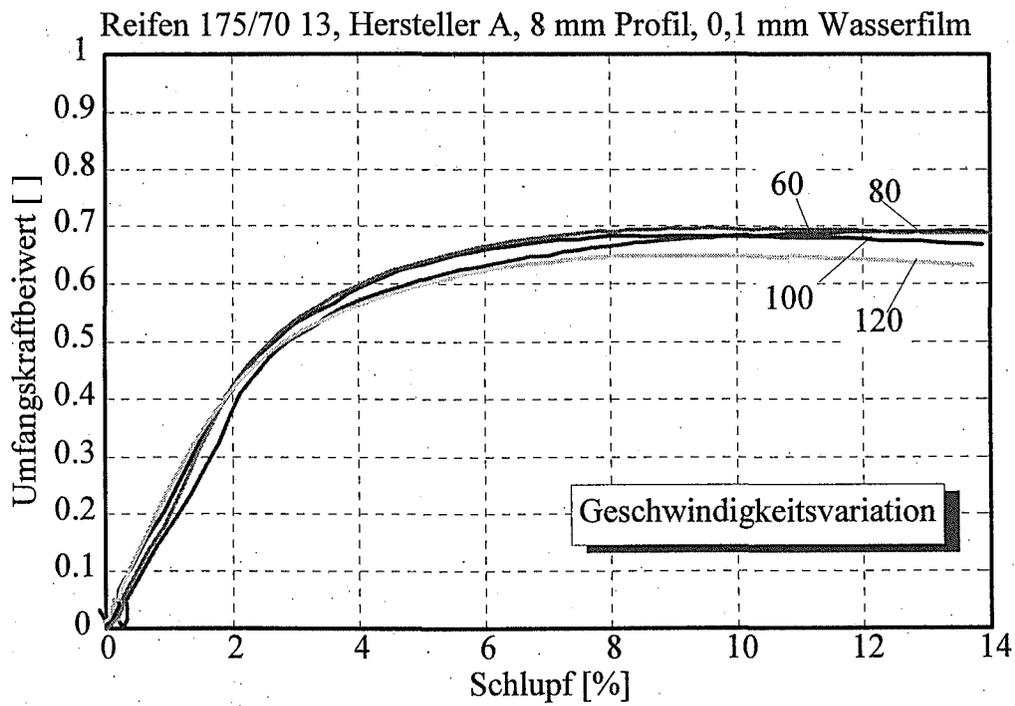


Bild 8.69: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

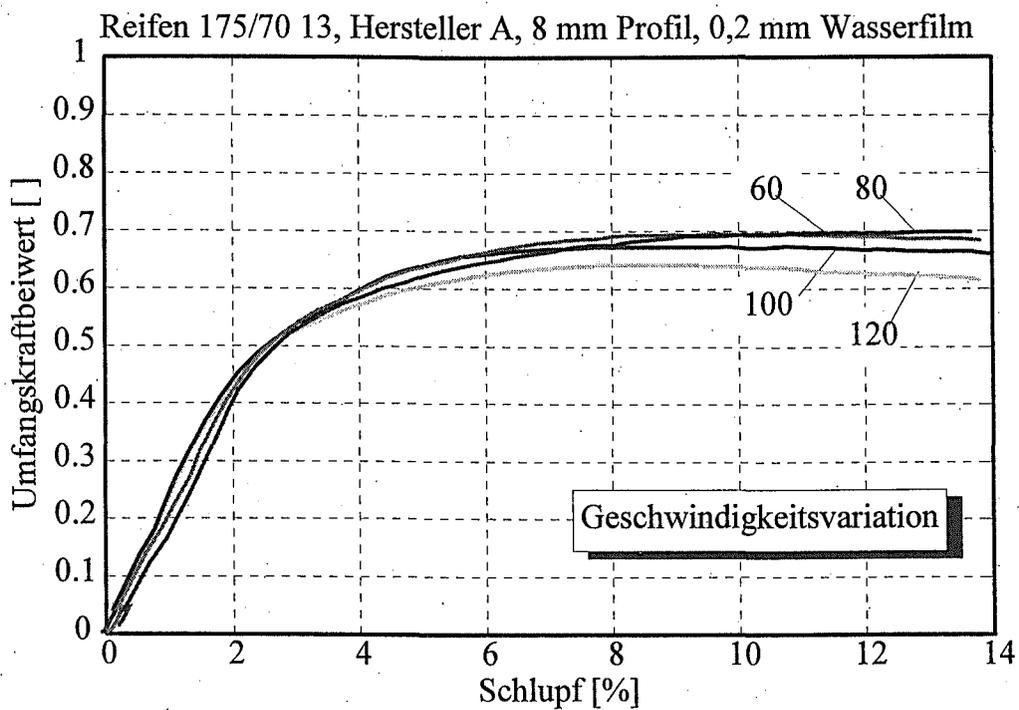


Bild 8.70: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

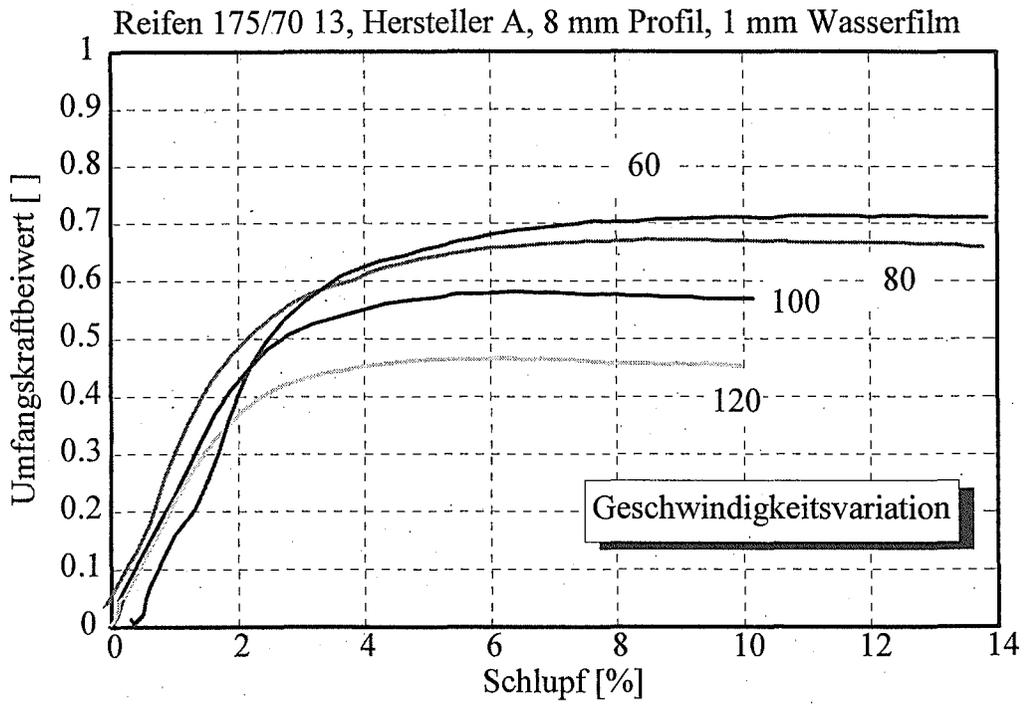


Bild 8.71: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

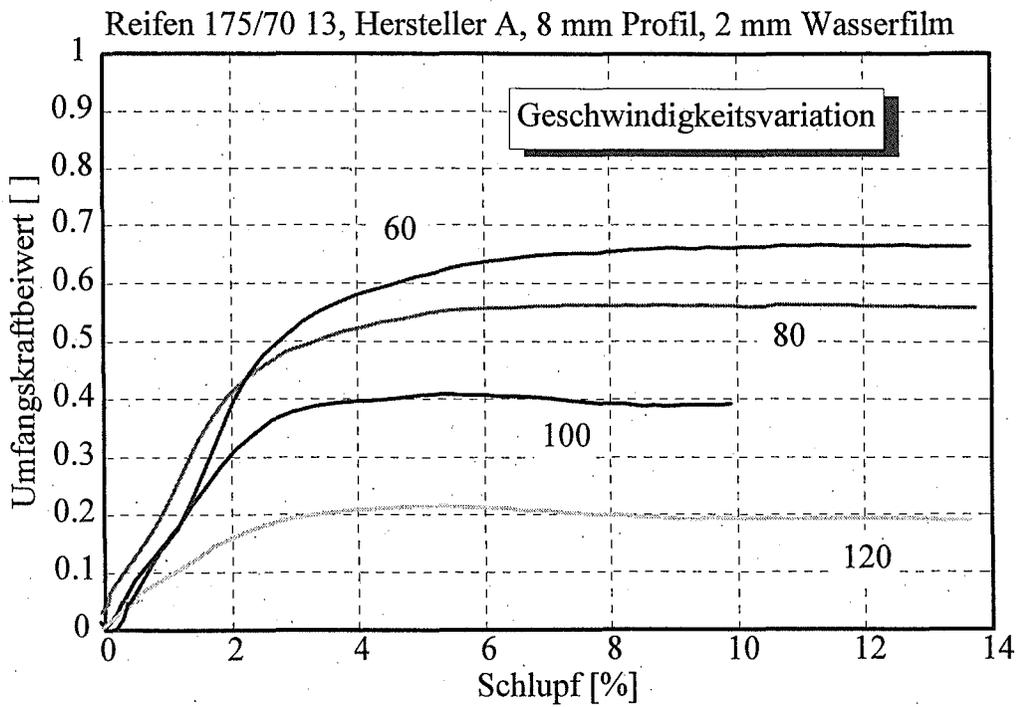


Bild 8.72: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

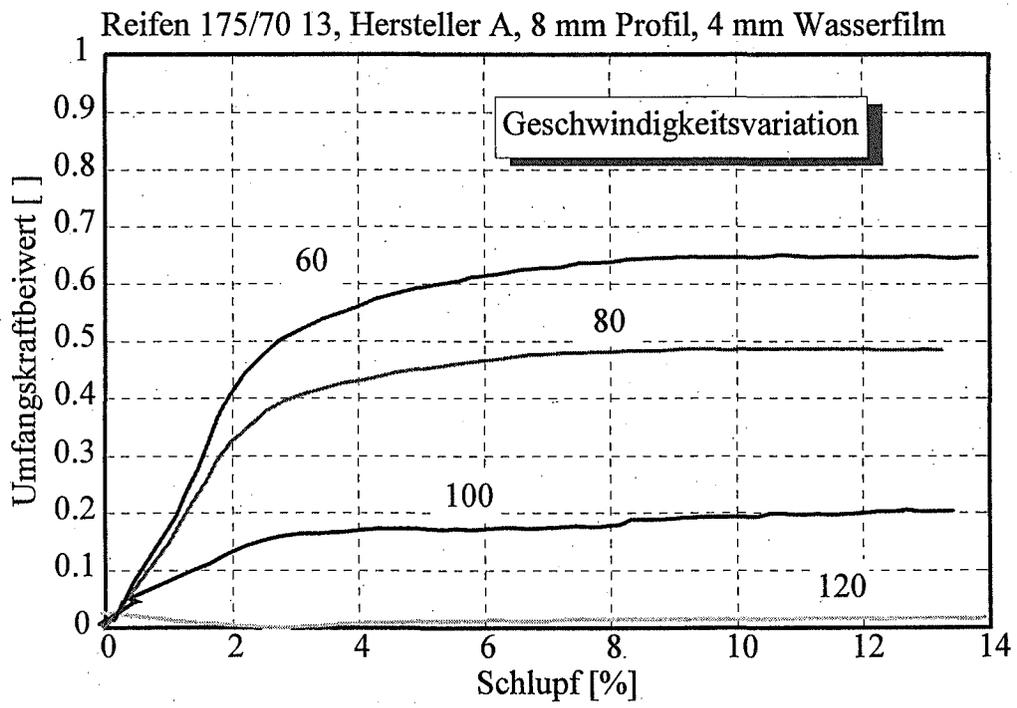


Bild 8.73: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.14 Reifenbreite 155, Hersteller A, 2 mm Profil

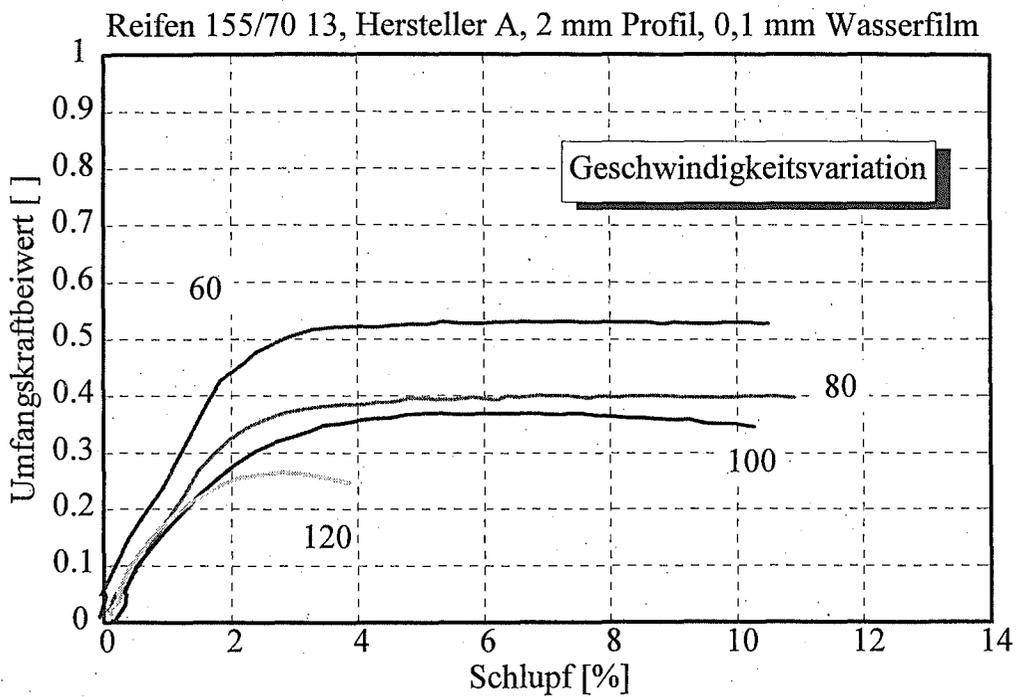


Bild 8.74: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

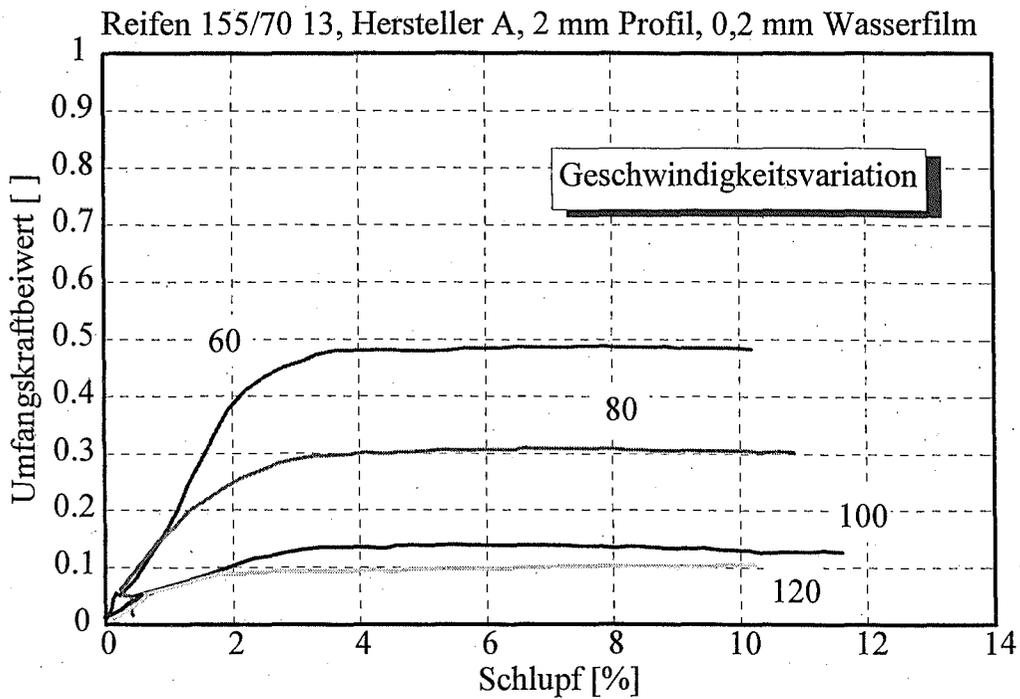


Bild 8.75: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

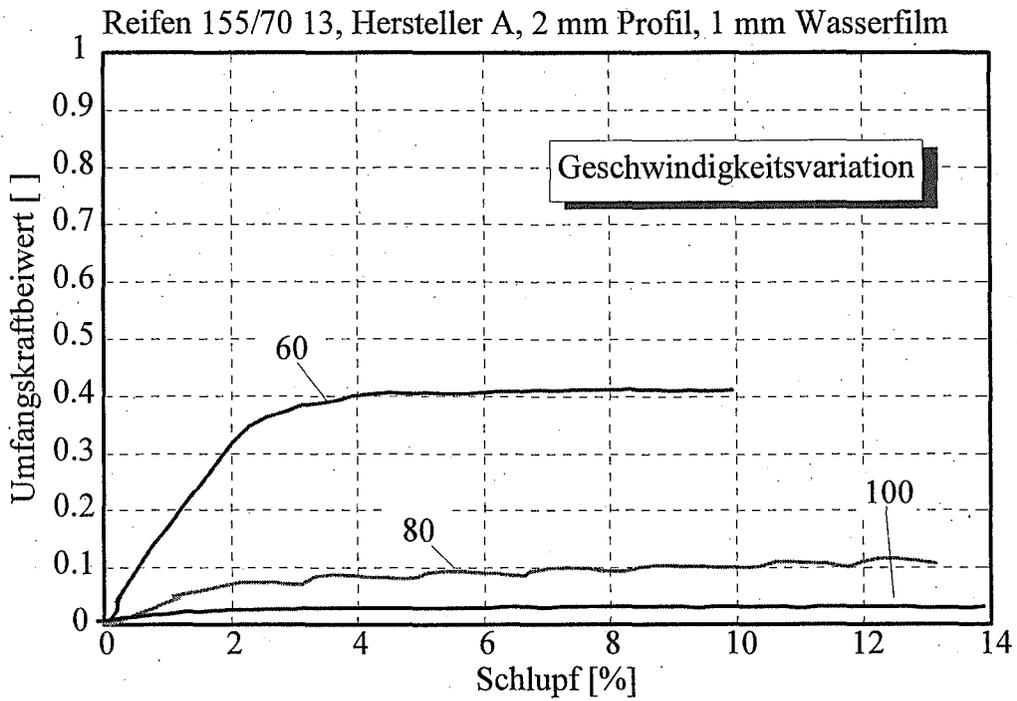


Bild 8.76: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

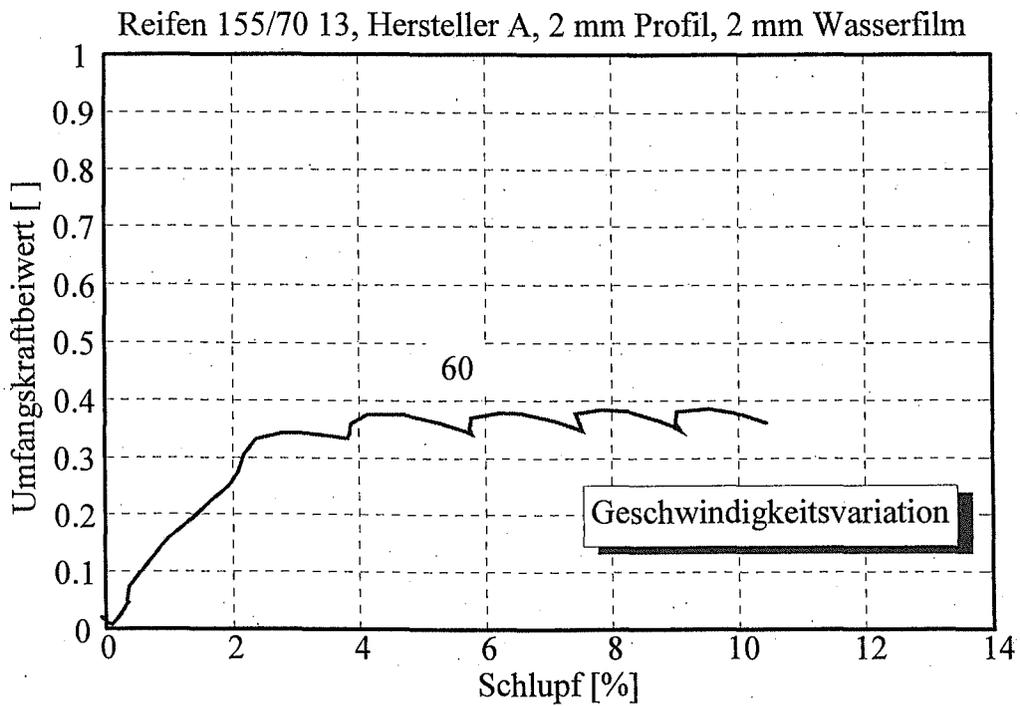


Bild 8.77: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

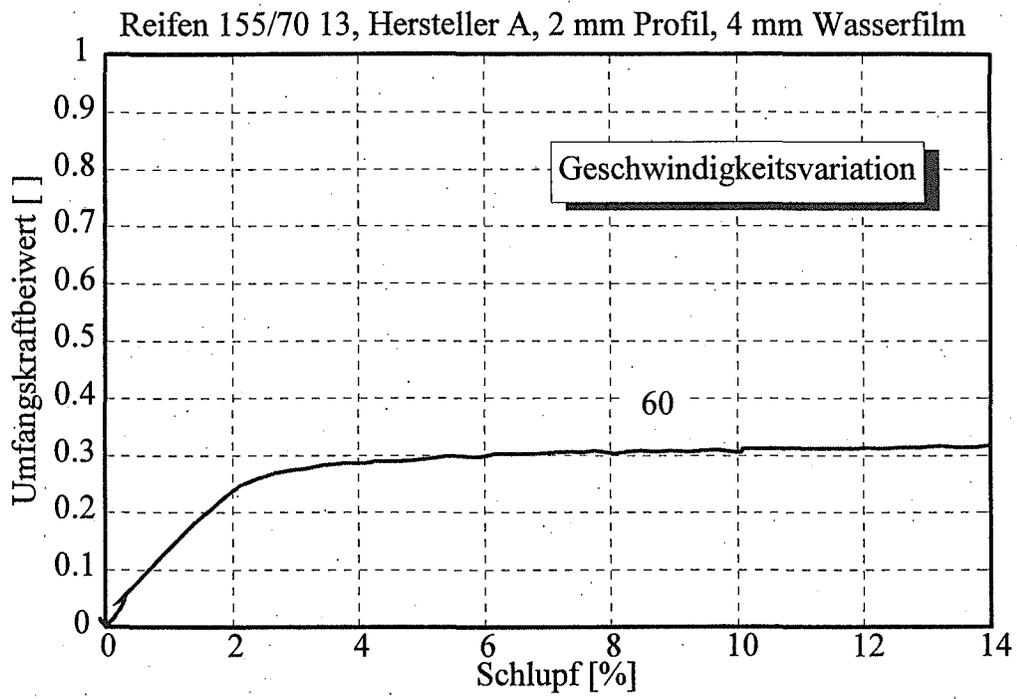


Bild 8.78: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.15 Reifenbreite 155, Hersteller A, 5 mm Profil

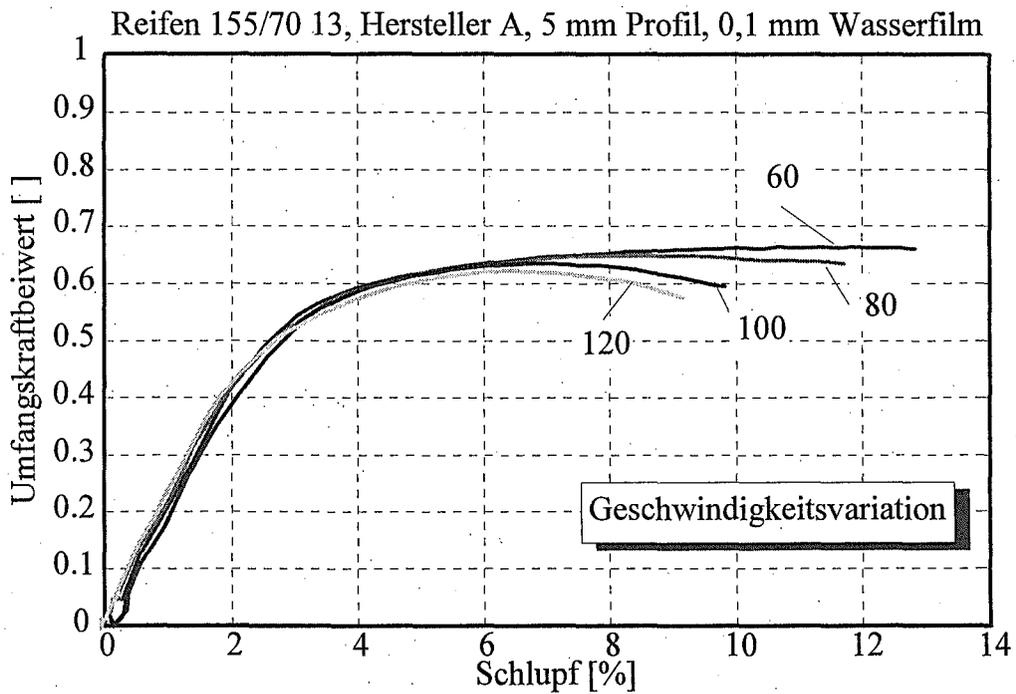


Bild 8.79: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

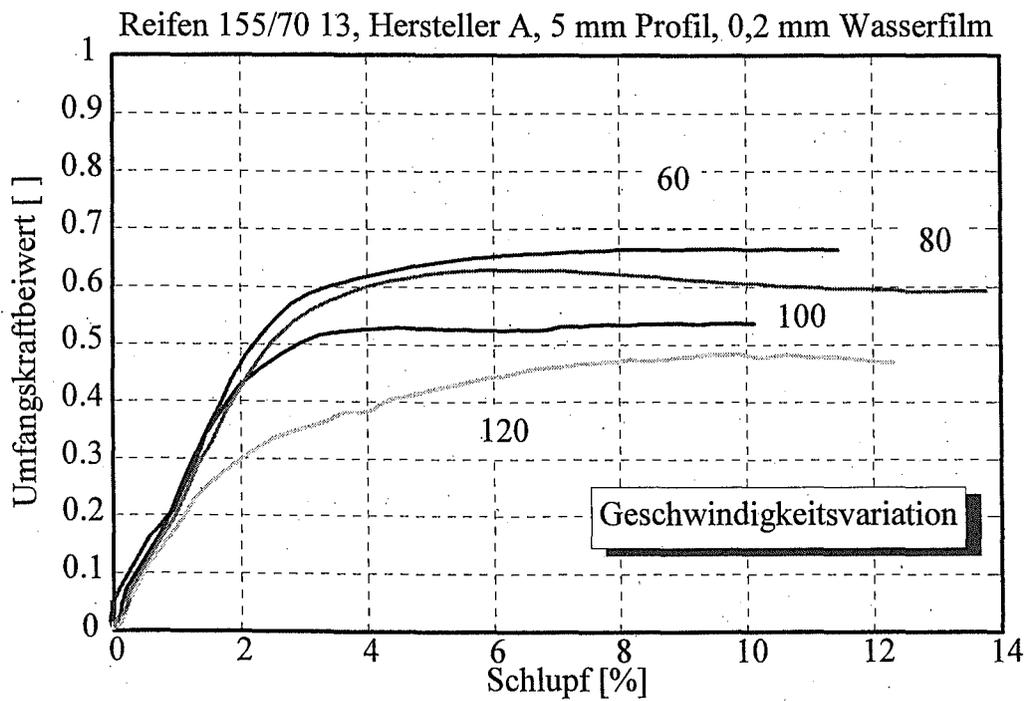


Bild 8.80: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

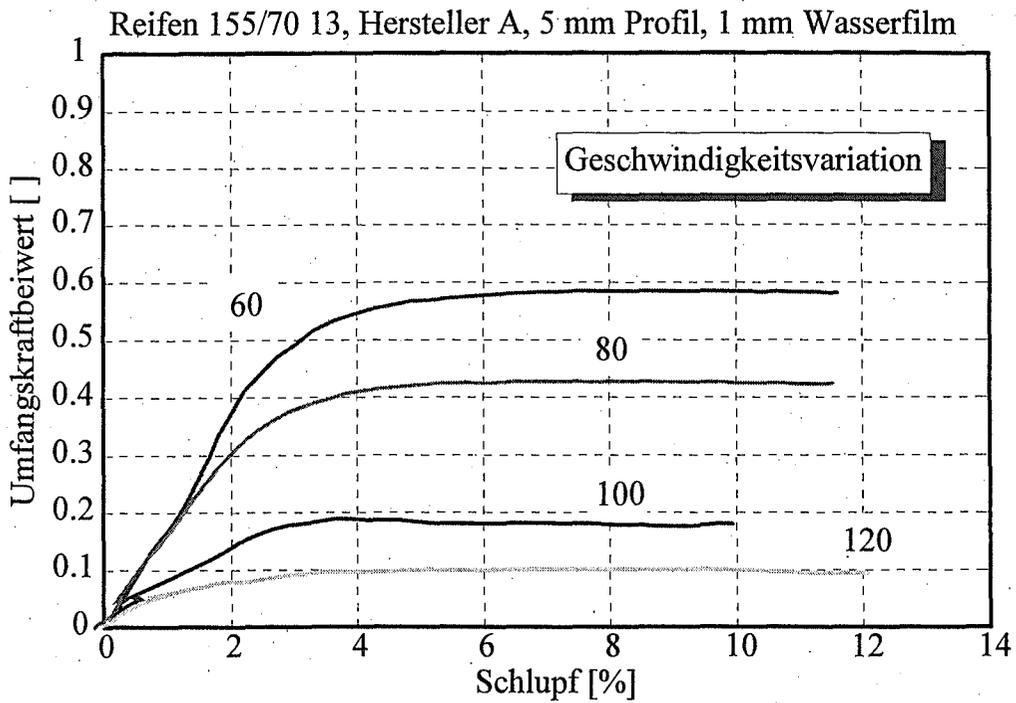


Bild 8.81: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

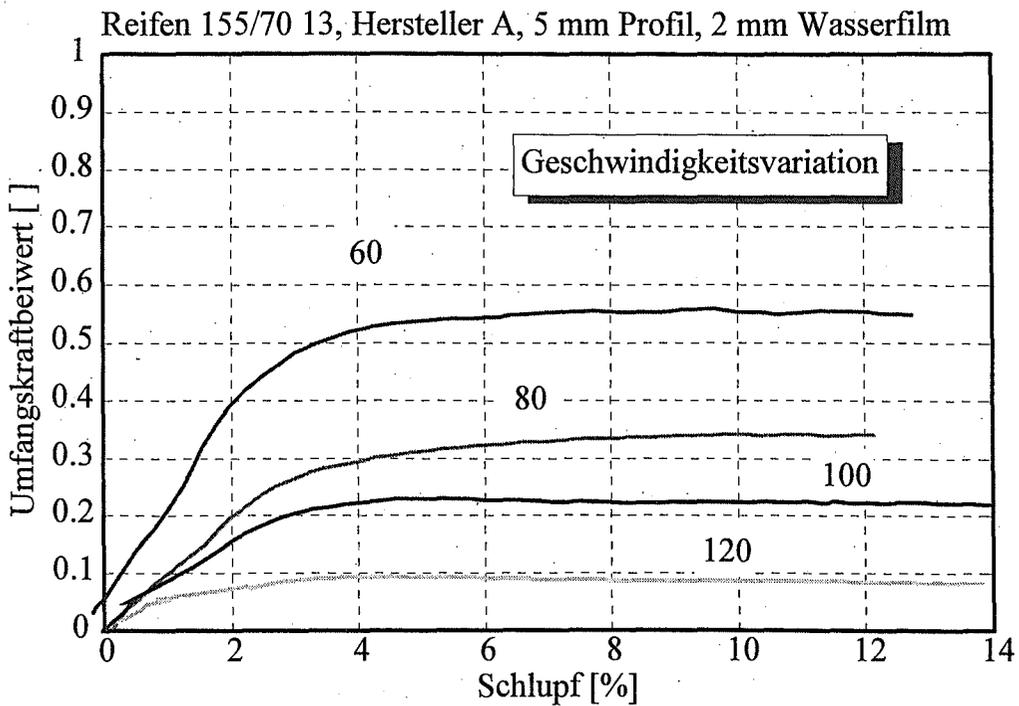


Bild 8.82: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

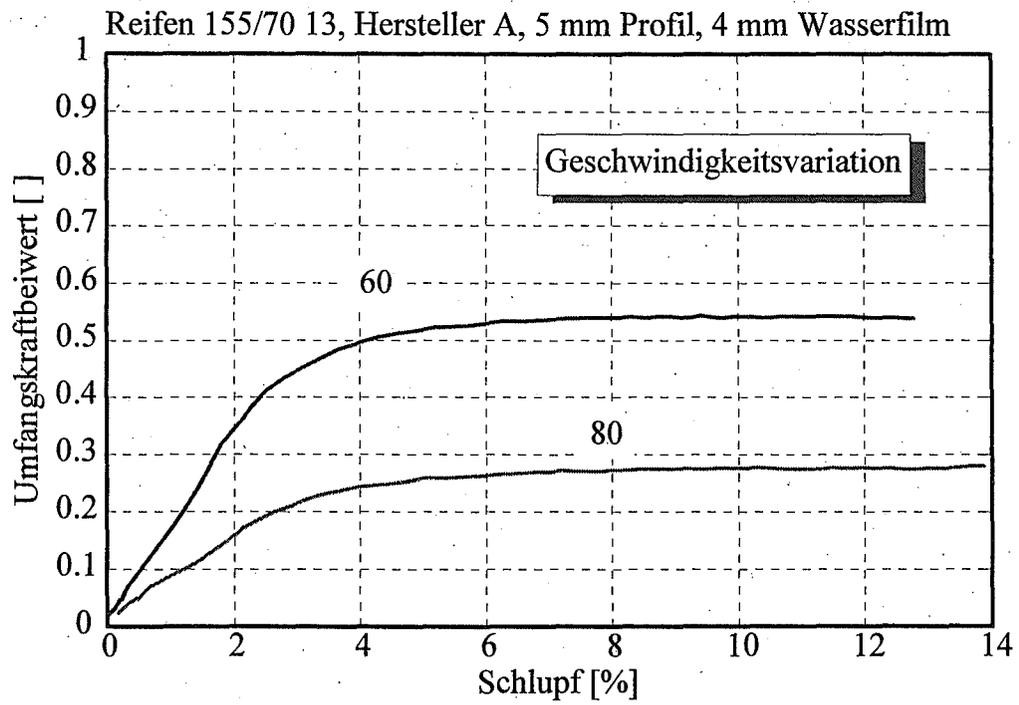


Bild 8.83: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## 8.2.16 Reifenbreite 155, Hersteller A, 8 mm Profil

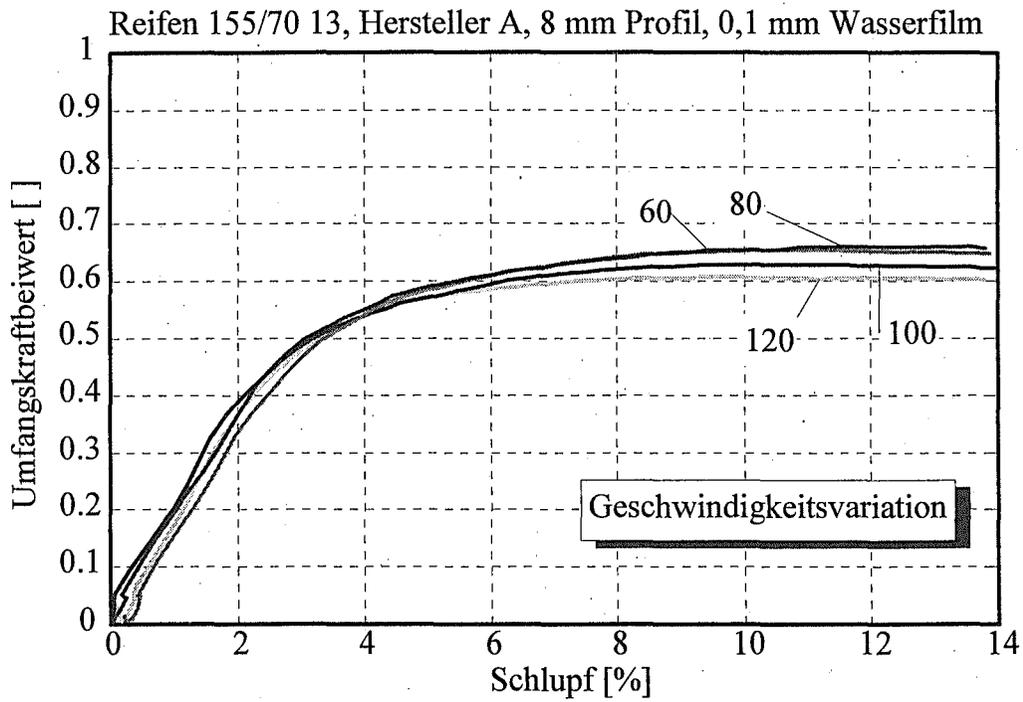


Bild 8.84: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

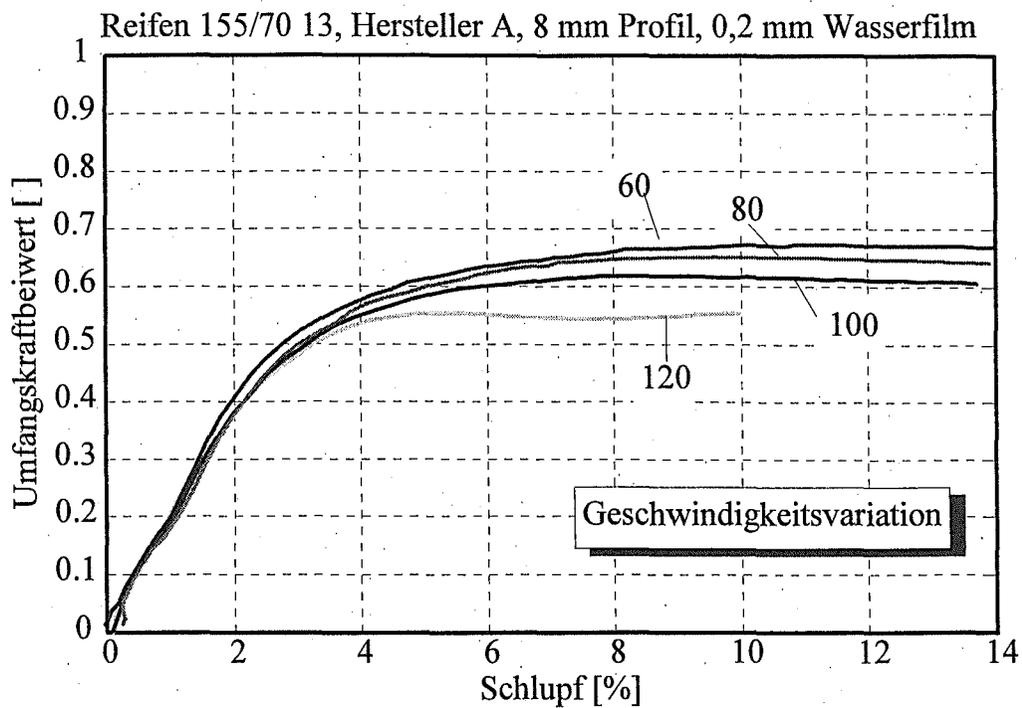


Bild 8.85: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

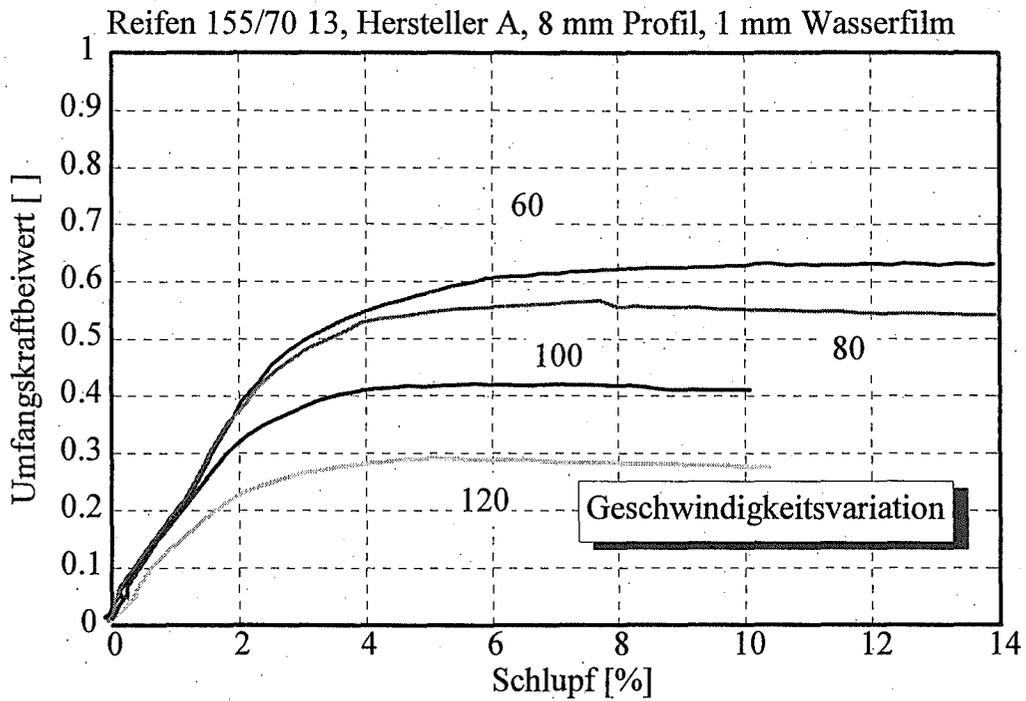


Bild 8.86: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

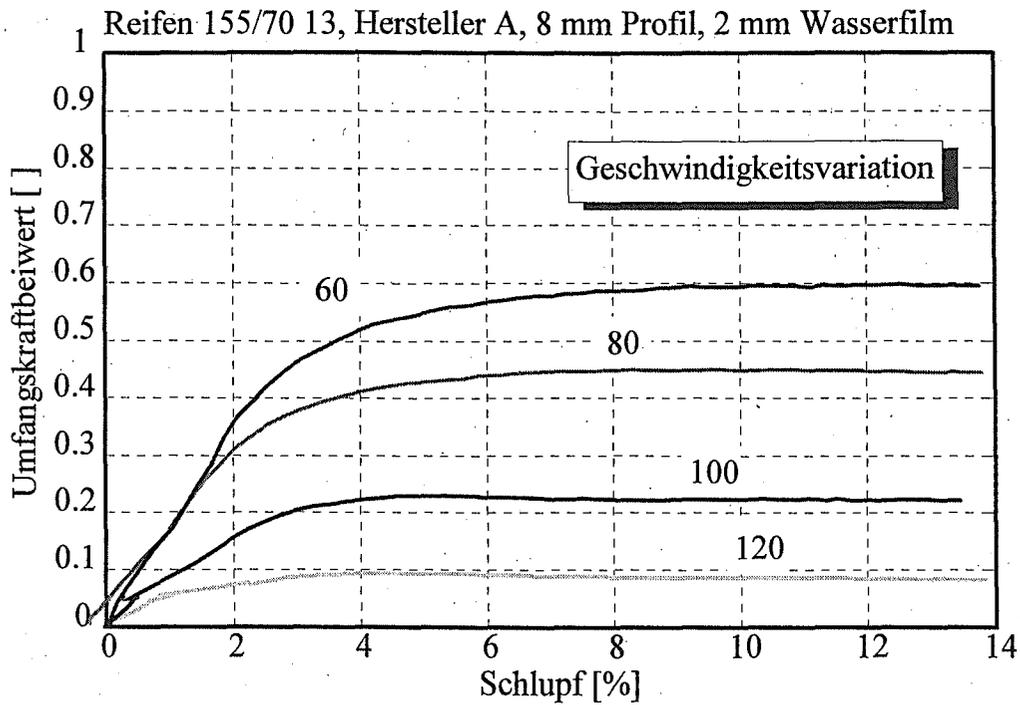


Bild 8.87: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

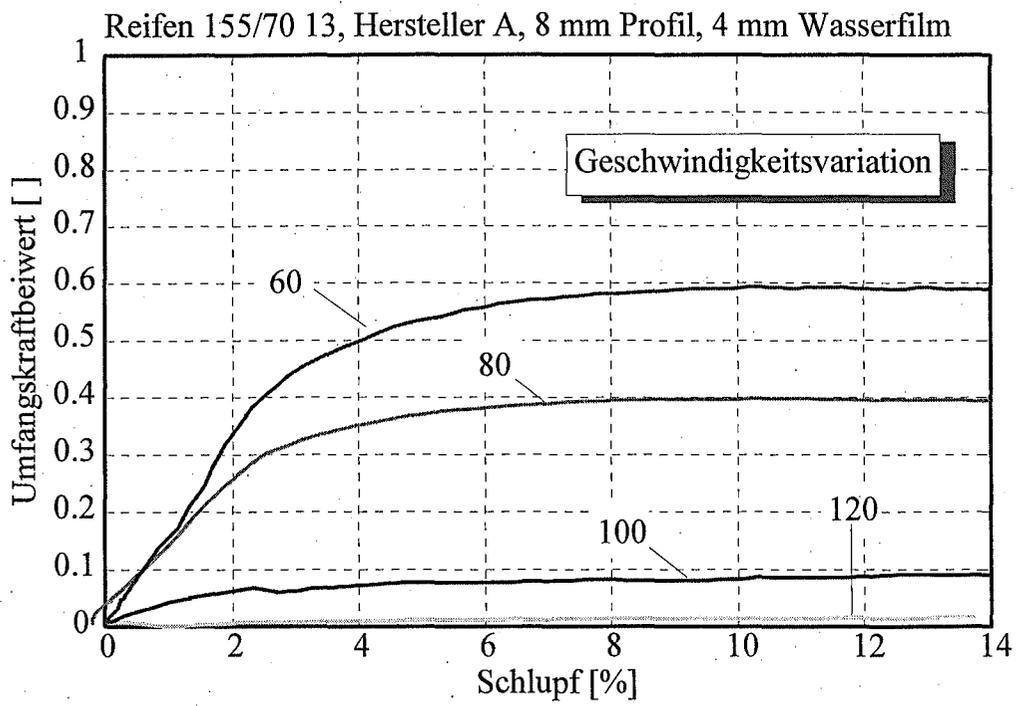


Bild 8.88: Kraftschlußkurven, Geschwindigkeitsvariation

## Schriftenreihe

**Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen**

## Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

- F1: **Einfluß der Korrosion auf die passive Sicherheit von Pkw**  
von E. Faerber und G.-D. Wobben  
88 Seiten, 1993 DM 23,50
- F2: **Kriterien für die Prüfung von Motorradhelmen**  
von W. König, H. Werner, E. Schuller, G. Beier und W. Spann  
80 Seiten, 1993 DM 25,50
- F3: **Sicherheit von Motorradhelmen**  
von H. Zellmer  
52 Seiten, 1993 DM 21,00
- F4: **Weiterentwicklung der Abgassonderuntersuchung**  
Teil 1: Vergleich der Ergebnisse aus Abgasuntersuchung und Typprüfverfahren  
von A. Richter und G. Michelmann  
Teil 2: Praxiserprobung des vorgesehenen Prüfverfahrens für Fahrzeuge mit Katalysator  
von Chr. Albus  
80 Seiten, 1993 DM 26,00
- F5: **Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz**  
von R. Bamberg und H. Zellmer  
56 Seiten, 1994 DM 21,00
- F6: **Sicherheit von Fahrradanhängern zum Personentransport**  
von D. Wobben und H. Zahn  
64 Seiten, 1994 DM 24,00
- F7: **Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlicher Lichttransmission von Pkw-Scheiben**  
Teil 1: Kontrastwahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe  
von P. Junge  
Teil 2: Kontrastwahrnehmung in der Dämmerung bei Fahrern mit verminderter Tagessehschärfe  
von M. Chmielarz und B. Siegl  
Teil 3: Wirkung abgedunkelter Heckscheiben – Vergleichsstudie –  
von H. Derkum  
88 Seiten, 1994 DM 27,00
- F8: **Anforderungen an den Kinnschutz von Integralhelmen**  
von D. Otte, G. Schroeder, J. Eidam und B. Kraemer  
32 Seiten, 1994 DM 20,00
- F9: **Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen unter Straßenbedingungen**  
von M. Schmieder, D. Bley, M. Spickermann und V. von Zettelmann  
40 Seiten, 1994 DM 21,00
- F10: **Einsatz der Gasentladungslampe in Kfz-Scheinwerfern**  
von J. Damasky  
52 Seiten, 1995 DM 24,00
- F11: **Informationsdarstellung im Fahrzeug mit Hilfe eines Head-Up-Displays**  
von H. Mutschler  
124 Seiten, 1995 DM 32,00
- F12: **Gefährdung durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen**  
Teil 1: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern  
von H. Zellmer und M. Schmid  
Teil 2: Quantifizierung der Gefährdung von Fußgängern  
von H. Zellmer  
44 Seiten, 1995 DM 23,00
- F13: **Untersuchung rollwiderstandsarmer Pkw-Reifen**  
von K. Sander  
40 Seiten, 1995 DM 22,50
- F14: **Der Aufprall des Kopfes auf die Fronthau-  
be von Pkw beim Fußgängerunfall**  
Entwicklung eines Prüfverfahrens  
von K.-P. Glaeser  
100 Seiten, 1996 DM 30,00
- F15: **Verkehrssicherheit von Fahrrädern**  
Teil 1: Möglichkeiten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit von Fahrrädern  
von C. Heinrich und E. von der Osten-Sacken  
Teil 2: Ergebnisse aus einem Expertengespräch „Verkehrssicherheit von Fahrrädern“  
von F. Nicklisch  
220 Seiten, 1996 DM 43,50
- F16: **Messung der tatsächlichen Achslasten von Nutzfahrzeugen**  
von R. Sagerer, K. Wartenberg und D. Schmidt  
52 Seiten, 1996 DM 24,00

**F 17: Sicherheitsbewertung von Personenkraftwagen**

– Problemanalyse und Verfahrenskonzept

von D. Grunow, G. Heuser, H. J. Krüger und  
Chr. Zangemeister

136 Seiten, 1996 DM 33,50

**F 18: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS**

von J. Präckel

84 Seiten, 1996 DM 28,00

**F 19: Schwingungsdämpferprüfung an Pkw im Rahmen der Hauptuntersuchung**

von E. Pullwitt

44 Seiten, 1996 DM 22,50

**F 20: Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand**

von K. Sander

60 Seiten, 1996 DM 24,50

**F 21: Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe**

von M. Fach

80 Seiten, 1996 DM 27,00

---

**Zu beziehen durch:****Wirtschaftsverlag NW****Verlag für neue Wissenschaft GmbH**

Postfach 10 11 10

D-27511 Bremerhaven

Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, Telefax (04 71) 9 45 44 88

