Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Beilage zur Entwicklung eines Griffigkeitsprognoseverfahrens für Straßenoberflächen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald BLAB

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard HOFKO

Proj. Ass. Dipl.-Ing. Georgi Chankov

Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung,

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Daniela Zhelyazkova

1129519
Buzludzha Str. 55
4230 Asenovgrad

Wien, im Juni 2014

Kurzfassung

Beilage zur Entwicklung eines Griffigkeitsprognoseverfahrens für Straßenoberflächen

Die Straßengriffigkeit bewirkt die Verkehrssicherheit auf empfindlicher Weise. Sie kann die Nutzungsdauer einer Straßenoberfläche vor allem bei Nässe bis zu einem gewissen Grade limitieren und damit Ursache für gefährliche Unfälle werden. Mit ihrer wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Bedeutung ist eine von den wichtigsten Kenngrößen im Straßenbau. Eine realitätsnahe, langfristige Prognose der Griffigkeitsentwicklung ist das Ziel von den Planer im heutigen und zukünftigen Straßenbau. Bisher vertrauten die Straßenbauingenieure nur auf die Polierwerten des Gesteinszuschlages, um die Griffigkeit vorherzusagen. Aber das Gestein ist nur eine von den Bestandteilen der Struktur einer Straße. Die Straßenoberfläche ist ein spezifisches System aus Gestein, Kornverteilung, Hohlraum und Textur und nur die Eigenschaften des Gesteinszuschlages sind von sich selbst für eine Prognose des Verhaltens der gesamten Oberfläche nicht alleine maßgebend.

Diese Diplomarbeit ist Teil von einem großen Forschungsprojekt, dessen Ziel die Entwicklung eines Laborverfahrens für langfristige Prognose des Griffigkeitsverhaltens von Straßenoberflächen ist.

Das Institut für Verkehrswissenschaften an der TU-Wien verfügt über die Prüfanlage nach Wehner/ Schulze, die einerseits in der Lage ist, die Griffigkeit von Bohrkernen aus der Straße und im Labor hergestellter Oberflächen zu prüfen und anderseits die Veränderung der Griffigkeit in Abhängigkeit von definierten Belastungszyklen (Polieren und Aufrauen) zu simulieren.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden verschiedenen Prüfparameter variiert, um den Einfluss auf dem Reibungsbeiwert zu untersuchen. Dabei werden realitätsnahe Prüfbedingungen erschaffen.

Die durchgeführten Prüfungen liefern einen Beitrag zu den Zielen des Forschungsprojektes zur Definition des Labor-Verfahrens zur Griffigkeitsprognose, sowie zur Festlegung von entsprechenden Labor-Grenzwerten in den relevanten Regelwerken.

Abstract

Laboratory test for the development of a grip prediction method for road surfaces

The pavement grip exerts significance influence on the road safety. It can limit the useful life of a road surface up to a certain degree, especially in wet conditions. With its economic and safety significance the surface grip is one of the most significant parameters in the road construction. A realistic, long- lasting prognostication of the grip progress is an aim of the road designers in todays and future road construction. Up to the present time the road construction engineers take into account only in the polishing values of the rock supplement to aim for an appropriate grip. But the rock stratum is only one of the road structure components. The road surface is a specific system of rock, grain distribution, cavity and texture and only the properties of the rock surcharge are not relevant for a prediction of the behavior of the entire surface.

This master thesis is part of a comprehensive research project whose object is the development of a laboratory method for long- term forecast of the behavior of realistic grip surfaces.

The Institute for Road Construction and Road Maintenance at the Technical University Vienna has the test equipment called Wehner/Schulze testing machine (W/S), which on one hand is able to check the roughness of real and in the laboratory manufactured surfaces and on other hand to simulate the change in the grip function depending on defined load cycles (polishing and roughening).

Within this research various environmental parameters will be varied to investigate the influence on the coefficient of friction. It will be created realistic test conditions for this purpose.

The PWS values gained from this research are a contribution to the objectives of the research project- Definition of laboratory method for grip forecast- and also the definition of corresponding laboratory limits in the relevant regulations.

Резюме

Разработване на метод за прогнозиране сцеплението на пътни настилки

Сцеплението на пътната настилка оказва съществено влияние върху транспортната сигурност. То може да намали периода на експлоатационна годност на пътя, особено при валежи, и да се превърне в предпоставка за пътнотранспортни произшествия. Поради своето икономическо и техническо значение сцеплението е един от основните параметри на пътното строителство за всички времена. Неговата прогноза е главна цел на транспортните инженери в настоящето и бъдещо проектиране на пътища. До този момент пътните проектанти се осланяха единствено на полиращите качества на каменната фракция, за да предскажат бъдещото поведение на настилката. Но каменната фракция е само една от съставните части на структурата на пътя. Пътната настилка е специфична система от каменна фракция, зърнометрия, пори и грапавост, и качествата на каменния материал сами по себе си не са достатъчни за прогнозиране поведението на цялата повърхност.

Тази дипломна работа е част от голям изследователски проект, чиято цел е разработването на лабораторен метод за прогнозиране на сцеплението на пътни настилки.

Институтът по строителство и поддръжка на пътища към Техническия университет във Виена разполага с лабораторния уред Венер/Шулце, който дава възможност за изпитване на пробни тела, създадени в лабораторни условия и проследяването на промени в коефициента на сцеплението при симулиране на определени нива на транспортно натоварване (полиране).

В рамките на това проучване ще бъдат варирани различни параметри, за да се определи тяхното въздействие върху коефициента на триене. Изпитването ще протече при лабораторни условия, еквивалентни на реалните по време на транспортно движение.

Получените резултати ще допринесат за целите на изследователския проект, т.е. за дефинирането на лабораторен метод за прогнозиране на сцеплението, както и за установяването на гранични стойности.

Vorwort

Ich möchte mich beim Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab für die Möglichkeit meine Diplomarbeit im Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen am Institut für Verkehrswissenschaften durchzuführen herzlich bedanken.

Weiteres möchte ich mich besonders bei Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko und Proj. Ass. Dipl.-Ing. Chankov für ihre Aufgeschlossenheit und ausgezeichnete Betreuung bedanken.

Ich bedanke mich herzlich auch bei dem ganzen Laborteam für die Mithilfe, kollegiale Benehmen und angenehme Arbeitsklima.

Besonders dankbar bin ich meiner Familie- meinem Vater Dimitar Zhelyazkov, meiner Mutter Lilyana Zhelyazkova und meiner Schwester Vanya Zhelyazkova- für den unbedingten Beistand im Laufe meines Studiums.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung 8

2 Technische Grundlagen zur Griffigkeit 9

2.1 Begriffsdefinitionen 9

2.1.1 Griffigkeit 9

2.1.2 Reibungsbeiwert µ 9

2.1.3 Schlupf 10

2.1.4 Polierwiderstand 10

2.1.5 Textur 11

2.2 Einflussfaktoren auf die Griffigkeit 13

2.2.1 Einflüsse des Reifens 15

2.2.2 Einflüsse der Straße 18

2.2.3 Einflüsse des Fahrzeuges 19

2.2.4 Einflüsse des Zwischenmediums 21

3 Laborprüfverfahren zur Prognose des Polierwiderstandes-Wehner/Schulze 21

3.1 Historische Entwicklung des Verfahrens 21

3.2 Beschreibung der Prüfmaschine 25

3.2.1 Polierstation 25

3.2.2 Prüfstation 27

3.3 Materialien und Probekörperherstellung 30

3.4 Probenvorbehandlung 35

3.5 Texturmessung mittels optisches Geräts 38

4.6 Statistische Methode für Auswertung- T-test 40

4 Untersuchungen zur Griffigkeit von Splittmastixasphalt 44

4.1 Prüfprogramm 44

4.2 Prüfergebnisse und Auswertung 45

4.2.1 Einfluss der Probekörpergewinnung aus der Platte 45

4.2.2 Einfluss der Sandstrahldauer 50

4.2.3 Variation der Poliermittel 53

4.3 Beispielhafte Darstellung der Oberflächentextur 56

5 Zusammenfassung 64

5.1 Ausgangsituation und Zielsetzung 64

5.2 Versuchsprogramm und Ergebnisse 65

5.3 Schlussfolgerungen und Ausblick 67

ANHANG A 74

ANHANG B 77

ANHANG C 81

Häufig verwendete Abkürzungen

PWS- Polierwert nach Wehner/ Schulze

μ_{pws} – Reibungsbeiwert

ÜR- Überrollung

PK- Probekörper

km/h- Kilometer pro Stunde

U/min- Überrollungen pro Minute

N/mm^2- Newton pro Quadratmillimeter

p- Wahrscheinlichkeit

$p_{(\overline{x_1}-\overline{x_2})}$ - Wahrscheinlichkeit einer empirischen Mittelwertdifferenz

$p_{(temp)}$- Wahrscheinlichkeit eines t-Wertes in einer t- Verteilung

x_n- Stichprobenmittelwert

$\sigma_{x_1-x_2}$ - geschätzter Standartfehler der Mittelwertdifferenz

t_{df} – standartisiertes Differenz der Stichprobenmittelwerte

μ_n – theoretische Mittelwert

1 Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen beeinflusst wesentlich die Verkehrssicherheit. Deswegen ist deren Prognose eine tagfällige Frage im heutigen und zukünftigen Straßenbau.

Deckschichten müssen eine dem Verwendungszweck angemessene Griffigkeit aufweisen. Straßenabschnitte, die sich mit einem hohen Maß von Konfliktsituationen charakterisieren, benötigen ein wesentliches Griffigkeitsangebot. Hier lenkt man Aufmerksamkeit besonders auf langen Gefällstrecken, Kurven mit kleinen Radien, Verwindungsbereiche und Verzögerungsstrecken, wo es sehr häufig zu plötzlichem Bremsen oder stärkeren Lenkeinschläge kommt. Das Erreichen einer Anfangsgriffigkeit (Zeitpunkt der Abnahme) von frisch verlegten Belägen während den Prozesse des Einbaus und Verdichtung stellt kein großes Problem dar. Wesentliche Unsicherheiten entstehen hinsichtlich des erreichbaren Griffigkeitswertes nach der Verjährungsfrist zur Gewährleistung (Mängelansrpüche). Die Asphaltindustrie strebt sich nach solchen Asphalten, mit denen positive Erfahrungen bestehen. Gegenwärtig ist jedoch nicht möglich die Griffigkeit eines konzipierten Asphaltmischgutes bereits im Rahmen der Erstprüfung zu prognostizieren. Eine realistisch nähe Bewertung der Griffigkeit kann aber in Laborbedingungen erreicht werden. Mit der Verwendung verschiedenen Prüfmethoden und Laborprüfgeräte wird die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche bei realistischer Verkehrsbelastung untersucht.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird ein Griffigkeitsprognoseverfahren für Straßenoberflächen untersucht. Dafür wird der Polierwiderstand von Splittmastixasphalt mit dem Polierverfahren nach Wehner/Schulze ermittelt.

Ziel der gegenständlichen Arbeit, die Teil eines umfassenden großen Forschungsprojekts ist, wird die relevante Literatur zur Griffigkeitsuntersuchung und -entwicklung in Laborverfahren auszuwerten. Dabei wird der Fokus auf die Prüfanlage Wehner/Schulze gelegt. So werden Grundlagen für die effiziente Entwicklung eines Laborverfahrens gelegt. Darauf aufbauend werden in einer experimentellen Parameterstudie die wesentlichen Einflussfaktoren auf Polier- und Griffigkeitsprüfung nach Wehner/Schulze analysiert. Diese Untersuchung ist nach der Fragestellung orientiert, wie die Griffigkeit durch Variation von der verschiedenen Umgebungsparameters (Poliermittel, Sandstrahl, Zeit) beeinflusst wird.

Die bei dieser Diplomarbeit gewonnenen Ergebnisse liefern die Basis für ein Laborverfahrens zur realitätsnahen Prognose, das zur weiteren Untersuchungen der Griffigkeit von Straßenoberflächen beitragen wird.

2 Technische Grundlagen zur Griffigkeit

2.1 Begriffsdefinitionen

2.1.1 Griffigkeit

Unter dem Begriff „Griffigkeit“ versteht man die Eigenschaft einer Straßenoberfläche im Kontakt mit einem Fahrzeugreifen Reibungskräfte zu entwickeln. Die Griffigkeit kennzeichnet die Wirkung der Textur und der stofflichen Beschaffenheit einer Fahrbahnoberfläche auf den Reibungswiderstand, den ein Fahrzeugreifen unter festgelegten Randbedingungen, wie Nässezustand der Fahrbahnoberfläche, Reifenmerkmale, Fahrgeschwindigkeit und Temperatur, erfährt [1], [2], [3].

2.1.2 Reibungsbeiwert μ

Der Reibungsbeiwert (auch bekannt als Reibungswert, Reibungswiderstand, Reibwert und Kraftschlussbeiwert) dient zur quantitativen Beschreibung der Griffigkeit. Er ist maßgebende Einflussgröße für den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn. Der Kraftschluss resultiert sich aus der Wechselwirkung zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche, beeinflusst von der Textur der Oberfläche, der Eigenschaften des Reifens, der Anwesenheit und Dicke eines Zwischenmediums –z.B. Wasser, Schmutz, sowie der Geschwindigkeit. Nach der Theorie der Reibung zwischen zwei aufeinander gepressten Körpern ist der Reibungsbeiwert unabhängig von der Kontaktfläche und von der Geschwindigkeit. Der Reibungsbeiwert wird als Quotient aus der durch Kraftschluss zwischen zwei Oberflächen (Reifen und Fahrbahn) übertragenen Horizontalkraft (F_H) und der gleichzeitig wirkenden Normalkraft- Reifenauflast- (F_V) definiert (siehe Abbildung 1). Folglich hängt die übertragbare Horizontalkraft von der vorhandenen Reibung zwischen den beiden Körpern. Je größer der Kraftschlussbeiwert ist, desto größer ist die übertragene Kraft [1], [2], [4].

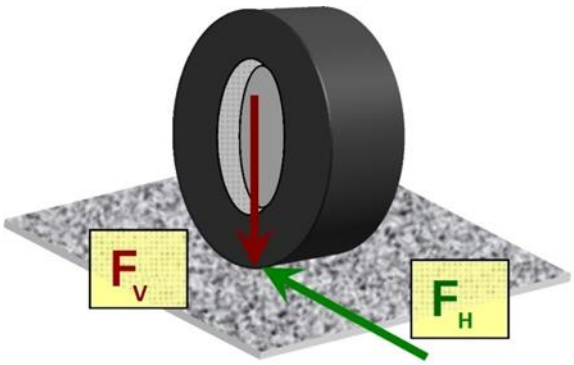


Abbildung 1: Definition des Reibungsbeiwertes (Pfeiler, 2004)

2.1.3 Schlupf

Bei der Kraftübertragung zwischen den Reifen und der Straßenoberfläche tritt auch ein Abrollvorgang auf. Bei der Abweichung der Umfangsgeschwindigkeit des Rades von der Fahrgeschwindigkeit entsteht eine relative Bewegung zwischen den Reifen und der Fahrbahnoberfläche. Dieser Prozess charakterisiert sich mit einem Verlust an Vortrieb H und wird Schlupf genannt.

Die in Abbildung 2 dargestellte Reibungsbeiwert- Schlupf- Kurve erklärt die Beziehung zwischen dem vorhandenen Schlupf und der aktivierbaren Reibung. Bei einem bestimmten kritischen Schlupf, der auf griffiger, trockener Oberfläche zwischen 0,2 und 0,4 liegt, erreicht der Reibungswert sein Maximum, das auch als Kraftschlussgrenze bezeichnet wird. Bei dem Überschreiten des kritischen Schlupfes können die in der Reifenaufstandsfläche aktivierbaren Kräfte dem wirkenden Bremsmoment nicht mehr standhalten und das Rad blockiert. Mit dem weiteren Anstieg des Schlupfes sinkt der Reibungsbeiwert μ und erreicht bei S=1 (Gleitzustand) den minimalen (Gleit-) Reibungsbeiwert μ_g. Das Verhalten auf nasser Fahrbahn ist sehr ähnlich mit dem Unterschied, dass der kritische Schlupf, sowie der erzielbare Reibungsbeiwert dabei wesentlich geringer sind [4].

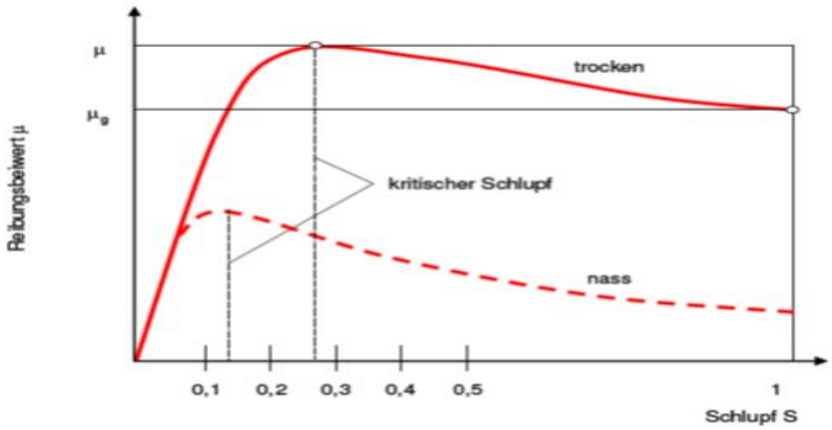


Abbildung 2: Reibungsbeiwert- Schlupf- Kurve [Donchev, 2007]

2.1.4 Polierwiderstand

Unter dem Begriff „Polierwiderstand“ versteht man einen Widerstand einer Oberfläche gegen Änderungen der Mikrotextur durch polierende Beanspruchung unter definierten Messbedingungen. Die Griffigkeit wird durch die polierende Wirkung des Verkehrs im Laufe der Zeit negativ beeinflusst. Eine wesentliche Rolle für diese Abnahme der Griffigkeit spielen die bauliche Ausbildung der Deckschicht, der Verkehrsbelastung, der Polierbeanspruchung bei der Bremsvorgänge und Kurvenfahrten und die Polierresistenz der groben Gesteinskörnungen.

Der Polierwert nach Wehner/Schulze (PWS) ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit von Gesteinskörnungen gegen polierende Wirkung von Fahrzugreifen auf einer Straße [1].

2.1.5 Textur

Für die Herstellung des direkten Reifen-Fahrbahn-Kontaktes, bzw. für das Aktivieren des Kraftschlusses zwischen Reifen und Fahrbahn, ist eine Dränagewirkung notwendig. Zu verdrängen ist ein Zwischenmedium, z.B. Wasser. Das erfolgt im Wesentlichen durch die Wirkung der Reifenprofile und die Texturtiefe zwischen den Gesteinskörnern, d.h. Bereiche über die das Wasser verdrängt werden kann.

Die Textur ist die geometrische Gestalt der Fahrbahnoberfläche im Wellenlängenbereich von wenigen Mikrometern bis einigen Dezimetern. Der Textur wird durch zwei Parameter ausgedruckt- die Wellenlänge und die Profiltiefe (siehe Abbildung 3). Entscheidend für diese Parameter sind nicht nur die Materialeigenschaften der Decke, sondern auch der Fertigungsvorgang. Zum Beispiel kann bei einem Asphaltmischgut mit höheren Bindemittelgehalt und dadurch geringerem Hohlraumgehalt, während des Einbaus mit Straßenfertiger zu Bindemittelanreicherungen kommen. Dadurch wird die Gewährleistung einer passenden Textur verhindert.

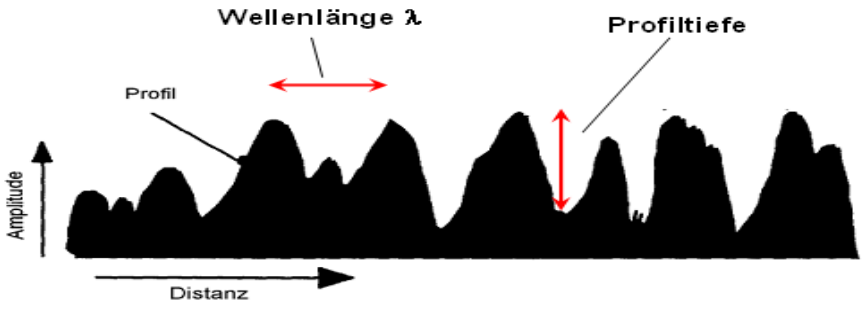


Abbildung 3: Darstellung eines Oberflächenprofils [Pestalozzi et al, 2003]

Die Abweichungen jeder Straßenoberfläche von der ideal ebenen Oberfläche werden als Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen und Amplituden interpretiert. Je nach Wellenlänge wird zwischen Mikro-, Makro- und Megatextur unterschieden. Das gesamten „Texturspektrum“ ist bis zu einer oberen Grenzwellenlänge von 500mm definiert, längere Wellen werden zu der Unebenheit geordnet [1].

2.1.5.1 Mikrotextur

Zur Mikrotextur zählen Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung kleiner 0,5 mm, wobei Texturen bis zu einer Größenordnung von 0,01 mm einen sehr großen Einfluss auf die Nassreibung zwischen Gummi und Fahrbahnoberfläche haben. Sie ist von der Kornoberfläche des verwendeten Gesteins abhängig und ihre Ausprägung beeinflusst wesentlich das Niveau des erreichbaren Reibwertes [1].

Sie hat die Aufgabe einen eventuellen Wasserfilm in der Reifenaufstandsfläche durchzubrechen und dadurch einen trockenen Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn herzustellen [5].

2.1.5.2 Makrotextur

Als Makrotextur werden Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung von 0,5 mm bis 50 mm bestimmt, wobei nur Texturelemente im Größenbereich von 10 mm durch ihre Dränagewirkung die Griffigkeit beeinflussen. Eine gute Makrotextur kennzeichnet eine grobporige Oberfläche, die für Reduzierung des Rollgeräusches vor allem bei hohen Geschwindigkeiten und für Unterstützung des Reifenprofils beim Abführen des Wassers aus der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche verantwortlich ist [2]. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwerts ist eng mit der Makrotextur verbunden. Je geringer die Makrotextur ist, desto schneller sinkt der Reibwert mit zunehmender Geschwindigkeit [1].

2.1.5.3 Megatextur

Zur Megatextur gehören Texturelemente mit einer horizontalen Ausdehnung von 50mm bis 500mm. Sie können für die Bildung von Wasseransammlungen (Aquaplaninggefahr) auf der Fahrbahn verantwortlich sein. Während die Mikrotextur hauptsächlich durch die Wahl der Gesteinsart bestimmt wird, ist die Wahl des Größtkorns der Deckschicht für die Makrotextur maßgeblich (siehe Abbildung 4) [1].

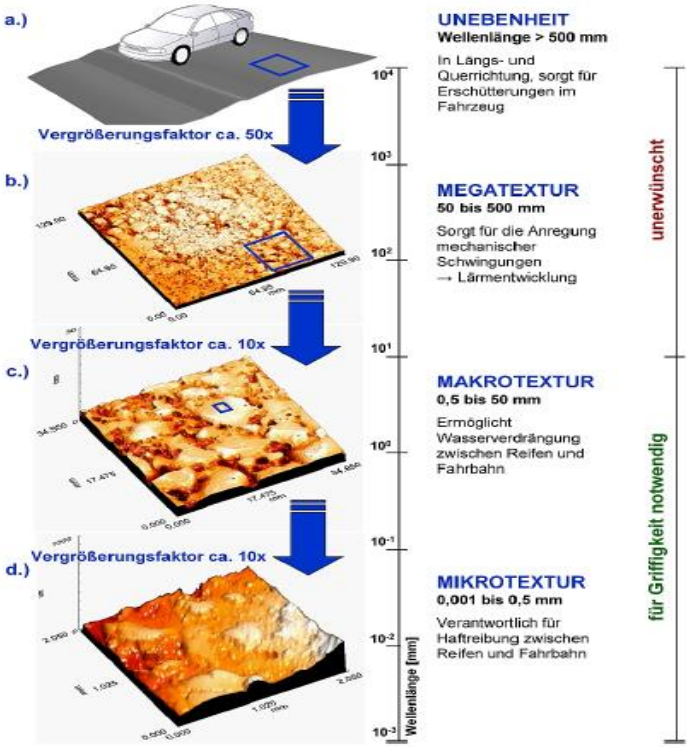


Abbildung 4: Übersicht über die Rauhigkeitsbezeichnungen im Straßenwesen [Kirchmaier 2011]

Bezüglich der Fahrbahnoberfläche last sich somit feststellen: Die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche bei Nässe wird durch ihre Oberflächentextur, das heißt durch ihre

Makro- und Mikrotextur beeinflusst. Auf die Abbildung 5 ist die Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes von der Textur dargestellt [1].

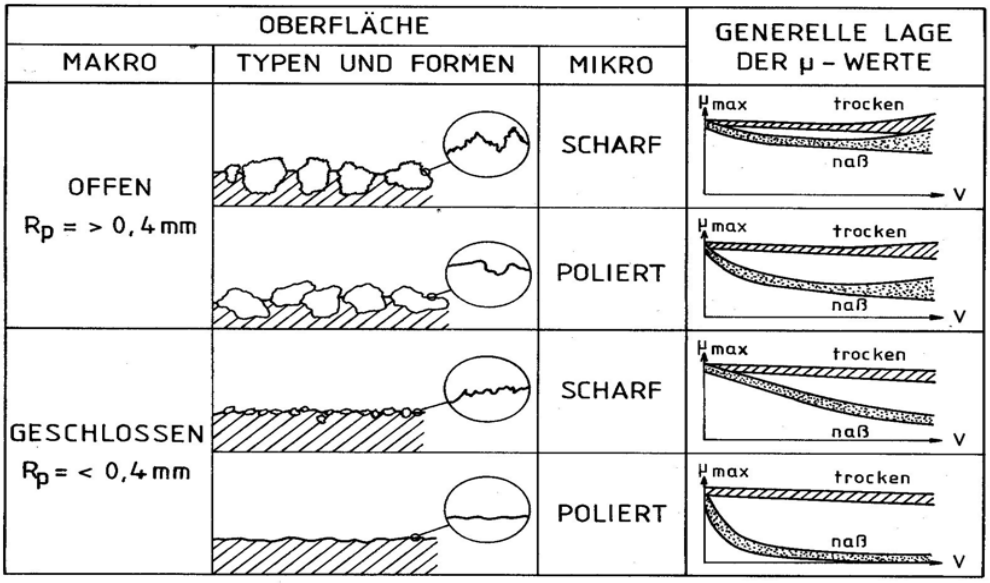


Abbildung 5: Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes von der Struktur der Oberfläche [Kirchmaier 2011]

2.2 Einflussfaktoren auf die Griffigkeit

Der in der Kontaktfläche Fahrzeugreifen/ Fahrbahnoberfläche aktivierbare Reibungsbeiwert ist von vielen Einflüssen geprägt. Die wesentlichsten Einflussfaktoren können dabei in vier Hauptgruppen eingeteilt werden (siehe Abbildung 6):

- *Reifen*: Bauart, Gummimischung, Profilgestaltung, Luftdruck (siehe Kapitel 2.2.1)
- *Fahrbahn*: Textur, Baustoffe, Beanspruchung, Jahreszeitliche Schwankungen (siehe Kapitel 2.2.2)
- *Fahrzeug:* Bewegungszustände Geschwindigkeit und Schlupf (siehe Kapitel 2.2.3)
- *Zwischenmedium*: Wasser, Wasserfilmdicke, Wassertemperatur (siehe Kapitel 2.2.4) [5]

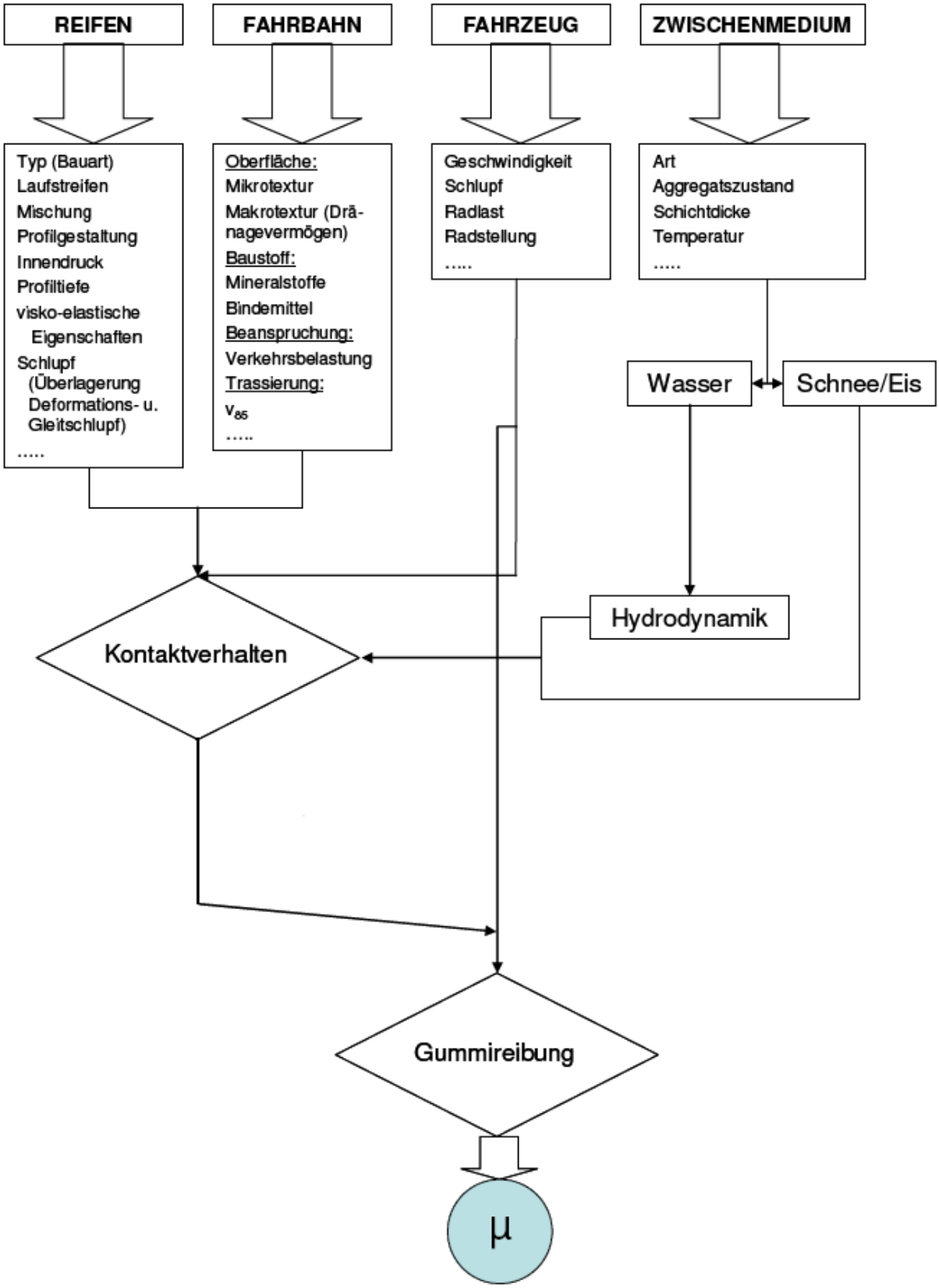


Abbildung 6: Einflussfaktoren auf die Griffigkeit [Donchev, 2009]

Eine realistische Simulation des Reibungsmechanismus zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahnoberfläche kann durch eine Wiedergabe und Variation der dieselben Einflussparameter gewährleistet sein. Dabei werden die messbaren Reibungsbeiwerte wirklichkeitsnah abgerechnet. Da die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Faktoren sehr komplex sind, kann deren Einfluss auf den gemessenen Reibungsbeiwerten je nach Situation unterschiedlich stark ausgeprägt sein [5].

2.2.1 Einflüsse des Reifens

Die Fahrzeugreifen müssen eine Gesamtheit von Anforderungen befriedigen, die schwer vereinbar sein können. Diese Anforderungen sind folgende:

- Großer Fahrkomfort
- Ausreichende Tragfähigkeit
- Eignung für hohe Geschwindigkeiten
- Gute Haftung auf trockenen und nassen Fahrbahnen
- Geringer Rollwiderstand
- Geringer Abrieb
- Geringe Geräuschentwicklung

Es ist zu berücksichtigen, dass die Fahrzeugreifen sich nach der *Bauart* der *Karkasse* (diagonal oder radial) unterscheiden. Für Pkw benutzt man hauptsächlich Reifen mit Radialprofil. Die Radialreifen charakterisieren sich mit einem „offenen“ Profil, welches die Ausbildung von Querrillen ermöglicht. Dieses „offene“ Profil ist bei Diagonalreifen zu vermeiden, weil es bei den größeren Verformungen des Diagonalreifens zu einem größeren Reifenverschleiß führen würde. Reifen mit Diagonalprofilen sind heutzutage nur bei Landwirtschaftsfahrzeugen, Oldtimern und älteren Motorrädern verwendet. Außerdem lässt sich die Bauart der Karkasse für das tangentiale Reibungsverhalten als vernachlässigbar bestimmt werden [5].

Sehr wichtig für die Wasserableitung ist auch die *Breite* des Reifens. Bei breiteren Reifen wird das Wasser nicht genug schnell seitlich um die Reifenkontur abfließen und staut sich als eine Bugwelle vor dem Reifen. Diese Zone wird auch Schwallgebiet genannt und die Erscheinung ist als Aquaplaning bekannt (siehe Abbildung 7). Im Extremfall verlieren die Reifen in dieser Situation vollständig den Fahrbahnkontakt und können keine Lenk- und Bremskräfte mehr übertragen. Je breiter der Reifen ausgeführt ist, umso mehr Wasser muss verdrängt werden und umso weiter sind die Fließwege des Wassers. Folglich weisen breitete Reifen eine niedrige Aufschwimmgeschwindigkeit auf [6].

Abbildung 7: Aquaplaning [ADAC]

Nur durch besondere Maßnahmen des Herstellers bezüglich *Profil- und Konturgestaltung* kann erreicht werden, dass auch breite Reifen eine ausreichende Unempfindlichkeit gegenüber Aquaplaning aufweisen. Für die Sicherstellung des Kontakts zwischen beiden Oberflächen (Reifen und Straße) muss das Wasser in den Profilrillen aufgenommen und abgeleitet werden. Mit der Abnutzung des Reifens sinkt der Reibungsbeiwert. Der Reifen muss ein Protektor mit Dicke nicht kleiner als 2 mm besitzen. Bei einer *Profiltiefe* von kleinen 4mm nimmt die Haftung des Reifens bei Nässe deutlich ab. Die Reifen können das Wasserfilm nicht mehr verdrängen, der Kontakt zur Straße wird verloren und das Fahrzeug lässt sich nicht mehr lenken und bremsen. Die Reifen müssen bei der Erreichung einer bestimmten Profiltiefe (3 mm bei Sommerreifen und 4 mm bei Winterreifen) erneuert werden [6].

Das *Laufflächenprofil* beeinflusst wesentlich die Wasserableitung aus dem Reifen, insbesondere bei schlechter Textur. Gegenwärtigen Fahrzeugreifen haben eine Anzahl von Längsrillen zwischen 4 und 8, die durch Querrillen verbunden sind. Zur Wasserableitung dienen hauptsächlich die Längsrillen und die Querrillen haben nur eine sekundäre, unterstützende Funktion. Je größer das Volumen der Rillen ist, desto schneller wird das Wasser aus der Kontaktfläche abgeleitet [5]. Auf die Abbildung 8 sind einige Möglichkeiten für Profilgestaltung dargestellt. Mit den Profilgestaltungen a) und b) kann am größten Reibungsbeiwert bei Straßen mit fester Oberfläche gewährleistet sein, während die universale Profilgestaltungen c) und d) maßgebend für alle Arten von Straßenkonstruktionen sind.

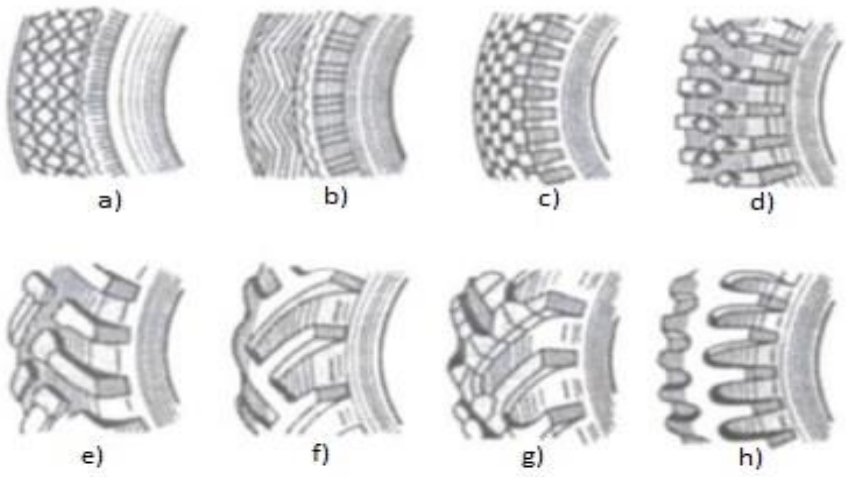


Abbildung 8: Arten von Profilgestaltungen des Fahrzeugreifen [Nikolov und Todorov, 2011]

Die *Gummimischung* ist von 2 Eigenschaften des Materials besonders beeinflusst- die Härte des Gummis und das Deformationsverhalten. Größere Reibungsbeiwerte werden durch Reifen mit großem Deformationsverhalten und geringerer Härte erreicht. Bei diesen Gummimischungen gibt es aber stärkeren Verschleiß [5].

Der Reibungsbeiwert hängt auch von dem *Innendruck* des Reifens ab. Der Innendruck beeinflusst die Größe der Kontaktfläche und Drainagefunktion der Reifen. Bei größerem Innendruck ist die Kontaktfläche kleiner. Mit der Verminderung der des Innendrucks verformt sich der Reifen leichter und damit wird seine Fähigkeit zur Wasserableitung verschlechtert [5]. Die Abbildung 9 stellt die Beziehung zwischen Reibungsbeiwert "μ" und Innendruck „p“ des Reifens dar. Mit der Vergrößerung des Innendrucks steigt der Reibungsbeiwert zuerst und dann wird kleiner.

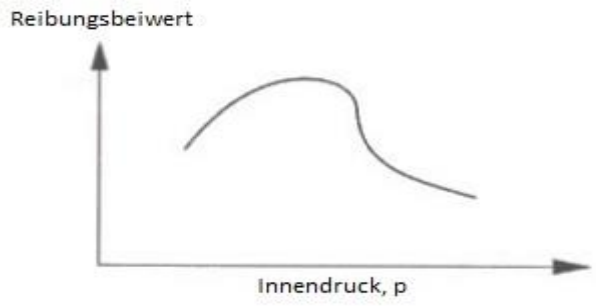


Abbildung 9: Zusammenhang zwischen den Reibungsbeiwert und den Innendruck des Reifens [Nikolov und Todorov, 2011]

2.2.2 Einflüsse der Straße

Die Straßenoberfläche beeinflusst die Griffigkeit durch ihre Textur, Zusammensetzung und Polierresistenz des Gesteinsmaterials, sowie durch die Wahl von Trassierungselementen bei der Planung. Die Textur und verwendeten Gesteinsmaterialien üben am wesentlichen Einfluss auf den Reibungsbeiwert und Nutzungsdauer der Deckschicht aus [5].

Bestimmend für die Anfangsgriffigkeit der Straßenoberfläche sind *Mikro*- und *Makrotextur*. Die Mikrotextur ist verantwortlich für den Durchbruch eines eventuellen Wasserfilm in der Reifenaufstandsfläche und dadurch entstehendes trockenes Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn [5]. Anderseits hat die Makrotextur die Aufgabe, das Wasser aus den Reifen abzuleiten und eine Wassersammlung in der Kontaktfläche zu verhindern. Die Textur ist in Kapitel 2.1.5 ausführlicher erläutert.

Wesentlicher Faktor für Erreichung befriedigter Griffigkeit und langfristiger Nutzung der Fahrbahn sind die physikalischen Eigenschaften des *Gesteinsmaterial*s, verwendet für die Herstellung der Asphaltmischung. Eine bestimmende Bedeutung haben die Härte der einzelnen Minerale, Kornform, Korngröße, Kornverteilung, Kantigkeit, Oberflächenrauheit, Verbandsfestigkeit. Besonders maßgebend für Nutzungsdauer der Straßenoberfläche ist die Polierresistenz des Gesteinsmaterials, da die Griffigkeitsänderung infolge Verkehrswirkung hauptsächlich von dem Polierwiderstand der Körner beeinflusst wird. Der Einfluss der Polierresistenz auf die Größe der Reibungsbeiwerte ist für die verschiedenen Deckschichtarten- Asphalt oder Beton- unterschiedlich. Normalerweise setzen sich die Deckschichten aus Splitt mit Korngröße > 2 mm zusammen. Bei neugebauten Deckschichten sind die Körner mit Bitumenmaterial verhüllt. Diese dünne Bitumenschicht wirkt negativ auf die Erstgriffigkeit der Straßenoberfläche. Im Laufe der Zeit entstehen unter der Verkehrsbelastung und Witterungsbeanspruchung bindemittelfreie Gesteinskörnungen. Dabei wird eine Griffigkeit gewährleistet, die nur von der Qualität des Gesteinsmaterials hängt. Diese ist die maßgebende Anfangsgriffigkeit der Fahrbahnoberfläche. Die weitere *Polierbeanspruchung der Fahrzeugreifen* führt zur Mikrotexturänderung, während die unregelmäßige Bewegung zwischen die Körnen und Bitumenfilm bestimmend für die Makrotexturänderung ist [5].

Die Fahrzeuge üben besonders polierende Wirkung immer aus, wo Schlupf entsteht, das heißt in Brems- und Beschleunigungsstrecken, sowie in Bereiche mit kleinen Kurvenradien. Die Mineralspitzen werden durch den Fahrzeugreifen zerstört und dadurch glättet sich die Gesteinsoberfläche. Für Splitte mit unterschiedlichem Gesteinskörnungsgehalt ist die Glättung verschieden. Bei Silikatdeckschichten ist der Poliereffekt stärker als bei Deckschichten aus Karbonatmaterialien [5].

Die Witterungsbeanspruchung beeinflusst anderseits die Straßengriffigkeit positiv. Dabei ist bei niedriger Verkehrsbelastung eine Vergrößerung des Reibungsbeiwertes

möglich, da der Einfluss der Witterungsbedingungen größer als die Polierwirkung der Fahrzeugreifen ist. Nach dem Regen werden die Griffigkeitseigenschaften der Fahrbahnoberfläche verbessert. Der Regen reinigt die Straße von Staub und andere Verunreinigungen und so kann die Mikrotextur wieder funktionieren. Bei kalksteinhaltigen Deckschichten kommt es infolge des sauren Wasser zur Bildung vom löslichen Bikarbonat, wodurch die Griffigkeit erhöht wird [5].

Auch die *Jahreszeit* beeinflusst die Straßengriffigkeit. Bei niedrigen Temperaturen ist der Reibungsbeiwert größer. Mit der Erhöhung der Temperatur wird die Griffigkeit geringer. Wegen des Regens und des kalten Wetters weist die Straßenoberfläche bessere Griffigkeitseigenschaften im Winter auf. Die Wärme und trockene Periode in den Sommermonaten führen zur Verminderung des Reibungsbeiwertes. Um den Einfluss der Jahreszeit geringer zu halten, ist eine Durchführung der örtlichen Untersuchungen der Griffigkeit im Zeitraum zwischen April und Oktober empfehlend [5].

2.2.3 Einflüsse des Fahrzeuges

Während der Fahrt wirkt auf das Fahrzeug eine Reihe von Kräften. Der Kraftschluss wird von den Größe und Richtung der Kräfte wesentlich beeinflusst. Diese Kräfte werden an einem vereinfachten fahrdynamischen Modell berechnet (siehe Abbildung 10) [7].

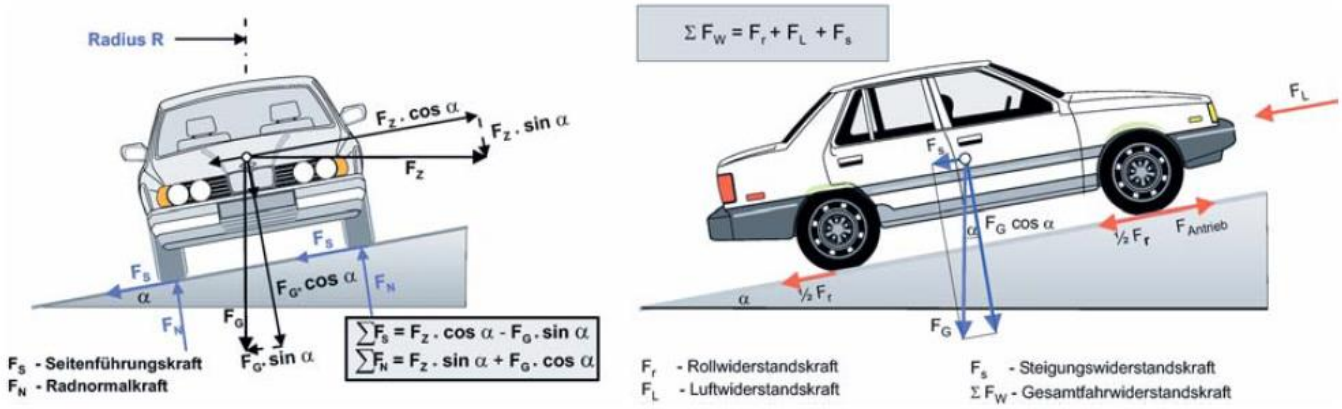


Abbildung 10: Auf das Fahrzeug während der Fahrt einwirkende Kräfte [FGSV Tagung-Weimar]

Vor allem dürfen die an einem Fahrzeug auftretenden treibenden Kräfte nicht größer werden, als die über Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn übertragbaren haltenden Kräfte.

Bei vereistem Straßenbelag oder bei Blockierung der Reifen tritt infolge Brems- und Beschleunigungskräfte *Schlupf* auf. Das führt zur wesentlichen Verminderung des Reibungsbeiwertes. Mit dem steigenden Schlupf nimmt der Reibungsbeiwert am Anfang

linear zu. Diese lineare Vergrößerung wird auf dieses Teil des Schlupfes, das eine Folge der Reifendeformation ist, zurückzuführen. Nach dem Erreichen des maximalen Schlupfwertes sinkt die Griffigkeit. Schuld daran ist der Schlupf gegenüber dem Straßenbelag [5].

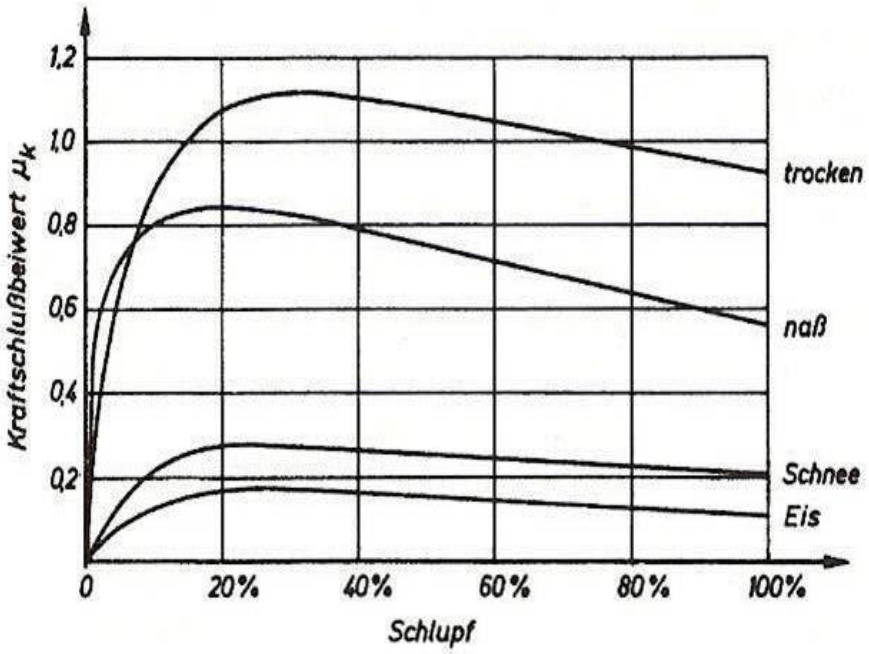


Abbildung 11: Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes vom Schlupf bei unterschiedlichen Zwischenmedien [Kluger-Eigl, 2009]

Die Abbildung 11 stellt die Zusammenhang zwischen den Reibungsbeiwerte vom Schlupf und das Zwischenmedium dar. Nach dem heutigen Stand der Technik gilt die Griffigkeit bei trockener und nicht verschmutzter Fahrbahnoberfläche als anforderungsgerecht. Bei solchen Oberflächen liegt das Maximum der Reibungsbeiwerte zwischen ca. 25 % bis 30 % und erreicht auch bei 100 % Schlupf (blockiertes Rad) noch sehr hohe Werte. Bei Nässe wird aber die Griffigkeit wesentlich vermindert (μ_{max}=12%-20%) und bei nicht angepasstem Fahrverhalten kann es zu Unfällen kommen [5].

In zahlreichen Untersuchungen wurde hingewiesen, dass die *Fahrgeschwindigkeit* für Reibungsbeiwert bei trockener Fahrbahnoberfläche nicht maßgebend ist. In einem Geschwindigkeitsbereich von 40 km/h bis 100 km/h bleiben die erreichbaren Reibungsbeiwerte annährend konstant auf einem befriedigen Griffigkeitsniveau. Bei nassen Fahrbahnoberflächen ist eine Verminderung des Reibungsbeiwertes vorhanden. Diese Verminderung ist hauptsächlich von der Qualität der Straßenoberfläche, der vorhandenen Wassermenge und von der Möglichkeit für Wasserableitung beeinflusst. Die zunehmende Fahrgeschwindigkeit erschwert den Kraftschluss, da für die Wasserableitung notwendige Zeit

verkürzt wird. Das bedeutet, dass das Zwischenmedien (Wasser) die Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes von der Fahrgeschwindigkeit bestimmt [5].

2.2.4 Einflüsse des Zwischenmediums

Wie es schon erwähnt wurde, kann bei trockenen Fahrbahnoberflächen ein ausreichender Reibungsbeiwert unabhängig von Fahrgeschwindigkeit erreicht werden. Die Reibungsbeiwerte verändern sich empfindlich, wenn in der Kontaktfläche eines Zwischenmedium erscheint. Als Zwischenmedium werden Wasser, Eis, Staub und verschiedene Verschmutzungen betrachtet. Generell ist das Vorhandensein eines Wasserfilms von größerer Bedeutung, das den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn verletzt. Unter solchen Bedingungen vermindern sich die Reibungsbeiwerte und diese Verminderung kann im hohen Grad von der Geschwindigkeit beeinflusst sein. Unterschiedlicher verhält es sich, wenn das Zwischenmedium Eis oder Schnee ist. Dann sind die Reibungsbeiwerte niedrig und unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit [5].

3 Laborprüfverfahren zur Prognose des Polierwiderstandes-Wehner/Schulze

3.1 Historische Entwicklung des Verfahrens

Seit Mitte 1950 wurde in Deutschland eine Maschine für Messung der Griffigkeit von Straßenoberflächen entwickelt. Die Maschine trägt den Name „Stuttgarter Reibungsmesser“ und damit kann die Griffigkeit von Straßenoberflächen vor Ort gemessen werden. Eine Prognose der Veränderung von Reibungsbeiwert mit der Zeit ist aber nicht möglich [2].

In den 60er Jahren wurde an der TU Berlin das Verfahren Wehner/ Schulze entwickelt. Das ist ein Verfahren für Untersuchung und Prognose der Griffigkeit von den Deckschichten mittels eines Laborgeräts. Das Simulieren einer Verkehrsbelastung auf den Straßenoberflächen bei definierten Laborbedingungen zählt zu den wichtigsten Aufgaben der Straßenbauforschung zu dieser Zeit. Am Anfang wurden der Poliervorgang und die Griffigkeitsmessung durch zwei einzelne Maschinen durchgeführt. Auf der Abbildung 12 ist eine der ersten Poliermaschinen gezeigt. Diese Maschine ergibt die Möglichkeit Probekörpern zu polieren. Der Polierkopf der Maschine besteht aus drei kegelförmigen Gummirollen. Diese wurden mittels einer Rotationsbewegung des Polierkopfs auf die Probenoberfläche getrieben und dabei erfolgte die Polierwirkung. Für Verstärkung des Poliereffektes wurde eine Mischung von Wasser und Quarzmehl eingesetzt [2].

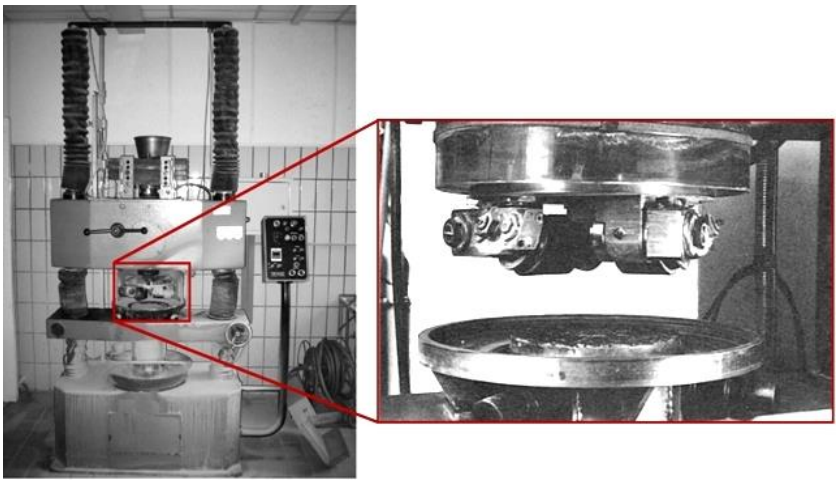


Abbildung 12: Poliersimulationsmaschine (links) und Detail des Polierkopfs (rechts) [Fotos: DAMES, 1990]

Nach dem Poliervorgang wurde der Probekörper auf die zweite Maschine- zur Bestimmung der Griffigkeit- montiert. Sie besitzt einen Kopf mit drei Prüfgummis, die zuerst bis 100km/h beschleunigt und dann auf den Probekörper angedrückt werden. Dabei wird ein Bremsvorgang simuliert und die Ergebnisse werden bei dem ganzen Prozess von 100km/h bis 0 km/h abgerechnet. Die Reibwertbestimmungsmaschine und die erhaltene Resultaten kann man auf der Abbildung 13 sehen. Eine kontinuierliche Kurve konnte ab Geschwindigkeit ca. 80 km/h aufgezeichnet werden, da die Prüfgummis beim ersten Kontakt mit der Probe (bei 100 km/h) auf der Oberfläche „hüpfen“ und erst ab dieser Geschwindigkeit (80 km/h) ein ständiger Kontakt zwischen den Prüfgummis und der Probenoberfläche hergestellt wird [2].

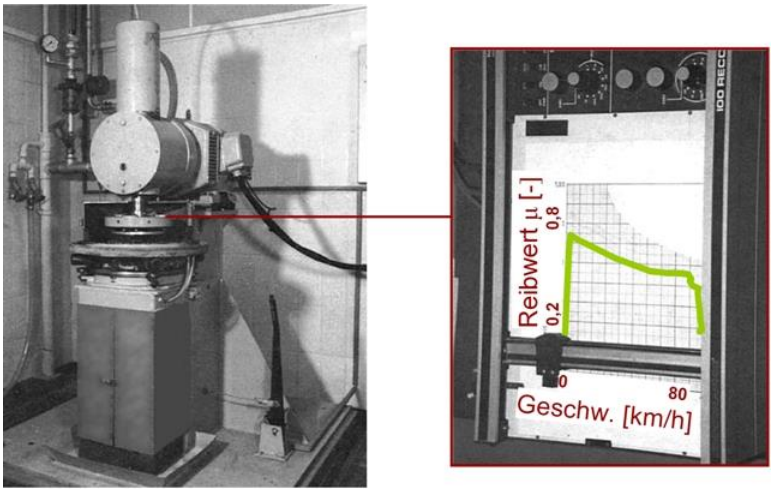


Abbildung 13: Reibwertbestimmungsmaschine (links) und externe Geschwindigkeits-Reibwertaufzeichnung (rechts) [DAMES, 1990]

1965 veröffentlichte Wehner zum ersten Mal Ergebnisse aus den Griffigkeitsprüfungen mit dieser Maschine. Im nächsten Jahren wurden grundsätzlich an der

TU Berlin viele Forschungsuntersuchungen für Bestimmung des Polierwiderstandes von, im Straßenbau verwendeten, Mineralstoffen mittels Laborgerät Wehner/ Schulze durchgeführt. Diese kamen als Basis für weitere wissenschaftliche Publikationen, deren Autoren Wehner, Schulze, Dames und Huschek sind [2].

Das Prüfgerät entwickelte und verbesserte sich allmählich mit der Zeit und im Jahr 2000, nach langjährige Zusammenarbeit zwischen den deutschen Firma Maschinen- und Gerätebau Josef Freundl und dem Institut für Verkehrswissenschaften in TU Berlin, wurde eine neue Maschine gebaut (siehe Abbildung 14). Die neue Maschine unterscheidet sich von der alten mit einem zusätzlichen dritten Teil außer den zwei Grundteilen für Polieren und Messung. Dieser zusätzliche Teil dient zum Spülen des Probekörpers nach dem Poliervorgang. Die Hauptveränderung bestand darin, dass die zwei einzelnen Maschinen schon in eine Maschine kombiniert wurden. Unten steht das Bild der neuen Maschine [2].

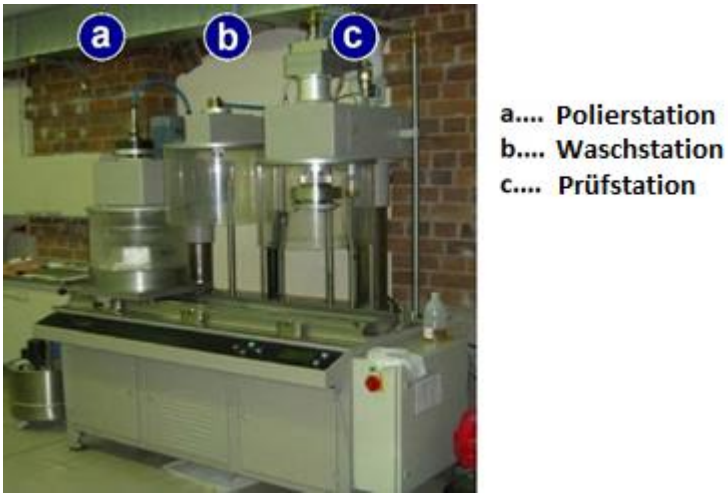


Abbildung 14: Prüfanlage nach Wehner/ Schulze- Version 1 der Fa. Maschinen- und Gerätebau Josef Freundl [RAUSCHENBACH und BOREK, 2010]

Die Maschine besitzt eine Reihe von Verbesserungen und das wesentliche ist, dass es keine zweimalige Montage des Probekörpers (einmal auf der Polierstation und einmal auf der Prüfstation) notwendig ist. Die neue Maschine ermöglicht eine automatische Abrechnung der Ergebnisse auf einem Computer. Das erlaubt eine leichtere Bearbeitung der Prüfdaten. Verändert werden auch die Poliergummirollen. Sie werden schon profiliert und entsprachen mehr der realen Verkehrsbeanspruchung. Es werden Veränderungen in den Größen von den Polier- und Prüfgummis erbracht [2].

Bei der zweiten Version der Maschine entfällt der Teil für Spülen der Probekörper (siehe Abbildung 15). Die Waschstation wurde in der Polierstation integriert und die Prozesse von Polieren und Spülen können mit Veränderung in den Einstellungen des Prüfgerätes verwechselt werden.

Die neue Bauart der Prüfanlage nach Wehner/ Schulze charakterisiert sich mit einem sehr geringeren Platzbedarf und einem hohen Automatisierungsgrad des Prüfablaufes. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Möglichkeit für Untersuchung von Gesteinskörnungen nahezu alle Korngrößen- von 0,2 bis 32 mm. Diese Prüfanlage erlaubt auch der Untersuchung des Griffigkeitsverhaltens von Asphalt- und Betonprobekörper, die entweder von bestehenden Straßen entnommen, oder im Labor hergestellt werden. So ist ein Vergleich der Ergebnisse von Probekörper möglich, die eine reale Polierbeanspruchung von Fahrzeuge ertragen, und solchen, die im Labor hergestellt und poliert sind [2].

Abbildung 15: Prüfgerät Wehner/ Schulze

Laut Herstellerangaben sind ca. 20 Prüfanlagen in verschiedenen europäischen Ländern in Verbindung getreten. Das Institut für Verkehrswissenschaften der RWTH Aachen besitzt auch eine bewegliche Prüfanlage nach Wehner/ Schulze, die an der Abbildung 16 gezeigt ist. Damit kann den Griffigkeitsbeiwert direkt vor Ort gemessen werden. Bei der Verwendung der mobilen Version des Prüfgeräts nach Wehner/ Schulze entfällt die Notwendigkeit für Entnehmen von Probekörpern aus der bestehenden Straße. Aber der Prüfvorgang braucht eine große Wassermenge, die schwer zu Lieferung an der Stelle ist. Deswegen ist es schwer zu definieren welche Untersuchungsvariante besser ist [2].

Abbildung 16: Mobile Wehner/Schulze Anlage [Kirchmaier 2011]

3.2 Beschreibung der Prüfmaschine

Die Hauptbestandteile der Prüfanlage Wehner/ Schulze sind eine Polierstation und eine Griffigkeitsmessstation. Der Prüfablauf gliedert sich in den Poliervorgang und die Griffigkeitsmessung.

3.2.1 Polierstation

Der Poliervorgang ist auf der Polierstation durchzuführen (siehe Abbildung 17). Dabei wird die Oberfläche des Probekörpers bei einer Drehgeschwindigkeit von (500±1) U/min unter Zugabe eines Quarzmehl/Wasser- Gemisches bei einem vertikalen Kontaktdruck von 0,4 N/mm^2 poliert.

Beim Poliervorgang wird eine Verkehrsbelastung auf der Probenoberfläche simuliert. Diese polierende Beanspruchung wird durch drei, unter Schlupf laufende konische Gummirollen durchgeführt und kann in der Höhe durch die Anzahl der Überrollungen variiert werden.

Abbildung 17: Poliervorgang

Die Polierstation besitzt folgende wesentliche Teile:

- maschinenbetriebener Polierkopf mit drei Polierrollen, der auf die Prüfoberfläche mit einer Auflastgewichtskraft von 392 N abgesenkt werden kann
- Mischbehälter mit Rührwerk für das Wasser-Quarzmehl-Gemisch; [8]
- Pumpe zur Aufbringung des Wasser-Quarzmehl-Gemisches auf die Prüfoberfläche.

Die Polierrollen bestehen sich aus einem kreiskegelförmigen Metallträgergehäuse, auf dem eine 8,8 mm starke Gummischicht aufgebracht ist (siehe Abbildung 18). Die äußeren Maße der Rollen betragen:

- Durchmesser: 36 bzw. 80 mm
- Höhe: 56,3 mm
- Mantellinie: s=60mm [8]

Abbildung 18: Polierrollen für Simulation der Verkehrsbeanspruchung [Donchev, 2007]

Kennzahlen des Poliervorganges:

- Mittlerer Kontaktdruck: ca. 0,40 N/mm^2
- Schlupf: ≤ 1%
- Bahngeschwindigkeit: ca. 17 km/h
- Drehzahl des Rollenkopfes: 500 U/min (d.h. 90 000 Überrollungen/h)
- Durchflussmenge des Wasser-Quarzmehl-Gemisches: 5,01 l/min ± 10%
- Temperatur: ≤ 25°C.

Das Poliermittel besteht aus einem Gemisch aus Quarzmehl ≤ 0,063 mm Typ Millisil W6 (Quarzwerke Frechen) und Wasser im Mischungsverhältnis 60 g Quarzmehl pro 1 Liter Wasser [8].

Nach jedem Poliervorgang müssen die Probeoberfläche, die Einspannvorrichtung und der Rollenkopf von Poliermittel sauber werden. Das ist mit der Funktion „Spülen“ auf derselben Station erreichbar. Das Spülen dauert 120 sec, dann kann die Einspannvorrichtung mit dem Probekörper auf der Prüfstation versetzt werden. Der Spülvorgang ist auf die Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 19: Spülen

3.2.2 Prüfstation

Auf der Prüfstation findet die Messung des Reibungsbeiwertes statt. Die wesentliche Bestandsteile der Griffigkeitsmessstation sind [8]:

- auskuppelbarer Messkopf mit drei Messgummis
- Antrieb für den Messkopf
- Wasseranschluss mit regelbarer Wassermenge
- Kraftmessdose, Messwerterfassung und Datenverarbeitung
- Drehmomentmesssystem
- Messerfassung und Datenverarbeitung
- Kontrollplatte aus Glas

Bei Messbeginn wird die Prüfspindel mit den Messgummis pneumatisch angehoben und auf eine Umlaufgeschwindigkeit von 100km/h beschleunigt. Wenn der Anfangsgeschwindigkeit (100km/h) erreicht ist, werden die Messgummis auf die zu prüfende Oberfläche pneumatisch abgesenkt und bis zum Stillstand abgebremst. Während des Abbremsvorganges wird eine Reibungskraft aktiviert, die über den gesamten Geschwindigkeitsbereich mittels Software am PC gezeichnet und ausgewertet wird. Der Polierwert PWS berechnet sich aus dem Verhältnis zwischen Reibungskraft und Aufstandskraft der Messgummis bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h.

Die Messgummis bestehen aus einem kreisringsegmentförmigen Metallträger mit Einspannvorrichtung, auf dem eine 5 mm starke Gummischicht aufgebracht ist (siehe Abbildung 20).

Abbildung 20: Griffigkeitsmesseinheit des PWS [FGSV, 2004]

Die äußeren Maße eines Gleitschuhes betragen:

- Breite: 14,5 mm
- Dicke: 10mm
- mittlere Länge: 30mm

Kennzahlen der Griffigkeitsmessung:

- mittlerer Kontaktdruck: 2 bar
- Prüffläche: 82,0 cm^2
- Prüfbahnlänge: 565 mm je Messkopfumdrehung
- Durchflussmenge: 20 l/min
- Temperatur: (12± 4) °C [8]

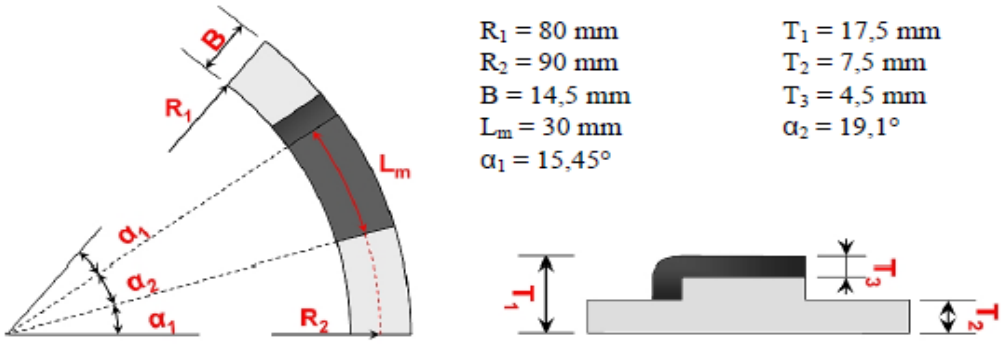


Abbildung 21: Detailansicht eines Prüfgummis [Kirchmaier 2011]

Abbildung 22 zeigt die Position der Prüfgummis auf der zu prüfenden Oberfläche.

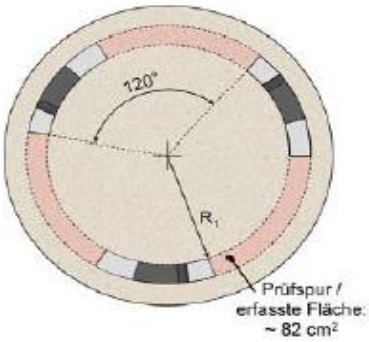


Abbildung 22: Positionierung der Prüfgummis auf der Probeoberfläche [Kirchmaier und Blab, 2010b]

Vor dem Prüfvorgang ist es sehr wichtig die Eignung der Prüfgummis festgestellt sein. Für diesen Zweck wird die Griffigkeit einer Kontrolloberfläche aus Glas überprüft. Die Kontrollplatte besteht aus Aluminiumunterlage, auf die ein armiertes Ornamentglas geklebt ist. Der Herstellungsprozess und die praktisch unveränderliche Struktur der Oberfläche verleihen dem Kontrollglas ein ständiges Griffigkeitsniveau. Auf der Abbildung 23 ist eine Kontrollplatte und 3D-Ansicht eines Teils von dieser Platte, der mittels Laserscannen geschafft ist. Die Kontrollwerte für neue Prüfgummis müssen im Grenzbereich von 0,095 bis 0,115 [-] sein [2].

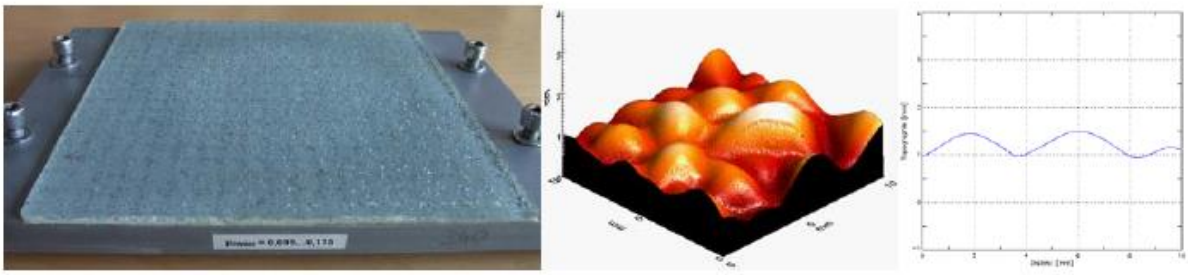


Abbildung 23: Drahtornamentglasplatte 521-7mm, 3D-Ausschnitt und mittleres Oberflächenprofil [Kirchmaier, 2011]

3.3 Materialien und Probekörperherstellung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Griffigkeit von einem Asphaltmischgut SMA 11 PmB 45/80-65, S3, GS untersucht. Eine Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt besteht aus einer Gesteinskörnung mit Ausfallkörnung, aus Polymermodifiziertem Bitumen oder Straßenbaubitumen als Bindemittel und Zusätzen als Bindemittelträger. Die vom Mischguthersteller zugesicherte Gesteinsklasse ist GS gemäß ÖNORM B 3580-1. Als Bindemittel ist ein PmB verwendet, deren Anteil in dem Mischgut 5,7 % beträgt. Das Asphaltmischgut wird heiß eingebaut und verdichtet. Ein hoher Anteil grober Gesteinskörnungen ergibt ein in sich abgestütztes Gesteinskörnungsgerüst, dessen Hohlräume mit Asphaltmastix weitgehend ausgefüllt sind. Die gleichzeitige Verwendung hohen Bindemittelgehalten erfordert die Zugabe von Zusätzen als Bindemittelträger, um eine Entmischung bei Herstellung, Transport, Einbau, und Verdichtung des Splittmastixasphaltes zu verhindern. Als Zusätze kommen u.a. organische und/oder mineralische Faserstoffe in Frage. Daten zum Asphaltmischgut sind durch die nächsten Tabellen gegeben (siehe Tabelle 1, Tabelle 2, Tabelle 3)

Tabelle 1: Eigenschaften des Bindemittels

Bindemittel	**Eigenschaften**		**Anteil M.- %**
Bitumensorte	Penetration (Pen_{25})	Erweichungspunkt (ERK) in [°C]	
Zugabebitumen: PmB 45/80- 65	62 (Mittelwert)	79 (Mittelwert)	5,7
Bindemittel Sollwerte	45 bis 80	≥ 65	-

Für die Gewährleistung eines zweckmäßigen Asphaltmischguts muss das Gestein an bestimmte geometrische, physikalische, chemische Anforderungen, sowie an Anforderungen an die Dauerhaftigkeit entsprechen. Die Anforderungen an der benutzten Gesteinsklasse GS sind in Tabellenform unten gezeigt (siehe Tabelle 2)

Tabelle 2: Anforderung an die Gesteinsklasse

feine Gesteinskörnungen	G_F 85	G_{TC} 20	f_{16}	E_{CS} 35	LA_{20}	F_1	MB_F 10	$PWS_{\geq 0,50}$	-
grobe Gesteinskörnungen	-	G_C 90/15	f_1	$C_{100/0}$	LA_{20}	F_1	MB_F 10	PSV_{50}	SI_{15}

Als Bindemittelträger dient Zellulosefaser Arbocel ZC 8/1, dessen Anteil 0, 30 M. - % beträgt.

Nach der Erstprüfung charakterisiert sich der Asphaltmischgut mit folgenden Eigenschaften (Tabelle 3)

Tabelle 3: Erstprüfung

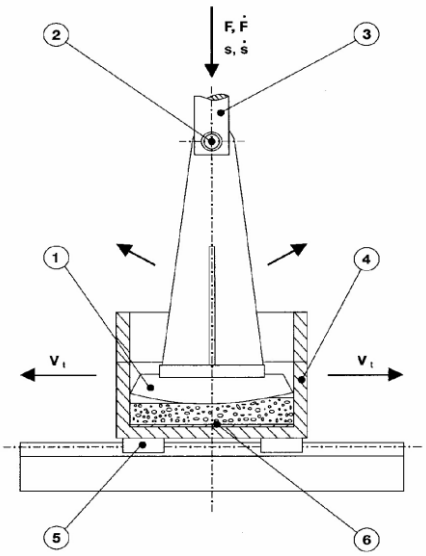
Asphaltmischgutsorte:	**SMA 11, PmB 45/80-65, S3, GS**				**Grenzwerte ÖNORM B 3584 -1**		**Vorschlag der deklarierten Werte zur CE-Kennzeichnung**	
Empirische Kennwerte	Prüfnorm	Bezeichnung	Einheit	Prüf-ergebnis	min.	max.	min.	max.
löslicher Bindemittelgehalt	EN 12697-1	B	M.- %	**5,5**	$B_{min\ 4,8}$		5,2	5,8
Rohdichte Asphaltmischgut	EN 12697-5	ρ_{mv}	Mg/m^3	**2,627**	-	-	-	-
Rohdichte Gesteinskörnung	rechnerisch	ρ_{Min}	Mg/m^3	**2,888**	-	-	-	-
Raumdichte	EN 12697-6	$\rho_{b,dim}$	Mg/m^3	**2,35**	-	-	-	-
Hohlraumgehalt	EN 12697-8	V_m	V.- %	**10,5**	$V_{min\ 6}$	$V_{max\ 12}$	$V_{min\ 8,0}$	$V_{max\ 12}$
Fiktiver Hohlraumgehalt	EN 12697-8	VMA	V.- %	**23,5**	VMA_{minNR}		KLF	
Hohlraumfüllungsgrad	EN 12697-8	VFB	V.- %	**55,3**	$VFB_{min\ NR}$	$VFB_{max\ NR}$	KLF	KLF
Proportionale Spurrinnentiefe	EN 12697-22	PRD_{Luft}	%	**4,3**	$PRD_{Luft\ 5,0}$		$PRD_{Luft\ 5,0}$	
Bindemittelablauf	EN 12697-18	D	M.- %	**0,1**	$D_{0,6}$		$D_{0,6}$	
Brandverhalten- Prüfwert	EN 13501-1	-	V.- %	**13**	$A2_{fl}$		A2 fl	
Brandverhalten-Kontrollwert				**≤ 16,1**				
Affinität- Bedeckungsgrad	EN 12697-11	-	%	**≥ 80**	80	-	80	-
Durchgang 1,4 D (mm)	EN 12697-2	≤ 16,0	M.- %	**100**	100	-	100	-
Durchgang Größtkorn		≤ 11,2	M.- %	**97**	90	100	90	100
Durchgang charakteristisches Grobsieb (mm)		≤ 8,0	M.- %	**44**	37	58	38	50
Durchgang Sandanteil (mm)		≤ 2,0	M.- %	**22**	20	35	20	32
Durchgang charakteristisches Feinsieb (mm)		≤ 0,5	M.- %	**12**	9	24	9	21
Durchgang Feintanteil (mm)		≤ 0,063	M.- %	**6,5**	5	9	5	9
Teilweise gebrochene Körner	EN 933-5	C_c	M.- %	**100**	-	-	-	-
Vollständig gebrochene Körner		C_{tc}	M.- %	**100**	-	-	-	-
Vollständig gerundete Körner		C_{tr}	M.- %	**0**	-	-	-	-

Die Zusammensetzung des Splittmastixasphaltes ist so abgestimmt, dass der Asphaltmastix den Zusammenhalt des Gesteinskörnungsgerüstes dauerhaft sichert und damit eine widerstandsfähige, verformungsbeständige und verkehrssichere Asphaltdeckschicht hergestellt werden kann, deren Raumdichte und Korngrößenverteilung sich unter Verkehr nur wenig ändern [10].

Splittmastixsasphalt kann als Asphaltdeckschicht auf Verkehrsflächenbefestigungen aller Art angewendet werden.

Für Probekörpergewinnung werden zuerst rechteckförmige Platten aus Asphalt mit Hilfe des Walzsegmentverdichters der Firma Freundl hergestellt. Die zylindrischen Probekörper werden dann aus den Platten gebohrt.

Das entsprechende Asphaltmischgut wird in einer rechteckigen Probenform mit Hilfe einer Stahl-Glattwalze verdichtet. Abbildung 24 zeigt die Bestandteile des Walzsegmentverdichters. Die Walze führt dabei Übergänge mit konstanter Geschwindigkeit aus, gemäß einem festgelegten Prüfplan [11].



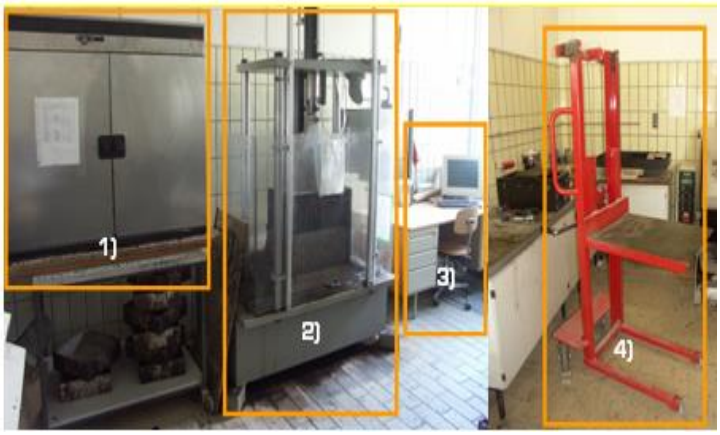
1- Walzsektor
2- Drehmittelpunkt
3- Belastungseinrichtung
4- Verdichtungsform
5- Schlitten
6- Einlegeblech

Abbildung 24: Schematische Darstellung des Walzsektor-Verdichtungsgerätes [Arbeitsanweisung Walzsegmentverdichter]

Auf den Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die notwendige Prüfgeräte und Hilfsmittel dargestellt. Die Mischgutkomponenten Gestein und Bindemittel müssen vor dem Mischprozess in dem Wärmeschrank getrocknet bzw. auf die entsprechende Mischtemperatur aufgeheizt werden. Die notwendige Temperatur wird in Abhängigkeit von dem verwendeten Bindemittel bestimmt. Das betrachtete Asphaltmischgut besitzt eine Erzeugungstemperatur von 150 bis 190 °C. Die Verweilzeit der Gesteinskomponenten im Wärmeschrank muss mindestens 5 Stunden und des Bitumens zwischen 3 und maximal 5 Stunden betragen. Das Bindemittel ist demnach entsprechend später in den Wärmeschrank zu stellen. Sollte der zu verwendende Asphalt bereits als fertige Mischung bereit stehen, ist

dieser lediglich auf die entsprechende Verdichtungstemperatur für 3 Stunden (+/- 10 min) in einer Stahlwanne zu temperieren. Um ein sofortiges Auskühlen des Mischgutes an den Rändern zu verhindern, müssen sowohl die Verdichtungsform, das Einlegeblech als auch das Walzsegment auf die Verdichtungstemperatur aufgeheizt werden. Die Verdichtungstemperatur ist vom jeweiligen Bindemittel abhängig und liegt ca. 10K unter der Mischtemperatur [11].

Die Mischgutkomponenten sind in Zwangsmischer einzufüllen. Die abgewogenen Gesteinsfraktionen können nun aus dem Wärmeschrank entnommen und in die Mischtrommel eingefüllt werden. Die Gesteinskomponenten werden in Dauer von ca. 30 Sekunden homogenisiert. Dann wird das Bindemittel aus dem Wärmeschrank hingefügt und die Mischgutkomponenten werden standartmäßig 5 Minuten zusammen gemischt. Dann wird das Mischgut im Walzsektorverdichter eingebracht und verdichtet (siehe Abbildung 27). Frühestens 24 Stunden nach der Herstellung darf die Platte ausgeformt werden. Fertig hergestellte Platten sind auf die Abbildung 28 dargestellt [11].



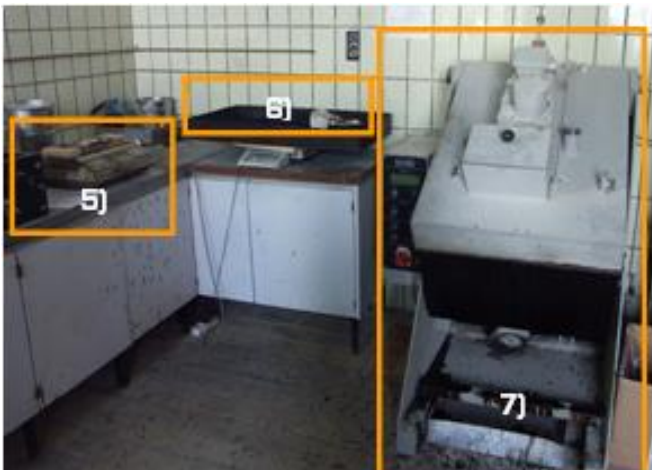
1)Wärmekammer mit Umluft

2)Walzsegmentverdichter

3)Schreibtisch mit Computer

4)Hubwagen

Abbildung 25: Hilfsmittel und Prüfgeräte



5)Waagen

6)Stahlwanne auf Waage

7)Zwangmischer

Abbildung 26: Hilfsmittel

Abbildung 27: Walzsegmentverdichter

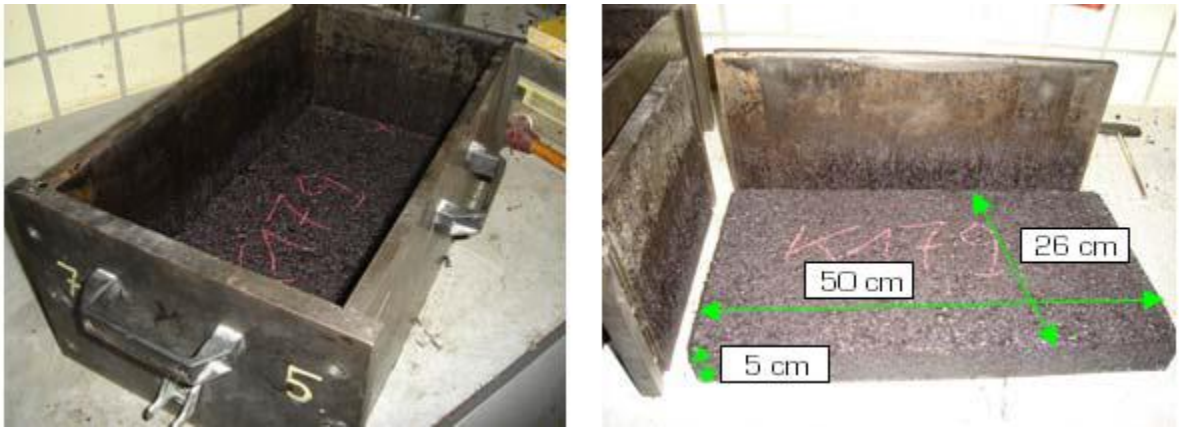


Abbildung 28: Fertig hergestellte Platte [Donchev, 2007]

Anschließend werden die zu untersuchende Probekörper aus den Platten ausgebohrt (siehe Abbildung 29).

Abbildung 29: Ausbohren des Probekörpers

3.4 Probenvorbehandlung

Die Probekörper müssen bei realitätsnahen Bedingungen geprüft werden, deswegen werden sie nach der Herstellung mit einer Korundmischung gestrahlt, um den Bitumenfilm von der Oberfläche zu entfernen. Das Sandstrahlen dient zur Herstellung eines Ausgangszustandes, der weitgehend dem Zustand entsprechen soll, der nach dem Einbau und der Abwitterung des Bindemittelfilms vorhanden ist.

Die Probevorbehandlung wird mit dem Gerät der Firma Freundl durchgeführt. Die Sandstrahlkabine dient zur Behandlung der Oberfläche eines Asphalt- bzw. eines Betonprobekörpers, die unter Laborbedingungen hergestellt werden. Der Hauptzweck der Strahlkabine ist, die verschiedenen Gebrauchszustände der Asphalt- bzw. Betonoberfläche zu simulieren und anschließend deren Reibungsbeiwert "µ" bzw. deren Polierwert (PWS) mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze zu prüfen. Die Maschine besteht hauptsächlich aus einer geschlossenen Kabine, wo sich der Probekörper waagerecht auf einer kreisförmigen, mit konstanter Geschwindigkeit rotierenden Platte dreht und gleichzeitig in einem Abstand von ca. 10 cm und unter einem Auftreffwinkel von 90° mit Sandstrahl (Strahlkorundmischung) unter Druck von ca. 5 Bar behandelt wird. Der Strahlvorgang kann entweder automatisch, mit von der Firma Freundl genau definierten, 5 Programmen oder händisch durchgeführt werden [12].

Die Sandstrahlkabine ist hauptsächlich eine Stahlkonstruktion, die im Wesentlichen aus einer Kabine zur Behandlung des Probekörpers besteht, die durch eine verschließbare Tür [1]

erreichbar ist. Des Weiteren besitzt das Gerät einen Sandbehälter [2], eine Entstaubungsanlage [3], zwei Handschuhe [4], ein Pedal [5] für eine manuelle Behandlung des Probeköpers, eine Lampe [6] zur Beleuchtung des Innenraums, Sichtfenster [7] zum Anschauen und Kontrolle des Sandstrahlvorgangs und eine Steuerungseinheit [8]. Die Anlage besitzt an der Unterseite auch eine Klappe zum Entleeren des Strahlkorundmischguts [9] und eine andere zum Entleeren der Staubreste [10]. Das Außenaussieht der Maschine ist auf der Abbildung 30 zu sehen.

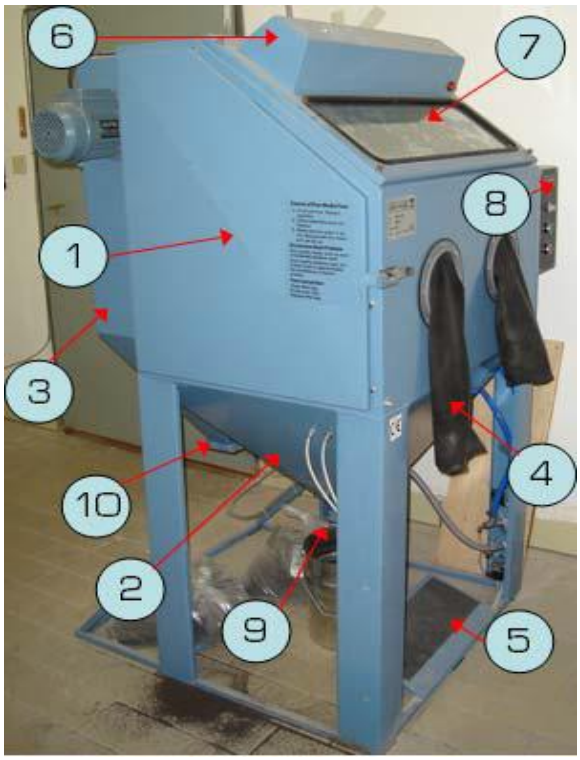


Abbildung 30: Kabine Außen

Im Innenraum der Kabine (Abbildung 31) erfolgt der Strahlvorgang. Dieses Gerätesystem besteht im Wesentlichen aus einem, auf zwei Schienen hin und her rollenden Wagen mit einer integrierten kreisförmigen Stahlplatte, die sich während dem Strahlvorgang mit einer konstanten Geschwindigkeit dreht. Die Grundplatte ist gegen Sandverletzungen mit einer Gummihülle geschützt, die auch eine bessere Haftung zwischen dem Probekörper und der Grundplatte sichert. Das ganze Dreh- Rollsystem ist mittels eines Anschlusskabels mit dem Kontrollpult verbunden [12].

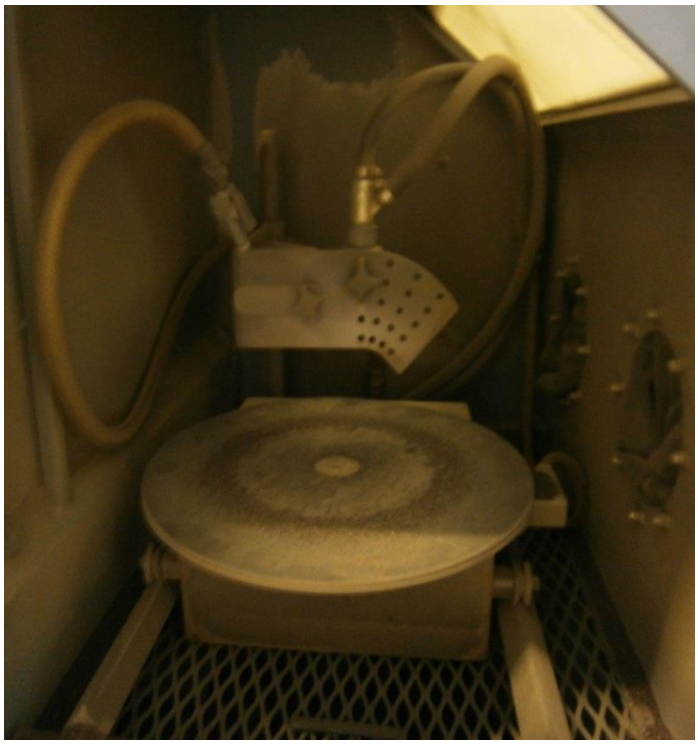


Abbildung 31: Kabine Innen

Der Sandstrahlvorgang erfolgt in vier nacheinander folgende Schritte.

- Probe einlegen und zentrieren
- Sandstrahldüse einstellen
- Sandstrahlen
- Probe säubern und entnehmen

Bei dem Einlegen in der Kabine muss der Probekörper zentriert werden, so dass die Probe sich genau in der Mitte der Stahlplatte befinden [12].

Wenn der Sandstrahlvorgang beendet, säubert man die Probe mit der Hilfe der Druckluftpistole. Dann ist der Probekörper für eine Behandlung mit Wehner/Schulze fertig und kann aus der Strahlkabine entnommen werden. In die Abbildung 32ist der Unterschied vor und nach dem Sandstrahlvorgang zu sehen.

Abbildung 32: Aussieht einer Probe vor und nach dem Sandstrahl

3.5 Texturmessung mittels optisches Geräts

Die Texturmessung eines Teils der im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Probekörper, wird mit der Hilfe des optisches Geräts FRT MicroProf erfasst (Abbildung 33). Das Gerät funktioniert als optisches Profilometer (2D) und als bildgebendes Messgerät (3D) mit einem direkt abbildenden Flächensensor. Dabei können die Rauheit und Welligkeiten der Oberfläche zwei- oder dreidimensional entsprechend der DIN, EN und ISO-Vorschriften bestimmt werden. MicroProf charakterisiert sich mit kurzen Messzeiten, große Messbereiche und die robuste Bauweise, die das Gerät geeignet für den täglich industriellen Einsatz machen. Die Software Mark III ermöglicht eine detaillierte Analyse der Messdaten [9].

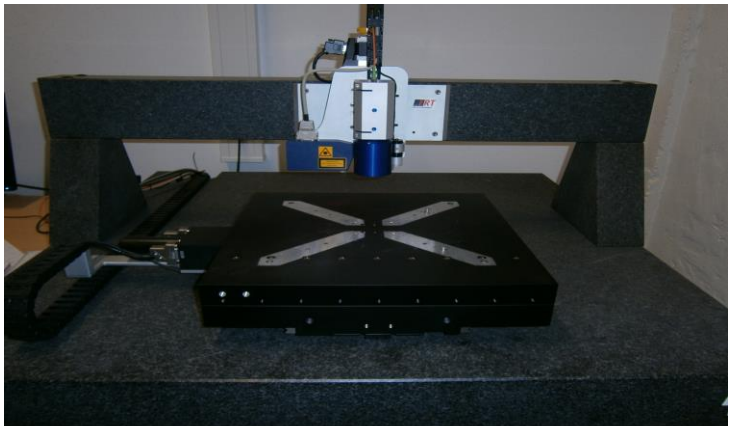


Abbildung 33: Optisches Gerät FRT MicroProf

Das Gewicht und die Abmessungen der zu vermessenden Proben dürfen die in den Spezifikationen des Geräts definierten Grenzwerte nicht überschreiten. Das Gerät ermöglicht je nach Ausführung Messungen bis zu 600 x 600 mm^2 an Proben von bis zu 5 kg. Die Probenhöhe beträgt standardmäßig bis zu 50 mm.

Die wesentlichen Komponenten der MicroProf sind:

- Sensor FRT CWL
- xy-Tisch
- x-Achse, motorisiert
- Sensorelektronik
- Regler

Der xy-Tisch ist auf einer Granitplatte angebracht, die die stabile Basis des Geräts stellt. Die obere Tischplatte besitzt ein Loch- Gewindemuster, das zur Befestigung spezieller Probenhalter gedacht ist. Der xy- Tisch bewegt sich in einer waagerechten Ebene, so dass eine Bewegung in beide Richtungen möglich ist. Die zu untersuchende Probe muss auf dem xy- Tisch befestigt sein [9].

Auf der Granitgrundplatte ist ferner die Sensorhalterung angeschraubt. Vorne an der Halterung ist Sensorhalterung befestigt. In diesem Sensorhalter steckt der Sensorkopf, der über ein Glasfaserkabel mit der Sensorelektronik verbunden ist.

Der eingesetzte Sensor benutzt ein Verfahren, das die chromatische Aberration von Linsen ausnutzt. Die Probe wird mit fokussiertem Weißlicht beleuchtet. Das Weißlicht wird von einer passive Optik mit großer chromatischer Aberration vertikal in Fokuspunkte verschiedener Farbe und somit Höhe verteilt. Trifft fokussiertes Licht auf eine Oberfläche, wird dieses Licht, im Gegensatz zu den unfokussierten Teilen des Strahls, optimal reflektiert. Es gelangt durch die gleiche Optik und ein Glasfaserkabel in ein Miniaturspektrometer (Abbildung 34).

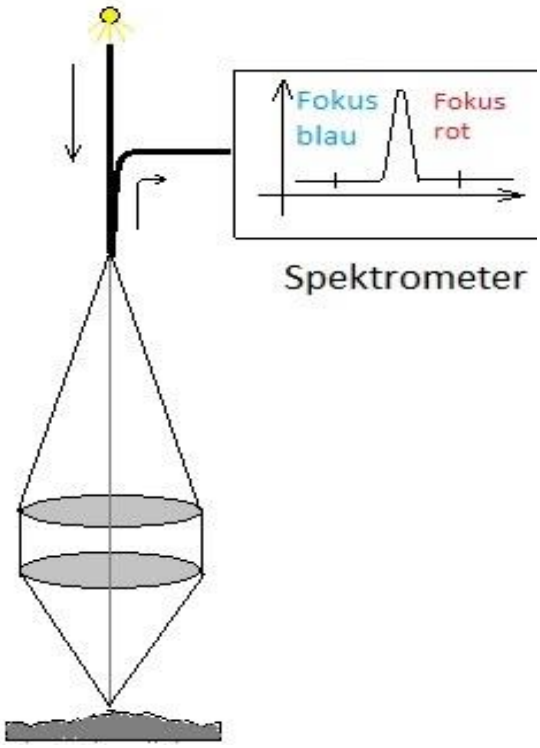


Abbildung 34: Prinzip des optischen Sensors

In Abhängigkeit vom eingesetzten Sensor beträgt der maximale Höhenmessbereich 300 µm bis 50 mm bei Sensorauflösung bis zu 3 mm.

Als Resultat von der optischen Erfassung können Linienprofile und Bilddaten dargestellt und vermessen werden, die Basis für eine Beurteilung des Zustands der Oberfläche sind [9].

4.6 Statistische Methode für Auswertung- T-test

Zur statistischen Analyse der Prüfergebnisse wird der so genannte t- Test verwendet.

Der t-Test untersucht, ob sich zwei empirisch gefundene Mittelwerte systematisch voneinander unterscheiden. Dieses statistische Verfahren ermöglicht die Feststellung, ob zwei betrachtete Gruppen in einem Merkmal wirklich unterschiedlich oder nicht sind. Die t-Verteilung wurde von einem Bierbrauer entdeckt, der mit dem Pseudonym „Student“ bekannt war. Daher bekam die t-Verteilung auch den Name „Studentische t-Verteilung“ [13].

Der t-Test zählt sich zur Gruppe der parametrischen Verfahren, da er nur bei intervallskalierten Daten angewendet werden kann. Die parametrischen Verfahren schätzen

Populationsparameter mittels statistischer Kennwerte wie dem arithmetischen Mittel oder der Varianz, für deren Berechnung die Intervallskaliertheit der Daten Voraussetzung ist [13].

Der maßgebende Kennwert des t-Tests ist Differenz der Mittelwerte:

$$\overline{x}_1 - \overline{x}_2$$

Gl. 1

Der t-Test beantwortet die Hauptfrage, wie wahrscheinlich ist die empirisch gefundene oder eine größere Mittelwertdifferenz unter allen möglichen theoretischen Differenzen.

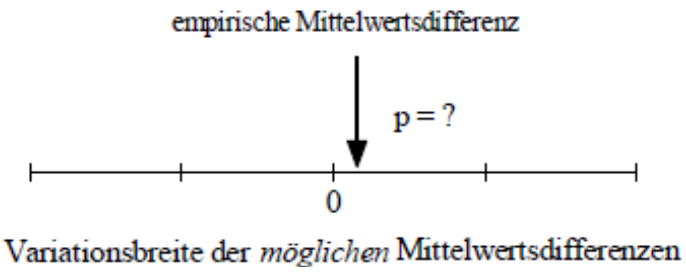


Abbildung 35: Fragestellung des t-Tests [Quantitative Methoden]

Viele statistische Verfahren dienen zur Überprüfung aufgestellter Hypothesen. Die zu untersuchende Hypothese bei der Durchführung eines t-Tests ist die Nullhypothese (H_0). Die Nullhypothese nimmt an, dass die Mittelwertdifferenz zufällig entstanden ist und es gibt keinen echten Unterschied zwischen den beiden untersuchten Gruppen. Beiden Gruppen sind zwei Populationen mit demselben Mittelwert. Demzufolge sollte die Differenz „p“ zwischen den Gruppen Null sein (Siehe Abbildung 35). Daraus stammt der Name dieser Hypothese (Nullhypothese H_0). Nach dieser Hypothese ist die Variation der Stichprobenmittelwerte auf Zufall oder auf einem Stichprobenfehler zurückzuführen [13], [14].

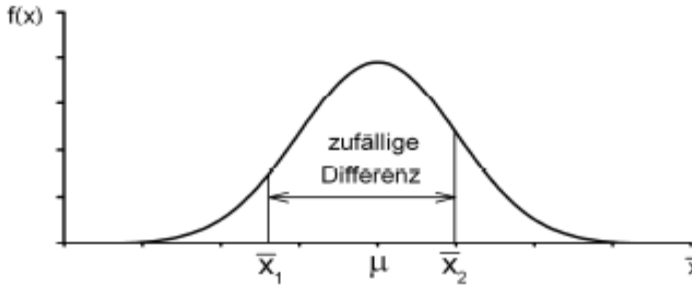


Abbildung 36: Stichprobenkennwertverteilung von Mittelwerten mit zwei zufällig entstandenen Stichprobenmittelwerten, sowie dem gemeinsamen Populationsmittelwert μ [Quantitative Methoden]

Es kann zusammengefasst werden, dass die Nullhypothese folgendes lautet:

Die Populationsmittelwerte der beiden Gruppen sind identisch und deshalb ist eine Mittelwertdifferenz von Null zu erwarten.

Um die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit einer empirisch gefundenen Differenz zu erleichtern, wird ein standardisiertes Maß für eine Mittelwertdifferenz eingeführt. Die standardisierten Differenzen der Stichprobenmittelwerte sind die so genannten t-Werte, während die t-Verteilung die Wahrscheinlichkeit eines t-Werts bestimmt. Die t-Werte können laut Gl. 2 allgemein definiert werden:

$$t_{df} = \frac{Mittelwertdifferenz_{empirisch} - Mittelwertdifferenz_{theoretisch}}{S\tan dardfehler}$$

$$t_{df} = \frac{(\overline{x}_1 - \overline{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\hat{\sigma}_{\overline{x}_1 - \overline{x}_2}}$$

Gl. 2

Die theoretische Mittelwertdifferenz ist $\mu_1 - \mu_2 = 0$ und kann bei der Berechnung weggelassen werden. Nach der Gl. 3 ist die t- Wert nur durch den Zusammenhang zwischen der Mittelwertdifferenz ($\overline{x_1} - \overline{x_2}$) und der geschätzten Standardfehler ($\sigma_{x_1 - x_2}$) untersucht. Die vereinfachte Formel lautet:

$$t_{df} = \frac{\overline{x}_1 - \overline{x}_2}{\hat{\sigma}_{\overline{x}_1 - \overline{x}_2}}$$

Gl. 3

Der Zusammenhang zwischen der Mittelwertdifferenz und der geschätzten Standartfehler ist auf die Abbildung 37 graphisch dargestellt.

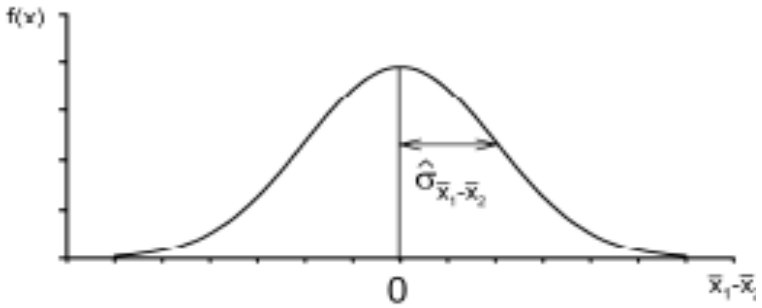


Abbildung 37: Konstruktion einer Stichprobenkennwertverteilung von Mittelwertdifferenzen unter der Nullhypothese [Quantitative Methoden]

Auf die Abbildung 38 stellt die Wahrscheinlichkeit eines t-Wertes in einer t-Verteilung dar.

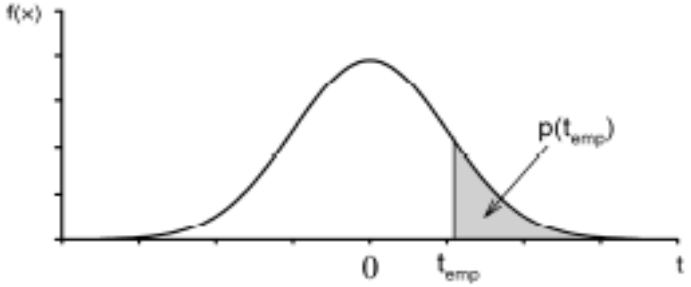


Abbildung 38: Die Wahrscheinlichkeit eines t-Wertes in einer t-Verteilung [Quantitative Methoden]

Man unterscheidet Einstichproben-t-Test und Zweistichproben-t-Test. Maßgebend für die Ziele dieser Diplomarbeit ist der Zweistichproben-t-Test. Damit wird geprüft, wie sich die Mittelwerte zweier Gruppen zueinander verhalten. Ein Zweistichproben-t-Test wird durch folgende Größen definiert [14]:

- Stichprobenumfänge n_1 und n_2
- Stichprobenmittelwerte $\overline{x}_1$ und $\overline{x}_2$
- Standardabweichungen s_1 und s_2

Zu berechnen ist:

$$t_{df} = \frac{\overline{x}_1 - \overline{x}_2}{s_g}\sqrt{\frac{n_1.n_2}{n_1+n_2}}$$ mit Freiheitsgrad $f = n_1 + n_2 - 2$,

Gl. 4

wo $s_g = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2}}$ die gemeinsame Schätzung von der Standardabweichung ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$) aus beiden Stichprobenabweichungen s_1 und s_2 ist.

Zur Beurteilung der Signifikanz eines t-Test sollte ein Entscheidungskriterium (Signifikanzniveau) vor der Durchführung des t-Tests festgelegt werden. Dieses Entscheidungskriterium wird als akzeptable α-Fehler-Wahrscheinlichkeit gekennzeichnet. Meistens liegt das Signifikanzniveau bei 5%. Die empirische Mittelwertdifferenz wird als signifikant bezeichnet, wenn die ermittelte Wahrscheinlichkeit des t-Werts kleiner als der angenommenen α-Fehler ist [14].

4 Untersuchungen zur Griffigkeit von Splittmastixasphalt

4.1 Prüfprogramm

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die Griffigkeit von Splittmastixasphalten beurteilt. Diese Untersuchung ist nach der Fragestellung orientiert, wie die Griffigkeit durch Variation von den verschiedenen Umgebungsparametern beeinflusst wird. Wesentliche Prüfparameter des Prüfverfahrens Wehner/ Schulze werden in einer experimentellen Parameterstudie variiert und ihre Auswirkungen untersucht. Dabei ist ein bestimmtes Prüfprogramm vorzusehen, wobei der Einfluss von der Probekörperlage in der Platte und Wiederholbarkeit bei Standartbedingungen (Polieren, Strahlen) zu untersuchen sind.

Bei der Herstellung der rechteckigen Asphaltplatten mittels Walzsegmentverdichter ist eine regelmäßige Verdichtung auf der ganzen Fläche der Platte schwer zu gewährleisten. Dabei wird der Hohlraumgehalt in verschiedenen Positionen in der Platte inkonstant. Deswegen werden die Ergebnisse von 6 Probekörpern aus der Mitte der Platte mit den erhaltenen Reibungsbeiwerten von 8 Probekörpern aus den Ränder der Platte verglichen.

Die Probekörper müssen bei realitätsnahen Bedingungen überprüft werden. Deswegen werden sie nach der Herstellung mit Sand gestrahlt, um den Bitumenfilm von der Oberfläche zu entfernen. Dabei muss noch untersucht werden, ob die Dauer des Sandstrahlens einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Das ist kontrollierbar durch Auswahl zwischen den Programmen der Strahlkabine, die sich nach der Dauer des Sandstrahlens unterscheiden.

Ein weiterer Prüfparameter ist die Poliermittelmenge. Nach dem Untersuchungsprogramm ist noch das Mischgutverhältnis des Wassers und Quarzmehls zu variieren, um deren Auswirkungen auf dem Reibungsbeiwert zu definieren.

Jeder Probekörper wird stufenweise nach einer bestimmten Überrollungsanzahl poliert (0, 1500, 2500, 5000, 12000, 30000, 90000, 180000, 360000, 540000) und unmittelbar überprüft. Jeder Lastwechsel führt zur Veränderung der Probekörperoberfläche, die sich mit entsprechendem Reibungsbeiwert charakterisiert (Siehe Tabelle 4). Die Prüfgummis und die Poliermittel werden nach 4 Probekörpern erneuert.

Tabelle 4: Stufenweise Ermittlung der Reibungsbeiwerte μ_{PWS}

PK	Hohlraum-gehalt	Reibungsbeiwert									
№	[V-%]	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000

Die Oberflächen der Probekörper, bei denen die Sandstrahldauer zu untersuchende Einflussparameter ist, werden zusätzlich mit Laser gescannt. Jeder Probekörper wird 3 Mal aufgenommen:

- Unmittelbar nach dem Sandstrahl (am Anfang)
- Nach 30. 000 Überrollungen
- Nach 540. 000 Überrollungen (am Ende)

4.2 Prüfergebnisse und Auswertung

In diesem Kapitel wird eine entsprechende Auswertung der Ergebnisse beschrieben, die Grund zur Feststellung wesentlicher Schlussfolgerungen im Zusammenhang der Oberflächengriffigkeit sind.

4.2.1 Einfluss der Probekörpergewinnung aus der Platte

Für die Ziele dieses Abschnitts werden 14 Probekörpers mit Untersuchung des Einflusses der Lage in der Platte geprüft. Zur Herstellung der Proben werden 10 Platten notwendig. Die Probekörper werden aus verschiedenen Lagen dieser Platten ausgebohrt (Abbildung 39):

- 6 Platten mit 1 Probekörper aus der Mitte
- 4 Platten mit 2 Probekörper aus dem Rand

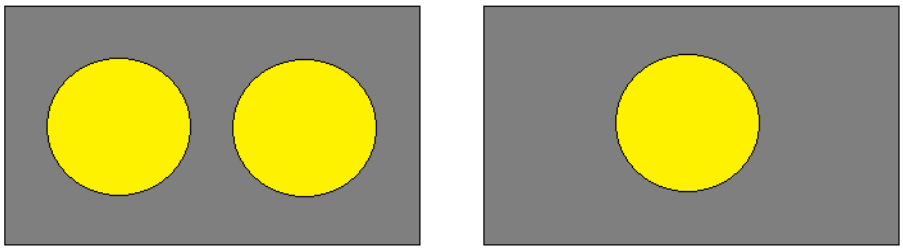


Abbildung 39: Lage der Probekörper in der Platte

Zur Vorbereitung der Probekörper ist das Programm 4 der Strahlkabine benutzt. Dabei ist jeder Probekörper im Zeitraum von 110 sec mit Sand gestrahlt. Danach ist er auf Wehner/ Schulze für die weitere Untersuchung eingebaut.

Bei dem Poliervorgang sind Wasser und Quarzmehl als Poliermittel verwendet. Sie sind im Mischgutverhältnis 60g Quarzmehl pro 1 Liter Wasser. Nach jedem Poliervorgang sind zusätzlich 70g Quarzmehl dazu gegeben, da ein großes Teil von dem auf Probe bleibt.

In der Tabelle 5 sind die Ergebnisse von den Probekörpern aus dem Rand der Platte dargestellt.

Tabelle 5: Reibungsbeiwerte- PK Rand

PK	Hohlraum-gehalt, V_m	Reibungsbeiwert									
№	[V-%]	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000
Z023A	12,5	0,520	0,364	0,356	0,349	0,326	0,289	0,242	0,210	0,174	0,152
Z023B	14,5	0,516	0,385	0,364	0,354	0,323	0,288	0,241	0,205	0,176	0,164
Z025A	12,0	0,529	0,397	0,376	0,361	0,313	0,285	0,240	0,200	0,175	0,156
Z025B	14,0	0,501	0,366	0,347	0,337	0,309	0,271	0,222	0,188	0,167	0,159
Z027A	15,2	0,521	0,372	0,363	0,351	0,324	0,287	0,243	0,215	0,188	0,171
Z027B	15,2	0,493	0,374	0,361	0,356	0,323	0,277	0,225	0,188	0,161	0,149
Z029A	15,8	0,508	0,392	0,385	0,380	0,349	0,301	0,260	0,228	0,195	0,177
Z029B	16,6	0,497	0,369	0,363	0,351	0,337	0,303	0,254	0,219	0,192	0,172

Die Abbildung 40 stellt in Diagrammform den Verlauf der Reibungsbeiwerte für die Probekörper aus dem Rand dar.

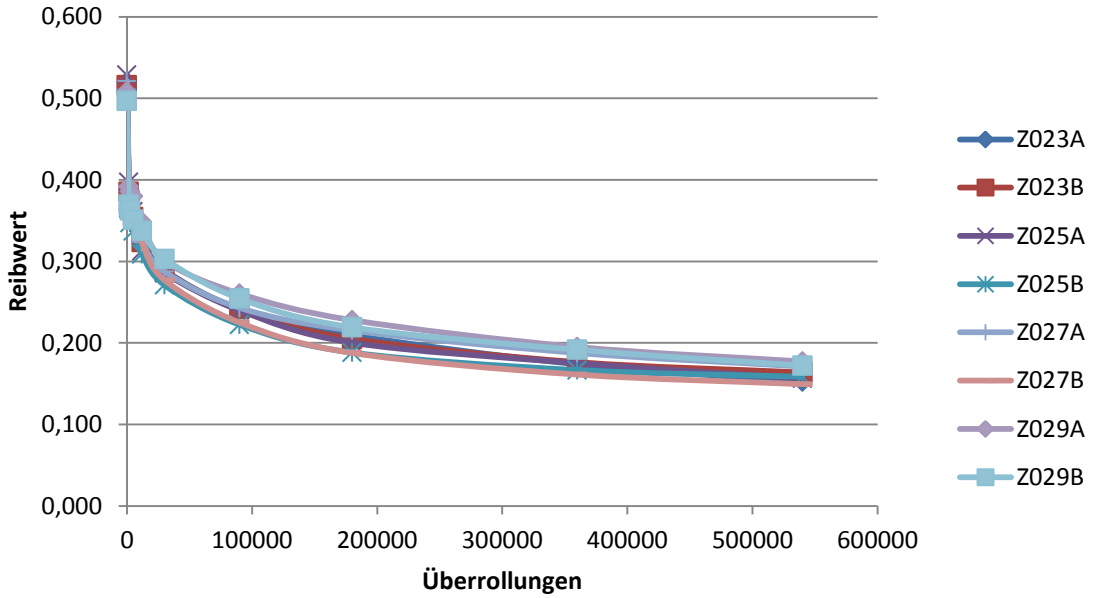


Abbildung 40: Reibwert- PK Rand

Das gleiche Untersuchungsprozedere ist mit den Probekörpers aus der Mitte der Platten durchgeführt. Deren Ergebnisse sind in Tabelle 6 und Abbildung 41 gesammelt:

Tabelle 6: Reibungsbeiwerte PK-Mitte

PK	Hohlraum gehalt, V_m	Reibungsbeiwert									
№	[V-%]	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000
Z024A	13,5	0,488	0,362	0,347	0,331	0,306	0,269	0,228	0,191	0,167	0,155
Z026A	11,6	0,514	0,361	0,349	0,336	0,309	0,279	0,242	0,205	0,192	0,167
Z028A	13,9	0,544	0,398	0,378	0,364	0,332	0,309	0,260	0,236	0,198	0,185
Z030A	15,5	0,499	0,378	0,369	0,364	0,354	0,329	0,294	0,246	0,189	0,170
Z031A	14,5	0,532	0,429	0,415	0,402	0,369	0,323	0,284	0,253	0,223	0,204
Z032A	14,1	0,530	0,473	0,457	0,429	0,397	0,348	0,283	0,249	0,220	0,199

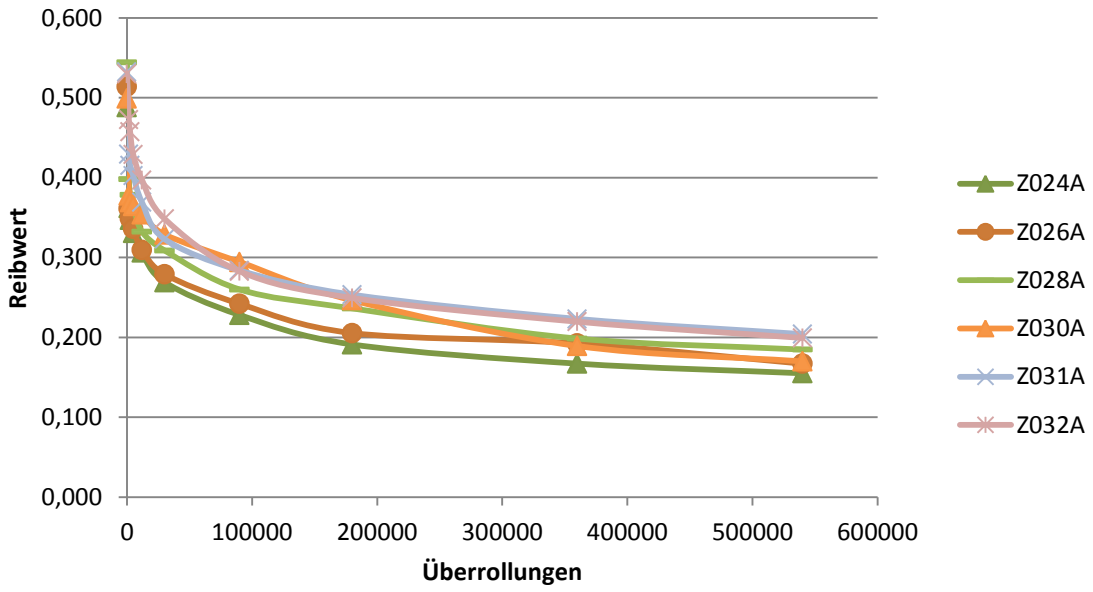


Abbildung 41: Reibwerte- PK Mitte

Auf den Abbildung 42 und 43 sind Diagramme dargestellt, die die Mittelwerte und die 1,96-fache Standardabweichungen der erhaltenen Ergebnisse mit dem Prüfparameter Probekörpergewinnung aus der Platte zusammenfassen. Die Resultate charakterisieren sich mit einer guten Wiederholbarkeit der Reibungsbeiwerte.

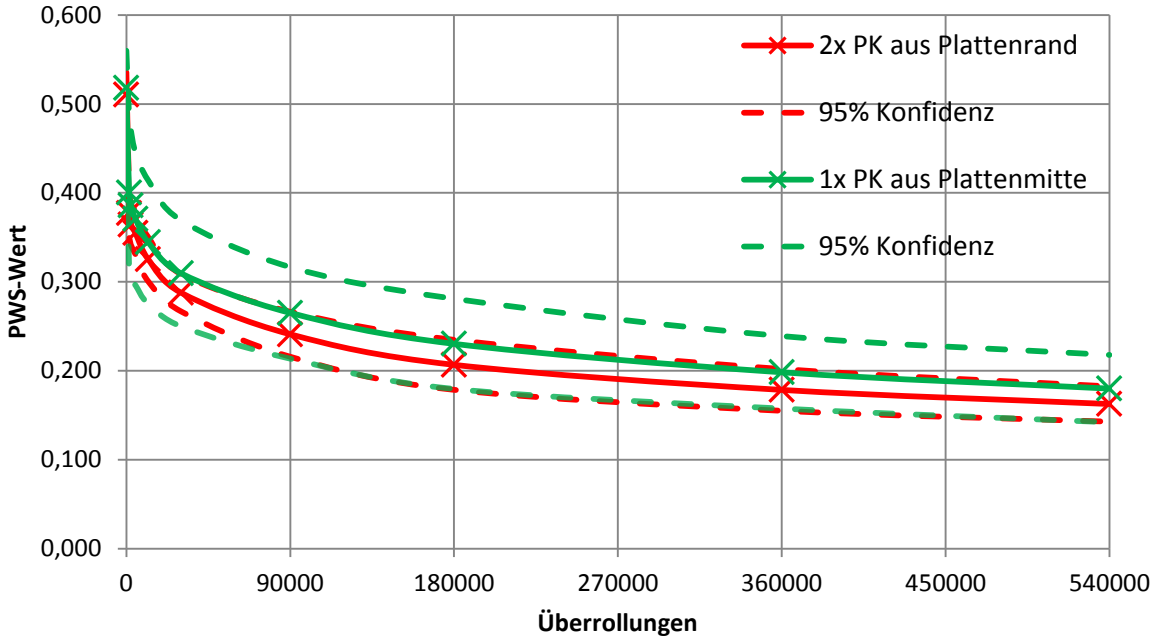


Abbildung 42: Einfluss Probekörpergewinnung aus der Platte- Mittelwert und Standardabweichung

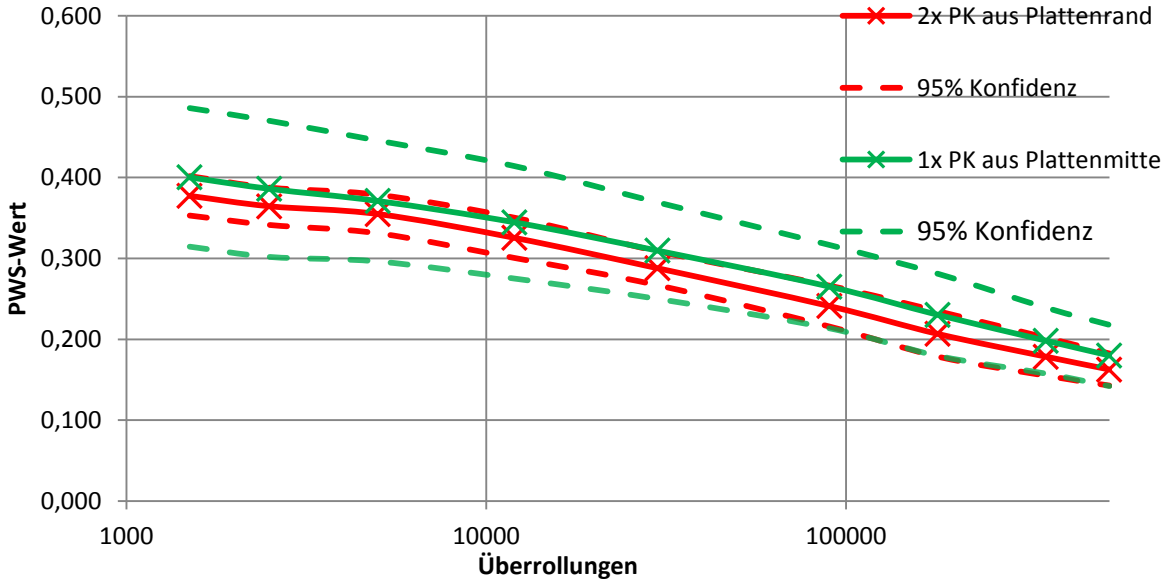


Abbildung 43: Einfluss Probekörpergewinnung aus der Platte- Mittelwert und Standardabweichung (logaritmische Darstellung)

Bei 0 Polierüberrollungen weisen alle Probekörper ein Reibwert von ungefähr 0,500 auf. Dann betrachtet man eine rasche Senkung der Griffigkeit. Bei 1500 Überrollungen sind die Reibungsbeiwerte zwischen 0,360 und 0,400. Während dem ersten Poliervorgang (1500 Überrollungen) werden die feinen Fraktionen aus der Probenoberfläche entfernt. Demzufolge ist der Unterschied zwischen den Reibungsbeiwerten am Anfang wesentlicher. Bei den nächsten Lastwechseln senken die Reibwerte gleichmäßiger und am Ende beträgt der Reibwert etwa 0,150.

Um zu analysieren ob die Lage der Probekörper in der Platte einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis hat, wird die Untersuchung mittels statistischer Verfahren „t-Test“ ausgewertet. Die notwendige Kenngröße für Durchführung des t-Tests sind die Mittelwerte der beiden Gruppen (PK Rand und PK Mitte) und deren Standartabweichungen.

Tabelle 7: Statistische Auswertung- t-Test

Überrollungen	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000
2x PK-Plattenrand	0,510	0,377	0,364	0,355	0,325	0,288	0,241	0,207	0,178	0,163
95% Konfidenz	0,536	0,402	0,388	0,379	0,350	0,309	0,266	0,235	0,202	0,182
95% Konfidenz	0,485	0,353	0,341	0,331	0,300	0,267	0,216	0,179	0,155	0,143
1x PK-Plattenmitte	0,518	0,400	0,386	0,371	0,345	0,310	0,265	0,230	0,198	0,180
95% Konfidenz	0,560	0,486	0,470	0,446	0,414	0,369	0,317	0,281	0,239	0,218
95% Konfidenz	0,476	0,315	0,302	0,296	0,275	0,250	0,214	0,180	0,157	0,142
Ergebnis T-Test	43,1	18,1	19,7	27,9	17,9	8,3	4,2	4,9	4,4	4,9

Die Ergebnisse des t-Tests können nach den bestimmten Grenzen beurteilt werden:

- Wenn < 5% - signifikant unterschiedlich
- Wenn < 1%- sehr signifikant unterschiedlich
- Wenn < 0,1%- hoch signifikant unterschiedlich

Als signifikant unterschiedlich sind die Mittelwerte der beiden Gruppen zwischen 90000 und 540000 Überrollungen bestimmt. Allgemein kann abgeschlossen werden, dass die Probekörpergewinnung aus der Platte keinen sehr signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Da die Ergebnisse von den beiden Gruppen (PK Rand und PK Mitte) ähnlich sind, werden die weitere Probekörpers nur aus zwei Ränder einer Platte ausgebohrt.

4.2.2 Einfluss der Sandstrahldauer

Die ersten 14 PK, bei denen der Einfluss Lage in der Platte zu untersuchen ist, wurden bei Programm 4 (110 sec) der Sandstrahlkabine gestrahlt. Für eine Ermittlung Einfluss der Strahldauer auf die Griffigkeit sind noch 8 Probekörper vorgesehen:

- 4 PK mit Strahldauer von 2 min und 47 sec (Programm 3)
- 4 PK mit Strahldauer von 1 min und 25 sec (Programm 5)

Für die Erfassung des Einflusses der Strahldauer des Programmes 4 (110 sec) sind 8 PK übernommen, die schon mit Untersuchung Einfluss der Probekörpergewinnung aus der Platte geprüft sind. Diese Probekörper charakterisieren sich mit den niedrigsten Reibungsbeiwerten von den 3 untersuchenden Gruppen (siehe Tabelle 5 und Abbildung 40)

Tabelle 8 und Abbildung 44 fassen die Reibungsbeiwerte der Probekörper zusammen, die unter Programm 3 der Strahlkabine vorbereitet sind. Das ist das längste von den verwendeten Programmen und dauert 167 sec. Die entsprechenden Probekörper weisen ein bisschen höhere Reibungsbeiwerte auf, als diese, die weniger Zeit mit Sand gestrahlt sind.

Tabelle 8: Reibungsbeiwerte PK mit Strahldauer 167 sec (Programm 3)

PK	Hohlraum-gehalt, *V* m	Reibungsbeiwert									
№	[V-%]	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000
Z034A	14,6	0,540	0,382	0,363	0,351	0,335	0,304	0,269	0,245	0,211	0,197
Z035B	15,0	0,547	0,372	0,354	0,339	0,310	0,278	0,202	0,193	0,179	0,169
Z041B	15,7	0,555	0,412	0,388	0,371	0,339	0,299	0,240	0,222	0,204	0,190
Z043A	15,3	0,545	0,432	0,408	0,389	0,360	0,325	0,275	0,255	0,237	0,220

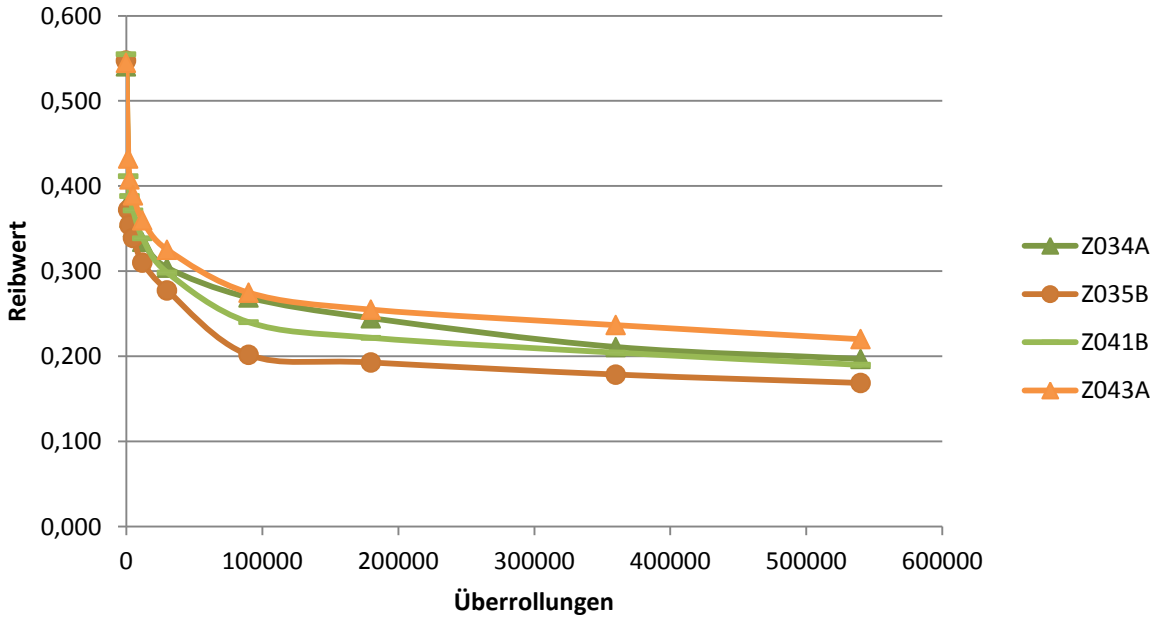


Abbildung 44: Reibungsbeiwerte μ_{pws}- PK mit Sandstrahldauer Programm 3 (167sec)

Die Ergebnisse von der dritten Gruppe (Programm 5) sind ähnlich mit den Ergebnissen des Programmes 3. Diese Werte sieht man auf der Tabelle 9 und Abbildung 45.

Tabelle 9: Reibungsbeiwerte PK mit Strahldauer 85 sec (Programm 5)

PK	Hohlraum-gehalt, *V* m	Reibungsbeiwert									
№	[V-%]	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000
Z034B	14,4	0,505	0,395	0,383	0,369	0,343	0,303	0,250	0,224	0,193	0,176
Z035A	14,7	0,537	0,406	0,386	0,374	0,346	0,311	0,236	0,218	0,197	0,189
Z041A	15,5	0,528	0,394	0,377	0,362	0,336	0,307	0,234	0,211	0,189	0,178
Z043B	14,8	0,529	0,399	0,383	0,377	0,350	0,315	0,239	0,228	0,219	0,206

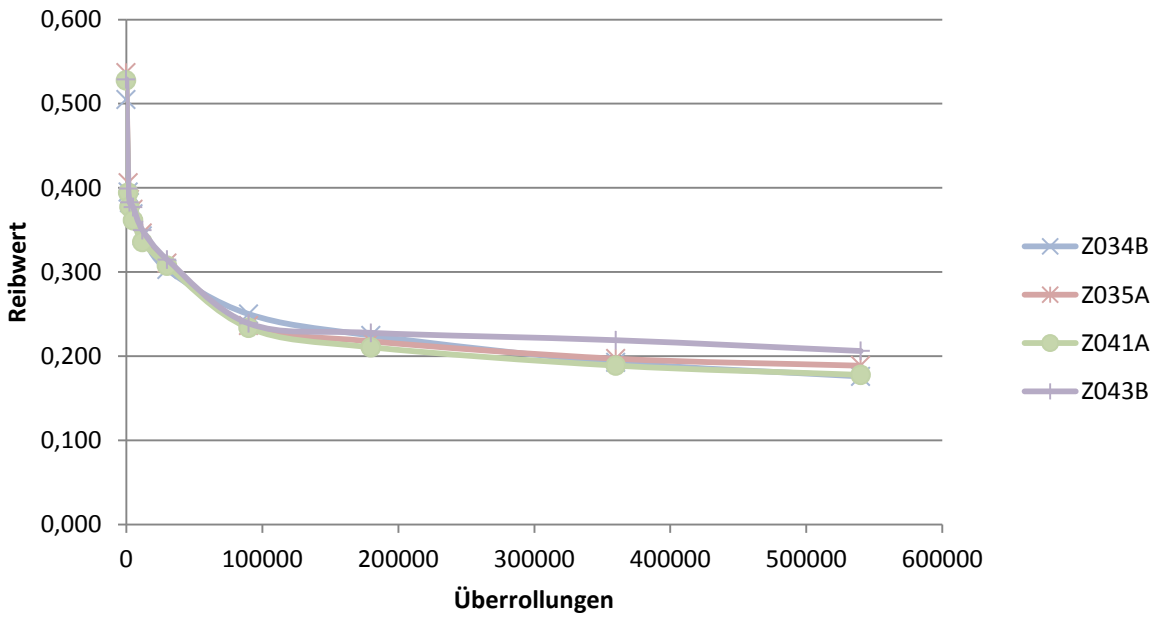


Abbildung 45: Reibungsbeiwerte μ_{pws}- PK mit Sandstrahldauer Programm 5 (85sec)

Die Mittelwerte und 1,96-fache Standardabweichungen dieser Ergebnisse sind auf den Abbildungen 46 und 47 gezeigt.

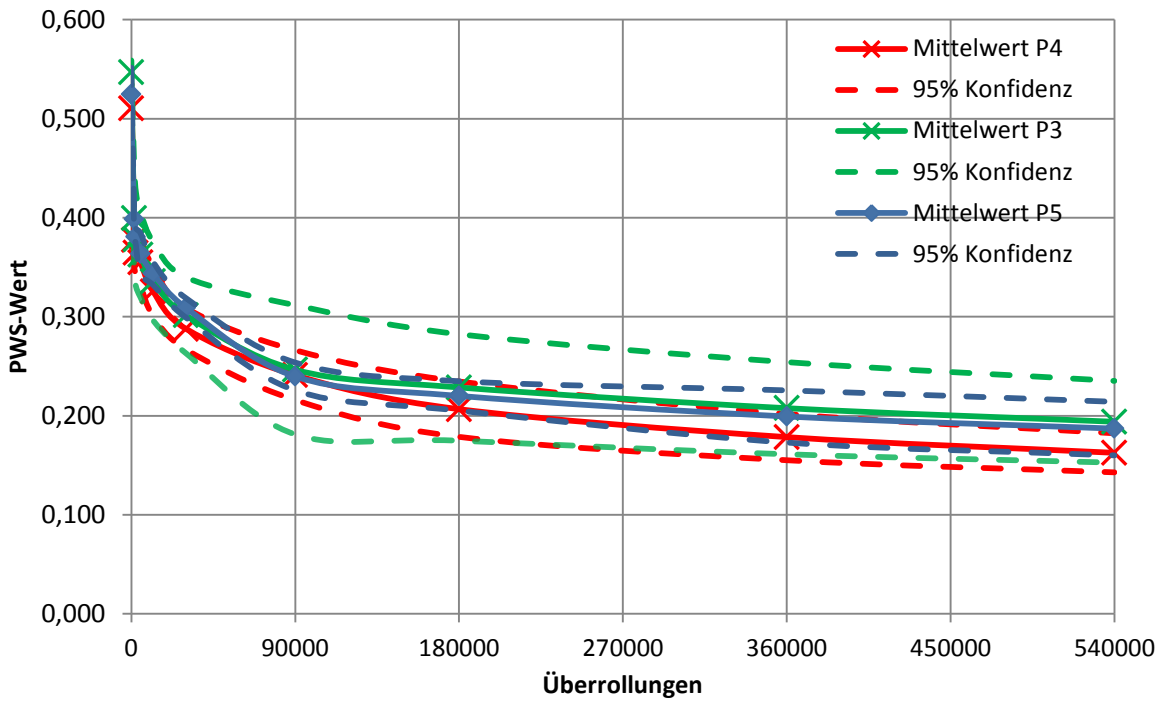


Abbildung 46: Mittelwerte und Standardabweichungen- Einfluss der Sandstrahldauer

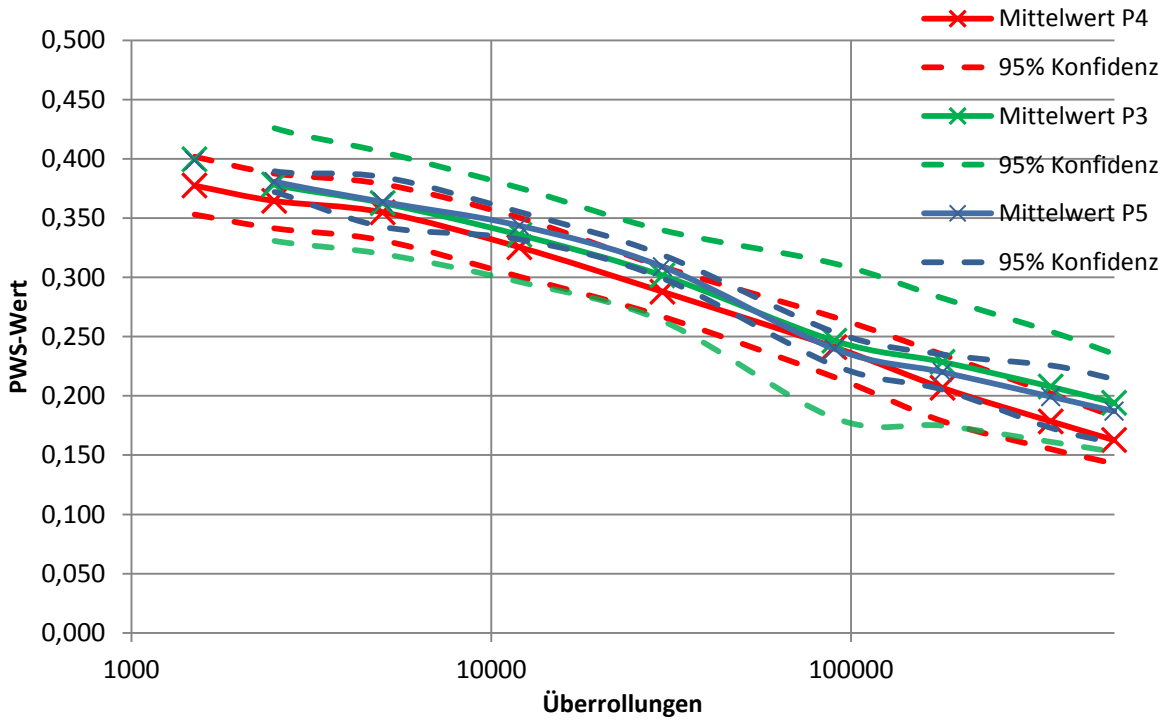


Abbildung 47: Mittelwerte und Standardabweichungen- Einfluss der Sandstrahldauer- logaritmische Darstellung

Die Ergebnisse der drei untersuchten Gruppen von Probekörper sind mittels t- Test zwischen einander verglichen (siehe Tabelle 10). Nach dem Vergleich von Probekörper mit Sandstrahlprogramm 3 und diesen mit Sandstrahlprogramm 4 wird es sichtbar, dass die Reibungsbeiwerte im Bereich 1500 ÜR-180 000 ÜR bis auf wenige Ausnahme gleich sind.

Tabelle 10: Einfluss der Sandstrahldauer- statistische Analyse (t-Test)

Überrollungen	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000
PK-Strahldauer P3	0,547	0,399	0,378	0,363	0,336	0,301	0,246	0,229	0,208	0,194
95% Konfidenz	0,559	0,453	0,426	0,406	0,375	0,340	0,312	0,282	0,254	0,235
95% Konfidenz	0,535	0,346	0,331	0,320	0,296	0,263	0,181	0,175	0,161	0,153
PK-Strahldauer P4	0,510	0,377	0,364	0,355	0,325	0,288	0,241	0,207	0,178	0,163
95% Konfidenz	0,536	0,402	0,387	0,379	0,350	0,309	0,266	0,235	0,202	0,182
95% Konfidenz	0,485	0,353	0,341	0,331	0,301	0,267	0,216	0,179	0,155	0,143
PK-Strahldauer P5	0,505	0,395	0,383	0,369	0,343	0,303	0,250	0,224	0,193	0,176
95% Konfidenz	0,537	0,406	0,386	0,374	0,346	0,311	0,236	0,218	0,197	0,189
95% Konfidenz	0,528	0,394	0,377	0,362	0,336	0,307	0,234	0,211	0,189	0,178
T-Test P4-P3	0,036	7,739	20,382	43,828	29,553	14,351	68,640	9,294	1,595	0,511
T-Test P4-P5	10,895	0,946	1,634	3,983	2,352	0,425	84,949	11,582	2,127	0,561
T-Test P3-P5	2,558	95,075	75,975	52,169	49,118	48,621	70,546	57,216	56,322	60,541

4.2.3 Variation der Poliermittel

Zur Analyse Einflusses des Poliermittels wird das Quarzmehl von dem Poliermittel des entfernt. Es werden die Reibungsbeiwerte von 4 PK analysiert, die nur mit Wasser poliert sind. Die erhaltenen Resultate sind in der Tabelle 11 und Abbildung 48 zusammengefasst.

Tabelle 11: Reibungsbeiwerte $\mu_{(1)}$-Poliermittel Wasser

PK	Hohlraum-gehalt, V_m	Reibungsbeiwert									
№	[V-%]	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000
Z048A	15,3	0,509	0,522	0,526	0,525	0,514	0,497	0,489	0,478	0,449	0,423
Z048B	15,7	0,471	0,488	0,493	0,485	0,483	0,474	0,450	0,448	0,422	0,402
Z049A	14,5	0,485	0,494	0,495	0,485	0,496	0,498	0,461	0,467	0,444	0,416
Z049B	15,5	0,490	0,492	0,502	0,496	0,495	0,490	0,459	0,451	0,428	0,409

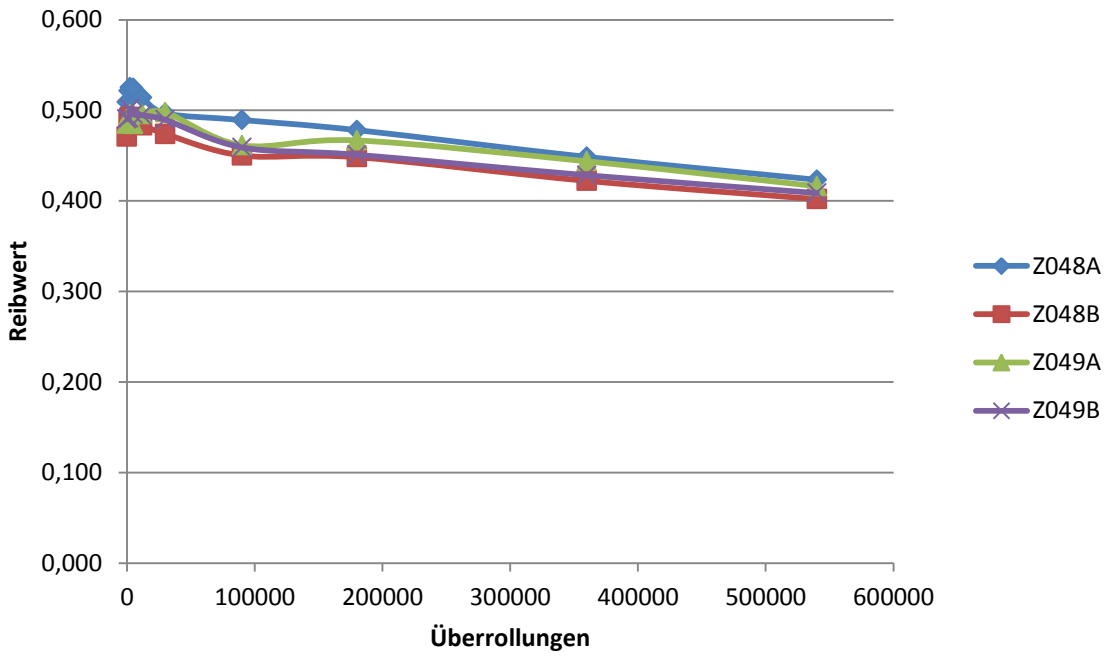


Abbildung 48: Reibungsbeiwerte μ_{pws}- Einfluss der Poliermittel

Der Verlauf der Reibwerte ist bis 12 000 Überrollungen unregelmäßig. Dann senken die Linien gleichmäßiger. Aus Diagramm wird sichtbar, dass die Resultate fast gleich sind. Dasselbe kann man auch aus die Abbildung 49 und Abbildung 50 mit den Mittelwerten und Standardabweichungen schlussfolgern. Zur einen genauen Analyse Einfluss der Poliermittel werden diese Werte mit den Ergebnissen von der ersten untersuchenden Gruppe von Probekörper (Poliervorgang mit dem üblichen Wasser/Quarzmehl-Mischgut) verglichen (Tabelle 12).

Tabelle 12: Reibungsbeiwerte $\mu_{(2)}$-Poliermittel Wasser/Quarzmehl-Mischgut

PK	Hohlraum-gehalt	Reibungsbeiwert									
№	[V-%]	0	1500	2500	5000	12000	30000	90000	180000	360000	540000
Z023A	8,3	0,520	0,364	0,356	0,349	0,326	0,289	0,242	0,210	0,174	0,152
Z023B	9,4	0,516	0,385	0,364	0,354	0,323	0,288	0,241	0,205	0,176	0,164
Z025A	7,5	0,529	0,397	0,376	0,361	0,313	0,285	0,240	0,200	0,175	0,156
Z025B	9,2	0,501	0,366	0,347	0,337	0,309	0,271	0,222	0,188	0,167	0,159
Z027A	9,3	0,521	0,372	0,363	0,351	0,324	0,287	0,243	0,215	0,188	0,171
Z027B	9	0,493	0,374	0,361	0,356	0,323	0,277	0,225	0,188	0,161	0,149
Z029A	8,4	0,508	0,392	0,385	0,380	0,349	0,301	0,260	0,228	0,195	0,177
Z029B	8,4	0,497	0,369	0,363	0,351	0,337	0,303	0,254	0,219	0,192	0,172

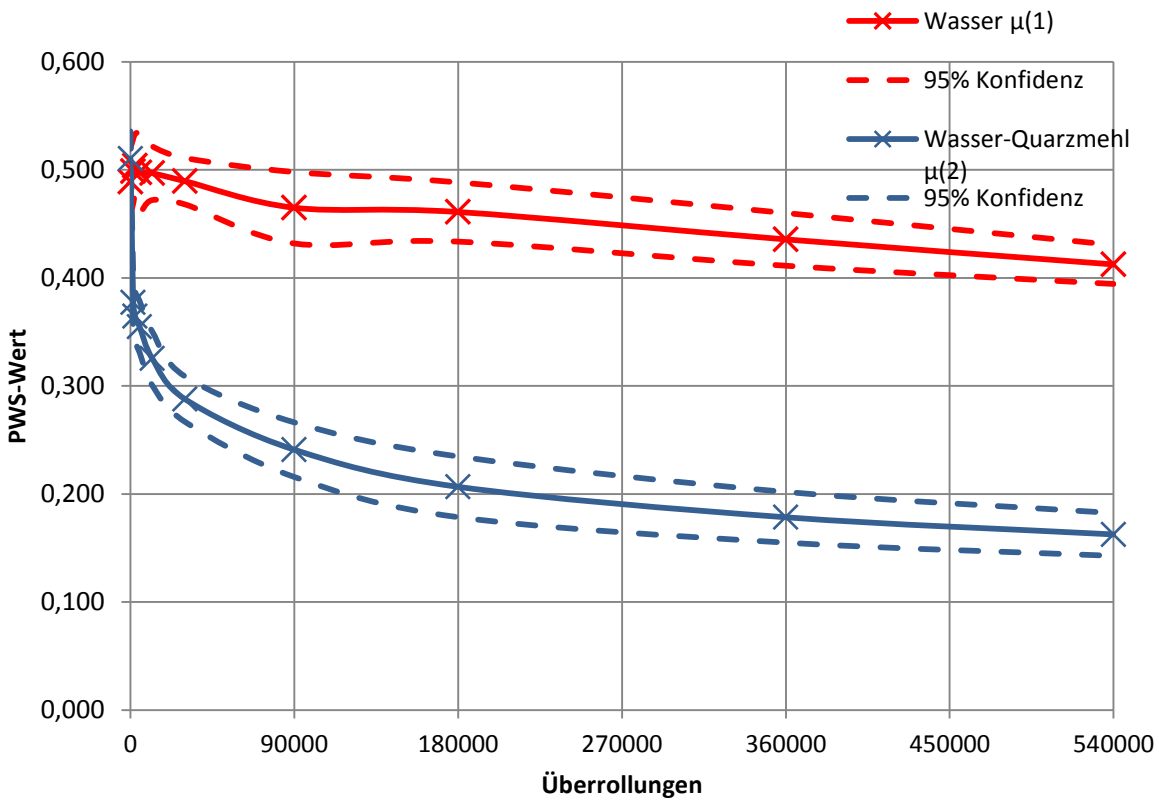


Abbildung 49: Einfluss der Poliermittel- Mittelwerte und Standardabweichungen

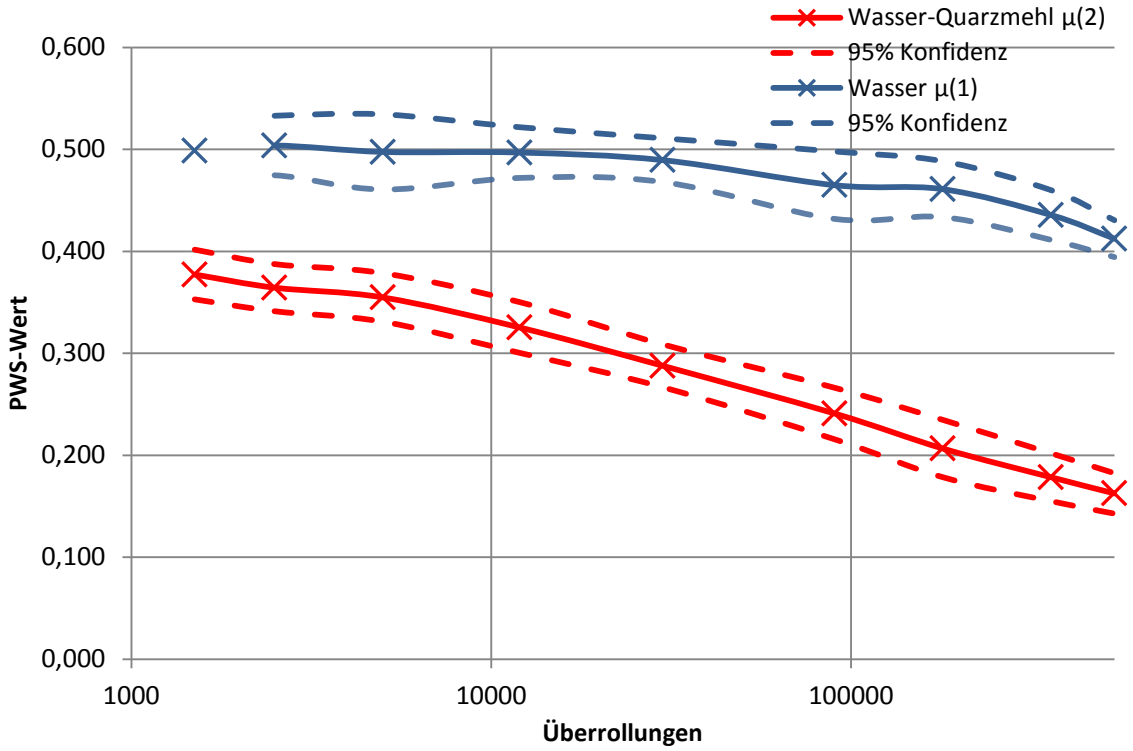


Abbildung 50: Einfluss der Poliermittel- Mittelwerte und Standardabweichungen-logaritmische Darstellung

Unter der Annahme, dass $\mu_{anf(1)}$ = 0, 489; $\mu_{end(1)}$=0,413 und $\mu_{anf(2)}$ =0,510; $\mu_{end(2)}$=0,163, können folgenden Analyse gemacht werden:

$\frac{\mu_{end(1)}}{\mu_{anf(1)}} = \frac{0,413}{0,489} = 0,85$ → 85% von der Anfangsgriffigkeit ist übrig am Ende. Folglich ist die Polierwirkung des Wassers gering.

$\frac{\mu_{end(2)}}{\mu_{anf(2)}} = \frac{0,163}{0,510} = 0,32$ → 32% übrige Griffigkeit am Ende des Poliervorgangs. Das zeugt von der wesentliche Polierwirkung von dem Quarzmehl.

Die zwei Gruppen von Probekörpern weisen fast die gleiche Anfangsgriffigkeit auf. Das ist von der Beziehung $\frac{\mu_{anf(1)}}{\mu_{anf(2)}} = \frac{0,489}{0,510} \approx 1$ bestätigt. Aber die Griffigkeit sinkt am Ende des Poliervorganges erheblich, wenn im Poliermischgut Quarzmehl vorhanden ist:

$\frac{\mu_{end(2)}}{\mu_{end(1)}} = \frac{0,163}{0,413} = 0,39$ → ungefähr 60% niedrige Endgriffigkeit wegen der Quarzmehlwirkung.

4.3 Beispielhafte Darstellung der Oberflächentextur

Der Poliervorgang kann mittels optischer Erfassung der Probekörpertextur auch visuell verfolgt werden. Die Oberfläche des entsprechenden Probekörpers wird an vier Stellen mit der Hilfe des Geräts FRT MicroProf erfasst (siehe Abbildung 51). Infolgedessen werden Bilder der Oberfläche nach 3 Belastungsstufen vorhanden sein. Dabei kann man die Oberflächenzustand am Anfang (0 ÜR), nach 30 000 ÜR und am Ende (540 000 ÜR) vergleichen.

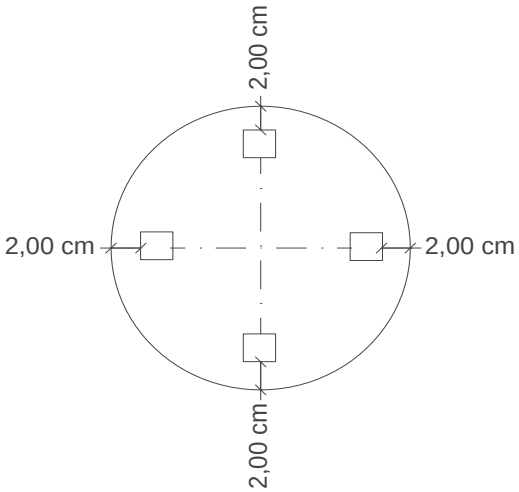


Abbildung 51: Topographieerfassung der Oberfläche mittels optischen Geräts

Zur einen beispielhaften Darstellung der Oberflächentextur werden in diesem Kapitel Bilder von drei Probekörpern aus verschiedene Prüfgruppen verglichen:

- Z034A- mit Dauer des Sandstrahlens 167 sec (Programm 3)
- Z034B- mit Dauer des Sandstrahlens 85 sec (Programm 5)
- Z049A- mit Poliermittel Wasser

Die nächsten drei Abbildungen verfolgen den Poliervorgang des PK Z034A, der unter dem längsten Programm (P3- 167 sec) der Strahlkabine vorbereitet ist. Am Anfang ist eine gute Makrotextur ersichtlich. Auf der Abbildung 52 kann man jede Spitze der Oberfläche sehen. In diesem Zustand ist der Probekörper nur mit Sand gestrahlt und noch nicht poliert. In diesem Moment beträgt der Reibungsbeiwert 0,540.

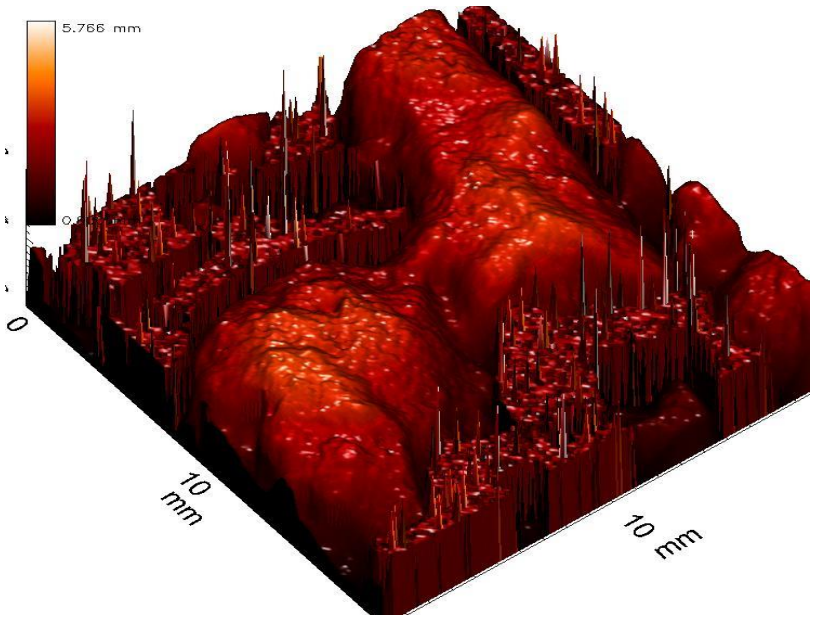


Abbildung 52: PK Z034A vor dem Poliervorgang (0 ÜR)

Nach 30 000 ÜR (siehe Abbildung 53) sinkt der Reibungsbeiwert zu 0,304 und Beweis dafür ist die glattere Makrotextur. In diesem Zeitpunkt ist die Mikrotextur mehr sichtbar. Die Oberfläche ist schon in gewissen Grad poliert und die Spitzen der Mikrotextur sind erreichbar für die Laser.

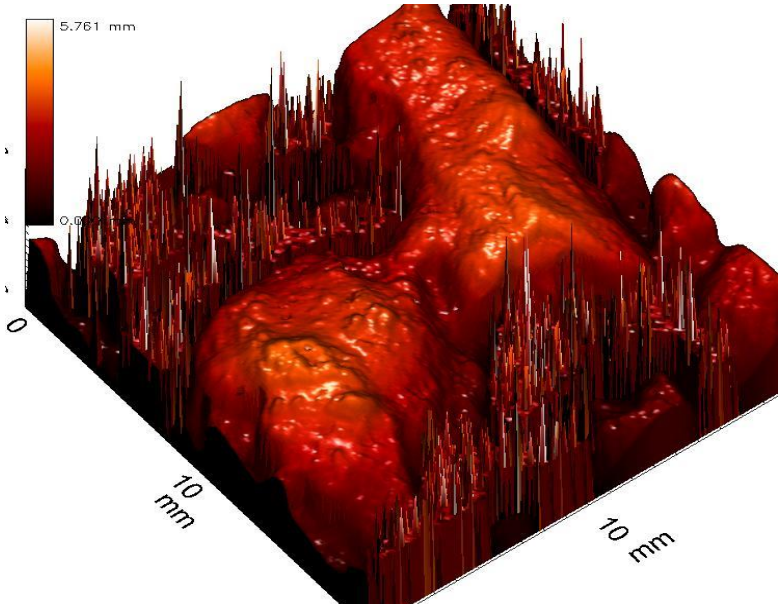


Abbildung 53: PK Z034A nach 30 000 ÜR

Am Ende des Poliervorgangs (siehe Abbildung 54) ist der Reibungsbeiwert 0,197. Die Oberflächentextur ist wesentlich poliert und sieht ganz anders aus.

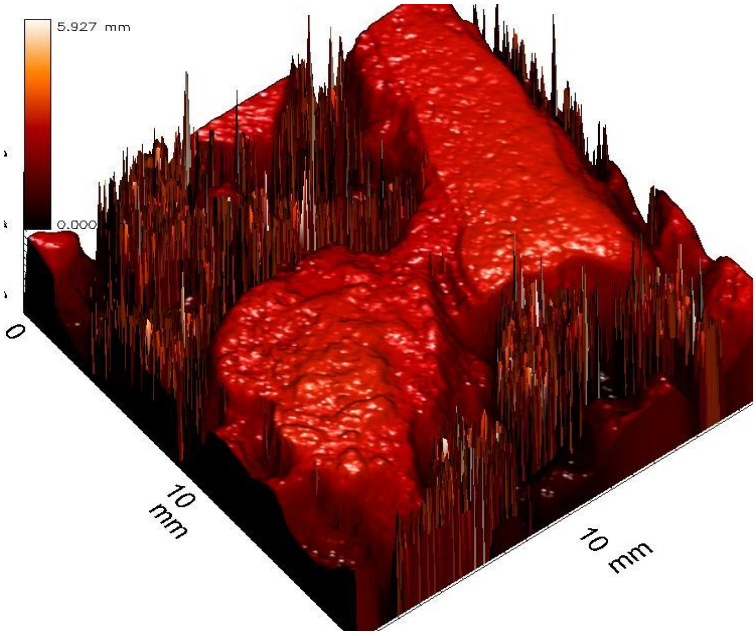


Abbildung 54: PK Z034A am Ende des Poliervorganges (540 000 ÜR)

Den Verlauf der Reibungsbeiwerte in diese drei Belastungsstufen ist auf Abbildung 55 graphisch dargestellt.

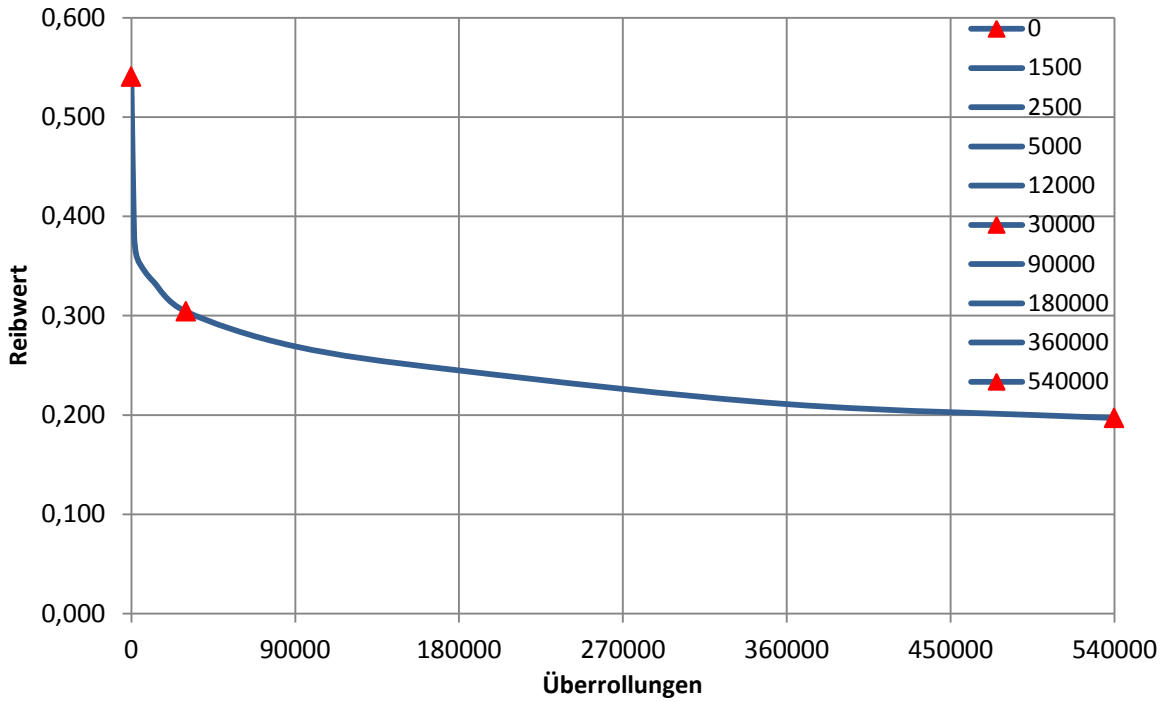


Abbildung 55: Poliervorgang des PK Z034A

Der Poliervorgang verläuft ähnlich bei dem Probekörper Z034B, der weniger Zeit mit Sand gestrahlt wurde. Deswegen ist die gleiche Analyse wie bei dem Probekörper Z034A gültig. Z034B charakterisiert sich mit Anfangsreibwert von 0,505. Auf die Abbildung 56 ist die nicht polierte Oberflächentextur aufgenommen.

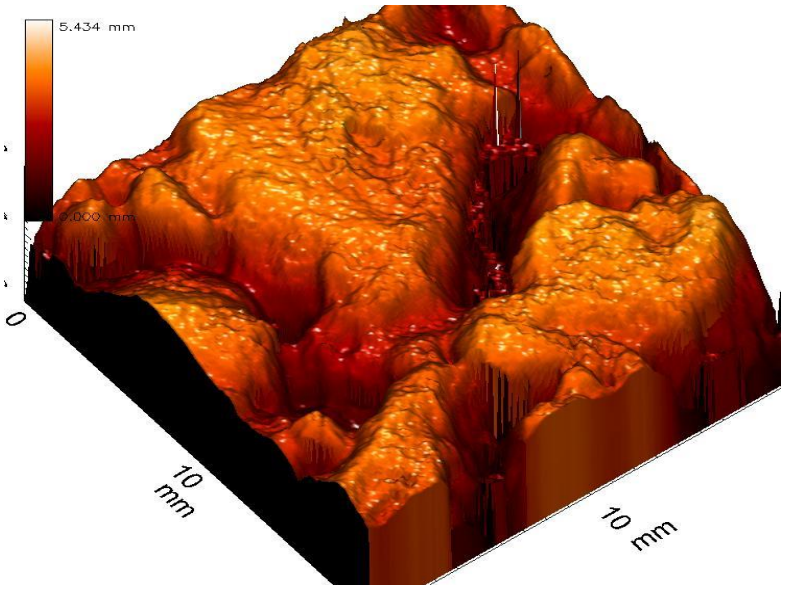


Abbildung 56: PK Z034B vor dem Poliervorgang (0 ÜR)

Nach 30 000 ÜR ist der Reibungsbeiwert geringer- 0,303. Auf Abbildung 57 ist die Oberfläche poliert und dabei ist die Mikrotextur sichtbar.

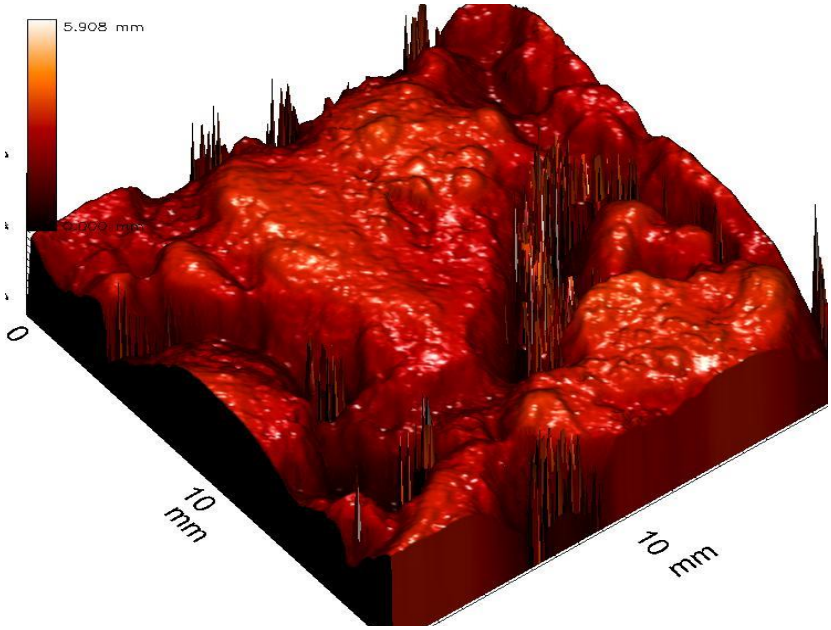


Abbildung 57: PK Z034B nach 30 000 ÜR

Nach 540 000ÜR beträgt der Reibungsbeiwert 0,176. Darüber spricht die Abbildung 58, wo die Oberflächentextur wesentlich poliert ist.

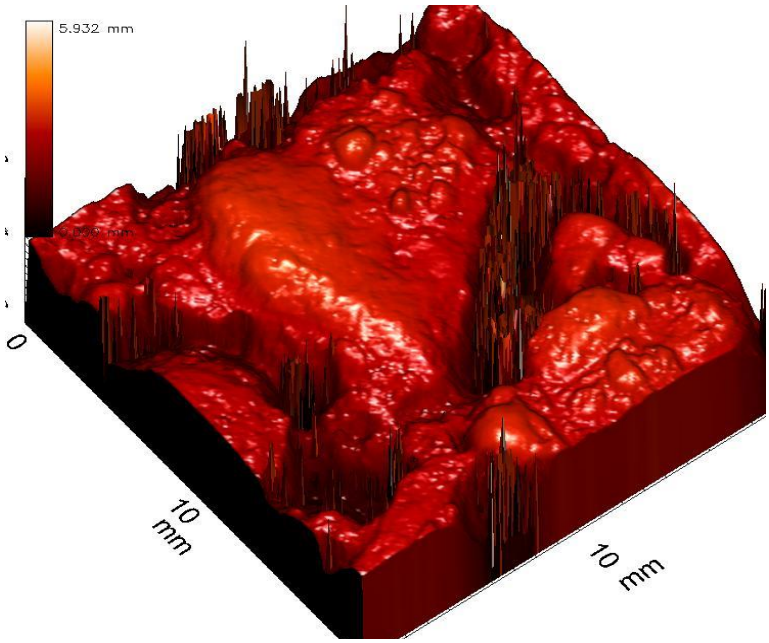


Abbildung 58: PK Z034B am Ende des Poliervorganges (540 000 ÜR)

Das Diagramm auf Abbildung 59 stellt graphisch den Poliervorgang des Probekörpers Z034B.

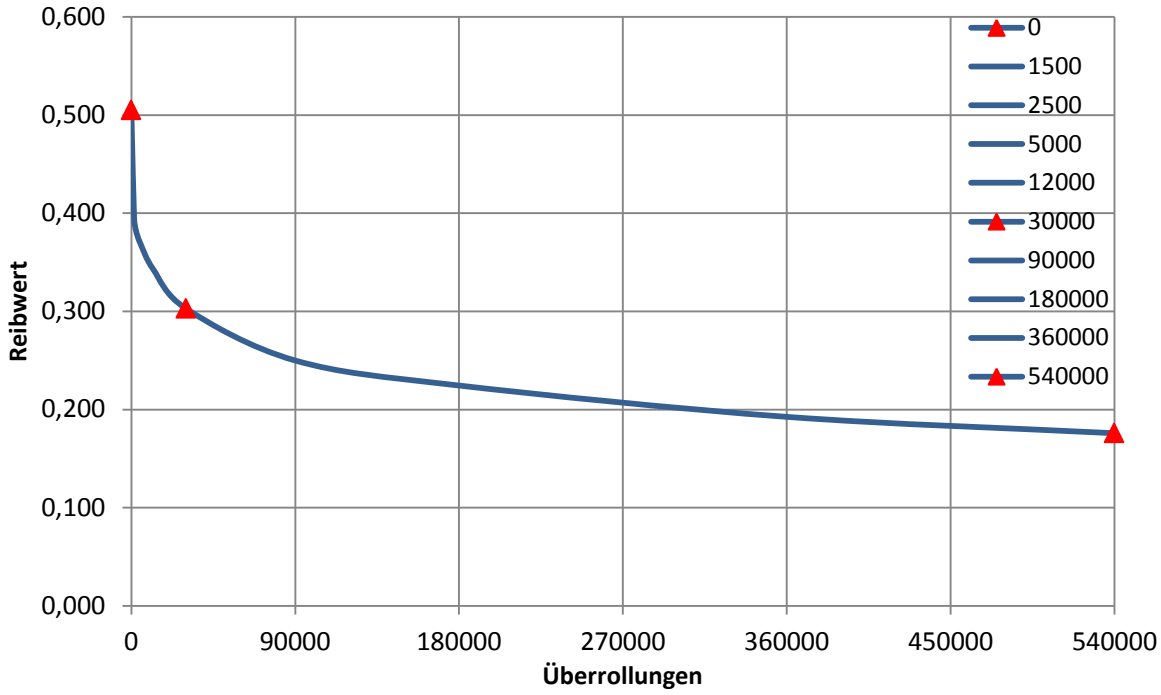


Abbildung 59: Poliervorgang des PK Z034B

Die geringe Polierwirkung des Wassers wird noch aus der Oberflächenerfassung ersichtlich. Ein Unterschied zwischen nächsten Abbildungen (Abbildung 60, Abbildung 61, Abbildung 62) des PK Z049A ist schwer zu entdecken. In erfassten Phasen (0 ÜR, 30 000 ÜR, 540 000 ÜR) ist die Oberfläche nur wenig poliert und die Reibungsbeiwerten sind fast gleich.

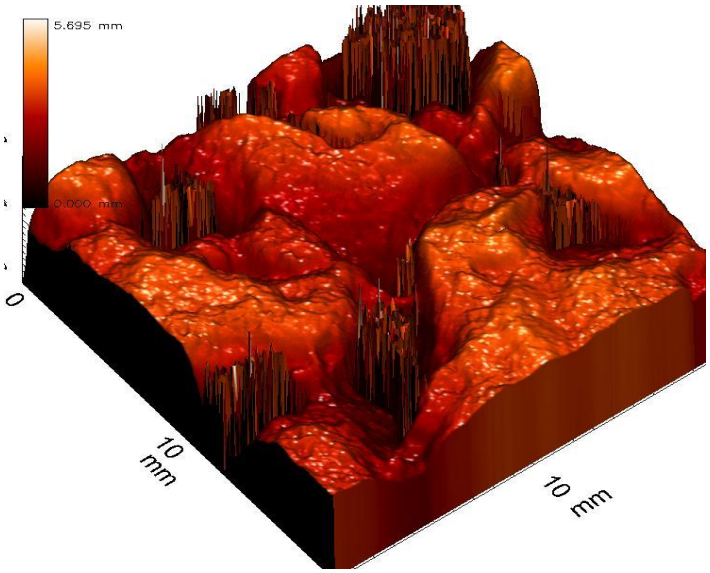


Abbildung 60: PK Z049A vor dem Poliervorgang (0 ÜR)

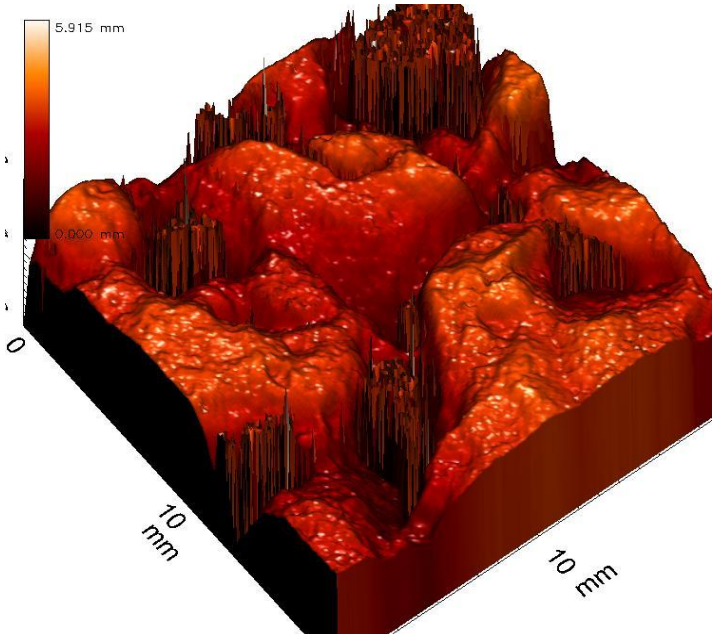


Abbildung 61: PK Z049A nach 30 000 ÜR

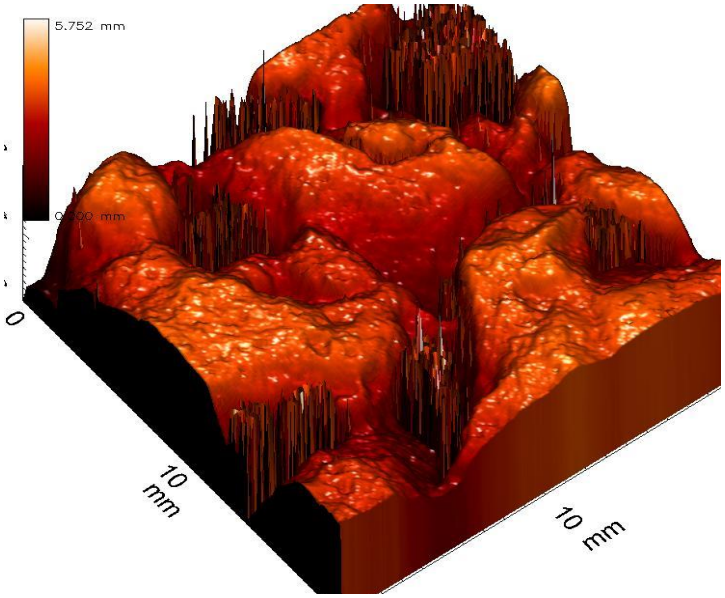


Abbildung 62: PK Z049A am Ende des Poliervorganges (540 000 ÜR)

Der Poliervorgang bei diesem Probekörper charakterisiert sich mit ungefähr gleichen Reibungsbeiwerten und verläuft in fast gerade Linie (siehe Abbildung 63). Am Anfang (0 ÜR) ist der Reibwert 0,485, nach 30 000 ÜR- 0,498 und am Ende (540 000 ÜR) beträgt 0,416.

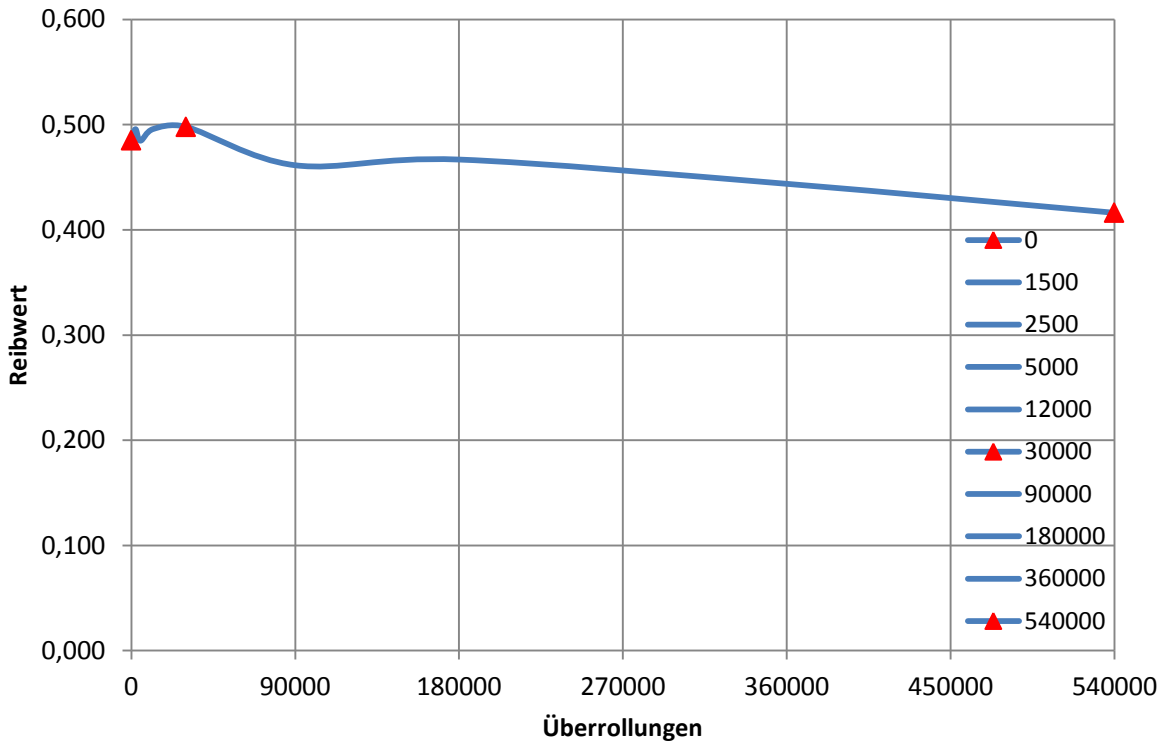


Abbildung 63: Poliervorgang des PK Z049A

5 Zusammenfassung

5.1 Ausgangsituation und Zielsetzung

Die Straßengriffigkeit beeinflusst wesentlich die Verkehrssicherheit. Deswegen ist deren Prognose eine wesentliche Frage im heutigen und zukünftigen Straßenbau.

Das Erreichen einer Anfangsgriffigkeit (Zeitpunkt der Abnahme) von frisch verlegten Belägen während dem Prozesse des Einbaus und Verdichtung stellt oft kein großes Problem dar. Wesentliche Unsicherheiten entstehen hinsichtlich des erreichbaren Griffigkeitswertes nach der Verjährungsfrist (Mängelansprüche) zur Gewährleistung. Der in der Kontaktfläche Fahrzeugreifen- Fahrbahnoberfläche aktivierbare Reibungswert ist von vielen Faktoren wie Textur, Gestaltung der Reifen, Geschwindigkeit, Zwischenmedium beeinflusst. Da die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Faktoren sehr komplex sind, kann deren Einfluss auf die Griffigkeit je nach Situation unterschiedlich ausgeprägt sind.

Gegenwärtig ist eine Griffigkeitsprognose eines konzipierten Asphaltmischgutes im Rahmen der Erstprüfung nicht möglich. Eine realistisch nähe Bewertung der Griffigkeit kann aber in Laborbedingungen erreicht werden.

Im Rahmen der gegenständlichen Forschungsarbeit ist der Fokus auf die Prüfanlage nach Wehner/ Schulze gelegt. Damit wird ein Griffigkeitsprognoseverfahren entwickelt.

Ziel dieser Diplomarbeit ist eine Auswertung der relevanten Literatur zur Griffigkeitsuntersuchung und –entwicklung in Laborverfahren. Dafür aufbauend werden in einer experimentellen Parameterstudie die wesentlichen Einflussfaktoren auf Polier- und Griffigkeitsprüfung nach Wehner/ Schulze analysiert. Dabei wird der Polierwiderstand von Splittmastixasphalt ermittelt.

5.2 Versuchsprogramm und Ergebnisse

Für die Ziele dieser Untersuchung wurden die Griffigkeitseigenschaften von dem Asphaltmischgut SMA 11 PmB 45/80-65, S3, GS ermittelt. 26 PK von diesem Asphaltmischgut wurden in Laborbedingungen hergestellt und geprüft. Das ganze Versuchsprogramm wurde in drei Haupteile mit Variation von unterschiedlichen Einflussparametern geteilt:

- Lage der Probekörper (PK) in der Platte
- Sandstrahldauer
- Poliermittel

Jede Probe wird zuerst mit Sand gestrahlt, um den Bitumenfilm aus der Oberfläche zu entfernen. Dann wird die Probe mit dem Polierverfahren nach Wehner/Schulze einer Polierbeanspruchung von 0 bis 540 000 Überrollungen (ÜR) unterzogen. Die Polierwirkung wird zusätzlich mit einem Wasser/Quarzmehl- Mischgut verstärkt. Nach der Polierbeanspruchung wird die Reibungsbeiwert bestimmt. Für eine Griffigkeitsbeurteilung werden am Ende die Ergebnisse von alle geprüften Gruppen von Probekörper analysiert und ausgewertet.

In Phase 1 werden 14 PK mit Untersuchung Einfluss Probekörpergewinnung aus der Platte geprüft. Dabei werden 10 Platten im Labor mittels Walzsegmentverdichter hergestellt. Der Hohlraumgehalt ist in verschiedenen Positionen in den Platten inkostant. Deswegen müssen die zu untersuchenden PK aus diversen Lagen dieser Platten ausgebohrt sein:

- 6 Platten mit 1 PK aus der Mitte
- 4 Platten mit 2 PK aus dem Rand

Um zu analysieren ob die Lage der Probekörper in der Platte einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis hat, wird die Untersuchung mittels dem statistischen Verfahrens „T-Test“ ausgewertet. Als signifikant unterschiedlich sind die Mittelwerte der beiden Gruppen zwischen 90000 und 540000 Überrollungen bestimmt. Allgemein kann geschlossen werden, dass die Probekörpergewinnung aus der Platte keinen stark signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Da die Ergebnisse von den beiden Gruppen (PK Rand und PK Mitte) ähnlich sind, werden die weitere Probekörpers nur aus zwei Ränder einer Platte ausgebohrt.

Die Dauer des Sandstrahlens für PK aus Phase 1 ist 110 sec (Programm 4 der Strahlkabine). In Phase 2 sind noch 8 PK zur Ermittlung Einfluss der Strahldauer auf die Griffigkeit vorgesehen:

- 4 PK mit Strahldauer 167 sec (Programm 3)
- 4 PK mit Strahldauer 85 sec (Programm 5)

Die Probekörper, die 110 sec mit Sand gestrahlt wurden, charakterisieren sich mit den niedrigsten Reibungsbeiwerten. Die Ergebnisse von den anderen zwei Gruppen (Programm 3, Programm 5) sind sehr ähnlich und weisen etwa höhere Reibungsbeiwerte auf, als diese, die weniger Zeit mit Sand gestrahlt sind. Zu einer Signifikanzanalyse der Strahldauer werden die von der drei PK- Gruppen erhaltenen Ergebnisse auch mittels t- Test miteinander verglichen.

Zur Analyse Einfluss der Poliermittel wird das Quarzmehlgehalt in Phase 3 variiert. Es werden die Reibungsbeiwerte von 4 PK ermittelt, die nur mit Wasser poliert sind.

Auf Grund der erhaltenen Ergebnisse kann schlussgefolgert sein, dass die Polierwirkung des Wassers gering ist. Das Griffigkeitsniveau sinkt erheblich, wenn im Poliermischgut Quarzmehl vorhanden ist.

5.3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bei der Griffigkeitsprüfung wurde die Polierresistenz von dem Asphaltmischgut SMA 11 PmB 45/80-65, S3, GS bei Variation von verschiedenen Einflussparametern untersucht und beurteilt. Die erhaltenen PWS-Werte charakterisieren sich mit einer guten Wiederholbarkeit.

Die Ergebnisse der Asphaltpolierprüfung zeigen, dass das gewählte Versuchsprogramm eine 70%- ige Abnahme des Polierwertes nach Sandstrahlen und nach insgesamt 540 000 ÜR ergibt. Der Verlauf der Reibungsbeiwerte charakterisiert sich mit einer plötzlichen Senkung im Bereich von 0 bis 30 000 ÜR. In diesem Intervall verringert sich das Griffigkeitsniveau mit 60 %. Danach verlaufen die Reibungsbeiwerte gleichmäßiger.

Bei der Beurteilung des Sandstrahlenflusses kann man auf Basis der erhaltenen Reibwerte zusammenfassen, dass die Unterschiede zwischen der Dauer der dreien Belastungsstufen (Programm 3, Programm 4, Programm 5) nicht stark ausgeprägt sind.

Von den variierten Einflussparametern hat das Quarzmehl als Poliermittel die wesentlichste Bedeutung. Das Poliermischgut weist eine erhebliche Polierwirkung auf, nur wenn dabei Quarzmehl vorhanden ist. Das Wasser von sich selbst bewirkt die Griffigkeit im geringen Grad und die Reibwerte bleiben annährend konstant. Im Unterschied dazu ist die Endgriffigkeit wegen der Quarzmehlwirkung mit 60% niedriger. Für die Ziele dieser Forschung würde eine detaillierte Untersuchung der Polierwirkung des Quarzmehls durch Variation der Quarzmehlmenge in dem Poliermischgut und eine entsprechende Auswertung der Ergebnisse aufbauend.

Im Rahmen dieser Arbeit betrachtende Einflussfaktoren sind für eine exakte Griffigkeitsprognose noch nicht ausreichend. Um eine zuverlässige Vorhersage zu gewährleisten, muss eine größere Vielfalt von Einflussparametern untersucht werden. Notwendig wäre auch ein Vergleich zwischen Feldproben und Laborproben.

LITERATURVERZEICHNIS

1] Forschungsgeselschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), „Merkblatt zur Bewertung der Sraßengriffigkeit bei Nässe,“ in *Technische Prüfverfahren für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau*, Köln, 2012.

2] L. Kirchmaier, *Einfluss feiner Gesteinkörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten im Straßenbau-Dissertation.*

3] Wikipedia. [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Griffigkeit.

4] A. Pfeiler, *Erhöhung der Griffigkeit von Asphaltstrassen –Der Einfluss der Polierresistenz feiner Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltdeckschichten,* 2004.

5] W. Kluger-Eigl, *Entwicklung eines Bewertungshintergrundes für das Griffigkeitsmesssystem Griptester in Österreich- Dissertation,* Wien, 2009.

6] „ADAC.de,“ ADAC, [Online]. Available: http://www.adac.de/.

7] „Fahrzeug und Fahrbahn,“ Weimar, 2004.

8] Forschungsgeselschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze,“ in *Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau TP-Gestein-StB*, Köln, 2008.

9] Fries Research and Technology GmbH, Bedienungsanleitung FRT MicroProf.

10] „bam-net.de,“ Bayerische Asphalt-mischwerke GmbH & Co, [Online]. Available: http://www.bam-net.de/asphalt/produkte/splittmastixasphalt.html.

11] Technische Universität- Wien- Labor des Forschungsbereich für Strasenwesen, Herstellung der Asphaltprobeplatten mit dem Gegenlaufzwangsmischer GZM-30+ und dem Walzsegmenverdichter WSV-50-S2.

12] Technische Universität- Wien- Labor des Forschungsbereich für Strasenwesen, Sandstrahlen von Asphalt- und Betonprobekörper für das Prüfverfahren nach Wehner/Schulze, 2007.

13] B.Rasch, M.Friese, W.Hofmann und E.Naumann, Quantitative Methoden-Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler, Berlin: Springer, 2010.

14] M. Kühlmeyer, Statische Auswertungsmethoden für Ingenieure, Springer .

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Definition des Reibungsbeiwertes (Pfeiler, 2004) 9
Abbildung 2: Reibungsbeiwert- Schlupf- Kurve [Donchev, 2007] 10
Abbildung 3: Darstellung eines Oberflächenprofils [Pestalozzi et al, 2003] 11
Abbildung 4: Übersicht über die Rauhigkeitsbezeichnungen im Straßenwesen [Kirchmaier 2011] 12
Abbildung 5: Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes von der Struktur der Oberfläche [Kirchmaier 2011] 13
Abbildung 6: Einflussfaktoren auf die Griffigkeit [Kluger-Eigl, 2009] 14
Abbildung 7: Aquaplaning [ADAC] 16
Abbildung 8: Arten von Profilgestaltungen des Fahrzeugreifen [Nikolov und Todorov, 2011] 17
Abbildung 9: Zusammenhang zwischen den Reibungsbeiwert und den Innendruck des Reifens [Nikolov und Todorov, 2011] 17
Abbildung 10: Auf das Fahrzeug während der Fahrt einwirkende Kräfte [FGSV Tagung-Weimar] 19
Abbildung 11: Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes vom Schlupf bei unterschiedlichen Zwischenmedien [Kluger-Eigl, 2009] 20
Abbildung 12: Poliersimulationsmaschine (links) und Detail des Polierkopfs (rechts) [Fotos: DAMES, 1990] 22
Abbildung 13: Reibwertbestimmungsmaschine (links) und externe Geschwindigkeits-Reibwertaufzeichnung (rechts) [DAMES, 1990] 22
Abbildung 14: Prüfanlage nach Wehner/ Schulze- Version 1 der Fa. Maschinen- und Gerätebau Josef Freundl [RAUSCHENBACH und BOREK, 2010] 23
Abbildung 15: Prüfgerät Wehner/ Schulze 24
Abbildung 16: Mobile Wehner/Schulze Anlage [Kirchmaier 2011] 25
Abbildung 17: Poliervorgang 25
Abbildung 18: Polierrollen für Simulation der Verkehrsbeanspruchung [Donchev, 2007] 26
Abbildung 19: Spülen 27
Abbildung 20: Griffigkeitsmesseinheit des PWS [FGSV, 2004] 28
Abbildung 21: Detailansicht eines Prüfgummis [Kirchmaier 2011] 29
Abbildung 22: Positionierung der Prüfgummis auf der Probeoberfläche [Kirchmaier und Blab, 2010b] 29
Abbildung 23: Drahtornamentglasplatte 521-7mm, 3D-Ausschnitt und mittleres Oberflächenprofil [Kirchmaier, 2011] 29
Abbildung 24: Schematische Darstellung des Walzsektor-Verdichtungsgerätes [Arbeitsanweisung Walzsegmentverdichter] 32
Abbildung 25: Hilfsmittel und Prüfgeräte 33

Abbildung 26: Hilfsmittel 33
Abbildung 27: Walzsegmentverdichter 34
Abbildung 28: Fertig hergestellte Platte [Donchev, 2007] 34
Abbildung 29: Ausbohren des Probekörpers 35
Abbildung 30: Kabine Außen 36
Abbildung 31: Kabine Innen 37
Abbildung 32: Aussieht einer Probe vor und nach dem Sandstrahl 38
Abbildung 33: Optisches Gerät FRT MicroProf 38
Abbildung 34: Prinzip des optischen Sensors 40
Abbildung 35: Fragestellung des t-Tests [Quantitative Methoden] 41
Abbildung 36: Stichprobenkennwertverteilung von Mittelwerten mit zwei zufällig entstandenen Stichprobenmittelwerten, sowie dem gemeinsamen Populationsmittelwert µ [Quantitative Methoden] 41
Abbildung 37: Konstruktion einer Stichprobenkennwertverteilung von Mittelwertdifferenzen unter der Nullhypothese [Quantitative Methoden] 42
Abbildung 38: Die Wahrscheinlichkeit eines t-Wertes in einer t-Verteilung [Quantitative Methoden] 43
Abbildung 39: Lage der Probekörper in der Platte 45
Abbildung 40: Reibwert- PK Rand 46
Abbildung 41: Reibwerte- PK Mitte 47
Abbildung 42: Einfluss Probekörpergewinnung aus der Platte- Mittelwert und Standardabweichung 48
Abbildung 43: Einfluss Probekörpergewinnung aus der Platte- Mittelwert und Standardabweichung (logaritmische Darstellung) 48
Abbildung 44: Reibungsbeiwerte μ_{pws}- PK mit Sandstrahldauer Programm 3 (167sec). 50
Abbildung 45: Reibungsbeiwerte μ_{pws}- PK mit Sandstrahldauer Programm 5 (85sec)... 51
Abbildung 46: Mittelwerte und Standardabweichungen- Einfluss der Sandstrahldauer 52
Abbildung 47: Mittelwerte und Standardabweichungen- Einfluss der Sandstrahldauer- logaritmische Darstellung 52
Abbildung 48: Reibungsbeiwerte μ_{pws}- Einfluss der Poliermittel 54
Abbildung 49: Einfluss der Poliermittel- Mittelwerte und Standardabweichungen 55
Abbildung 50: Einfluss der Poliermittel- Mittelwerte und Standardabweichungen- logaritmische Darstellung 55
Abbildung 51: Topographieerfassung der Oberfläche mittels optischen Geräts 56
Abbildung 52: PK Z034A vor dem Poliervorgang (0 ÜR) 57
Abbildung 53: PK Z034A nach 30 000 ÜR 58
Abbildung 54: PK Z034A am Ende des Poliervorganges (540 000 ÜR) 58
Abbildung 55: Poliervorgang des PK Z034A 59
Abbildung 56: PK Z034B vor dem Poliervorgang (0 ÜR) 59

Abbildung 57: PK Z034B nach 30 000 ÜR 60
Abbildung 58: PK Z034B am Ende des Poliervorganges (540 000 ÜR) 60
Abbildung 59: Poliervorgang des PK Z034B 61
Abbildung 60: PK Z049A vor dem Poliervorgang (0 ÜR) 61
Abbildung 61: PK Z049A nach 30 000 ÜR 62
Abbildung 62: PK Z049A am Ende des Poliervorganges (540 000 ÜR) 62
Abbildung 63: Poliervorgang des PK Z049A 63

TABBELENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Eigenschaften des Bindemittels 30
Tabelle 2: Anforderung an die Gesteinsklasse 30
Tabelle 3: Erstprüfung 31
Tabelle 4: Stufenweise Ermittlung der Reibungsbeiwerte μ_{PWS} 44
Tabelle 5: Reibungsbeiwerte- PK Rand 46
Tabelle 6: Reibungsbeiwerte PK-Mitte 47
Tabelle 7: Statistische Auswertung- t-Test 49
Tabelle 8: Reibungsbeiwerte PK mit Strahldauer 167 sec (Programm 3) 50
Tabelle 9: Reibungsbeiwerte PK mit Strahldauer 85 sec (Programm 5) 51
Tabelle 10: Einfluss der Sandstrahldauer- statistische Analyse (t-Test) 53
Tabelle 11: Reibungsbeiwerte $\mu_{(1)}$-Poliermittel Wasser 53
Tabelle 12: Reibungsbeiwerte $\mu_{(2)}$-Poliermittel Wasser/Quarzmehl-Mischgut 54

ANHANG A

Ergebnisse mit Einfluss der Probekörpergewinnung aus der Platte

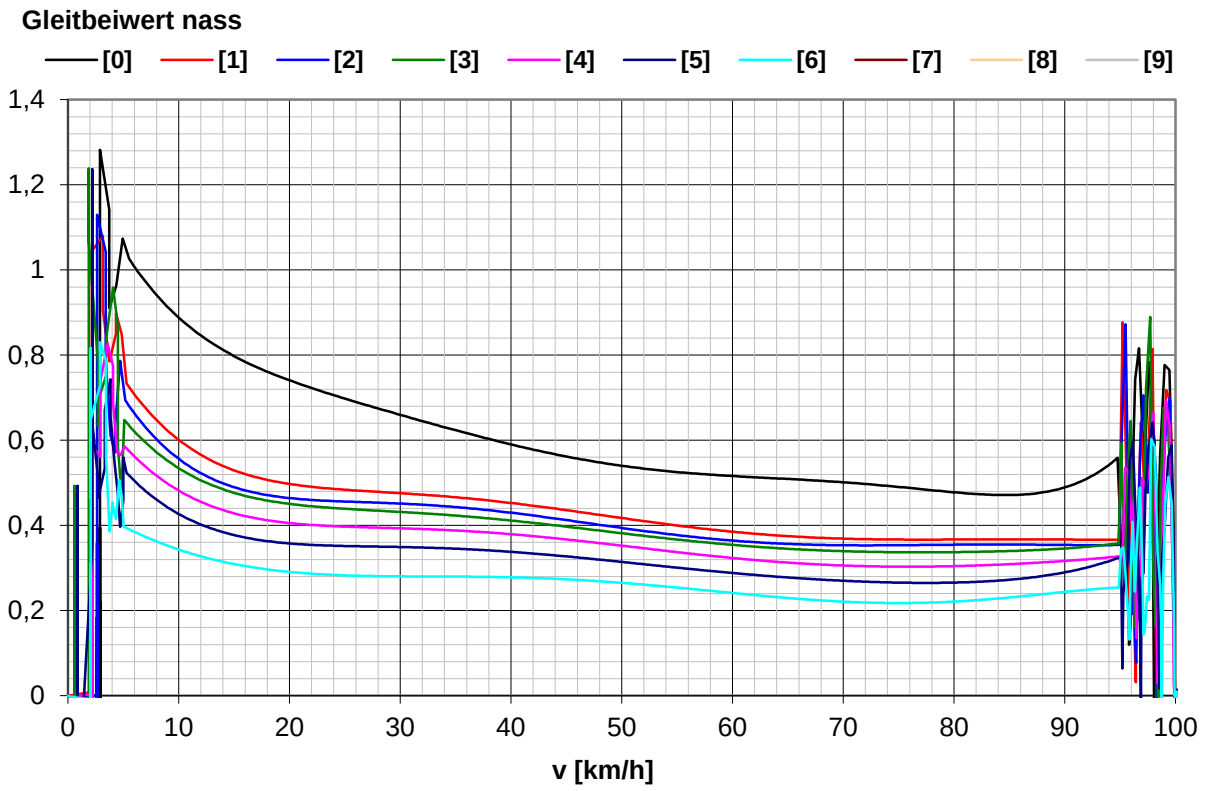


Abbildung A- 1: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 0-90 000 ÜR (PK Rand)

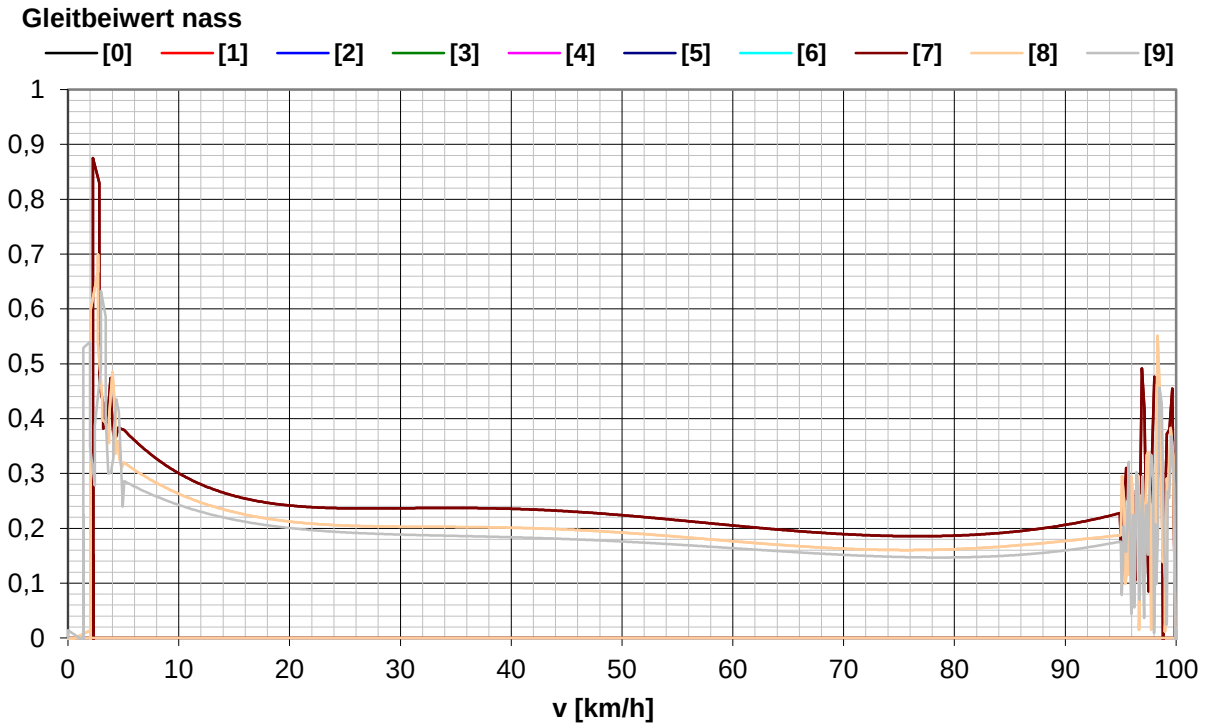


Abbildung A- 2: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 180 000-540 000 ÜR (PK Rand)

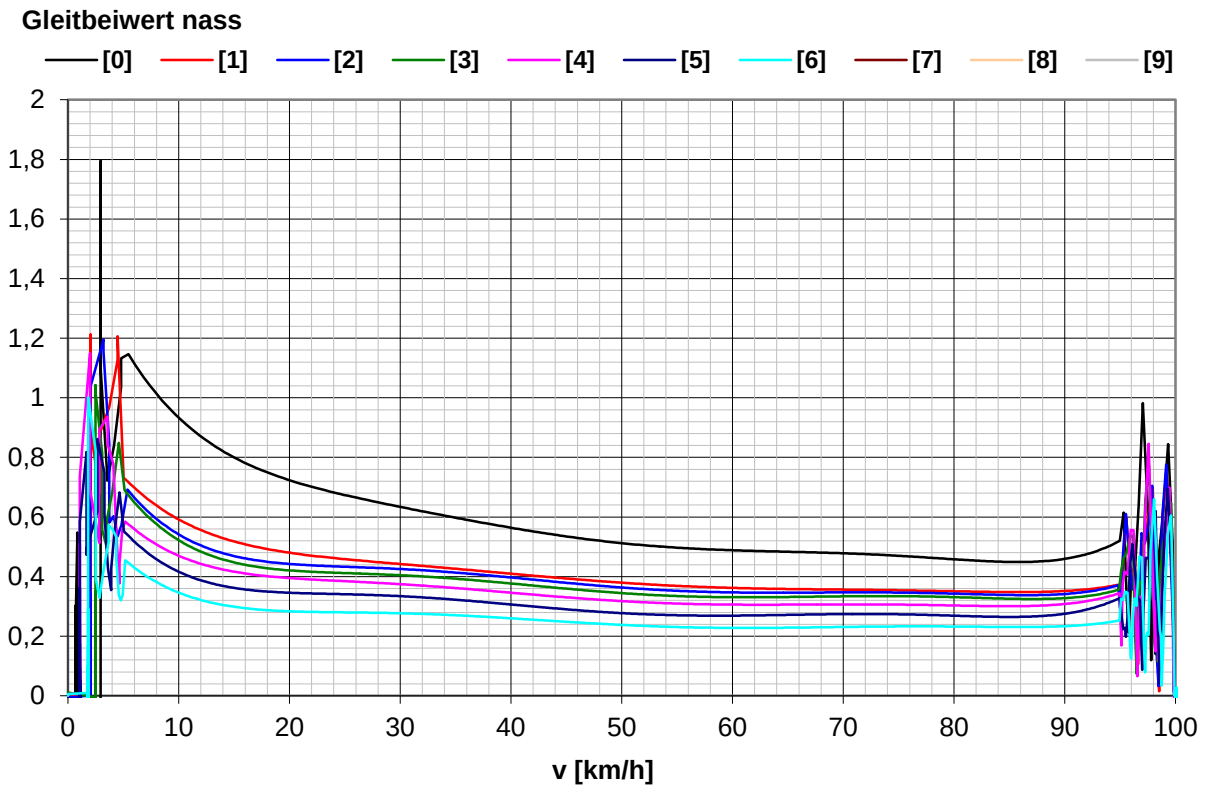


Abbildung A- 3: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 0-90 000 ÜR (PK Mitte)

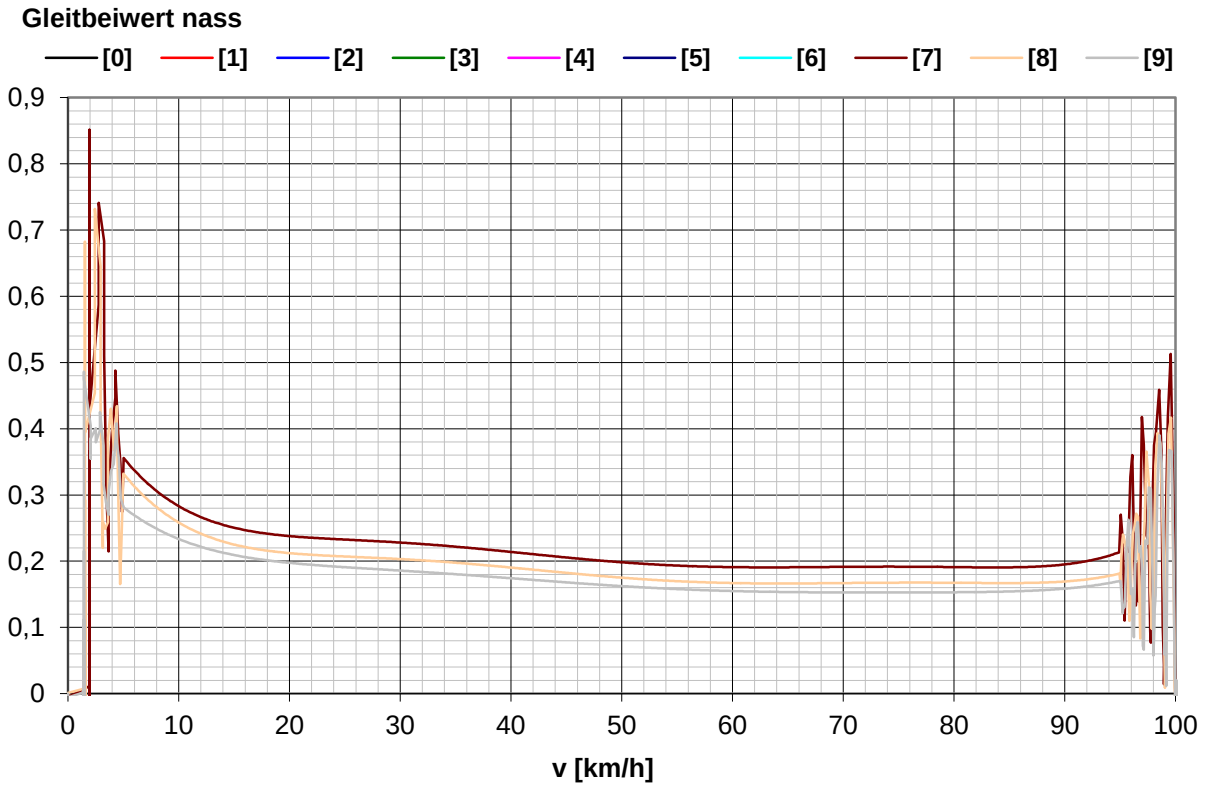


Abbildung A- 4: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 180 000-540 000 ÜR (PK Mitte)

ANHANG B

Ergebnisse mit Einfluss der Sandstrahldauer

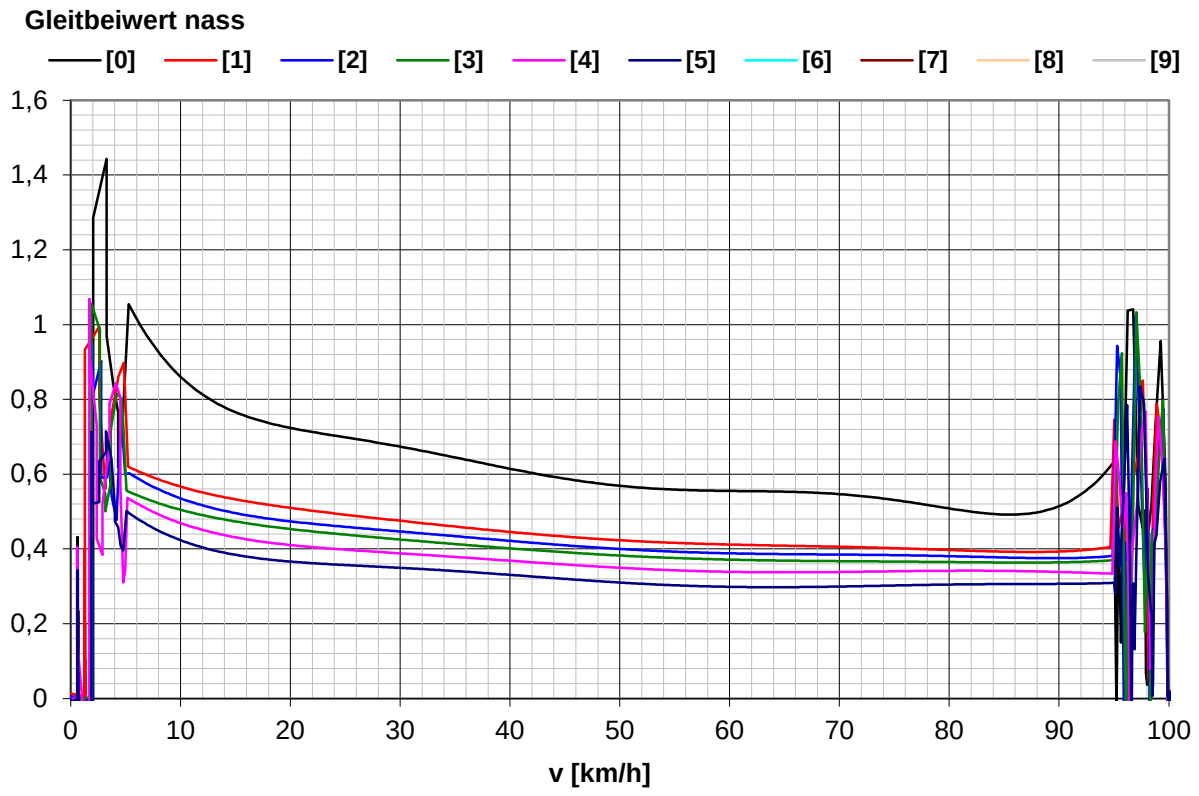


Abbildung B- 1: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 0-30 000 ÜR (PR 3)

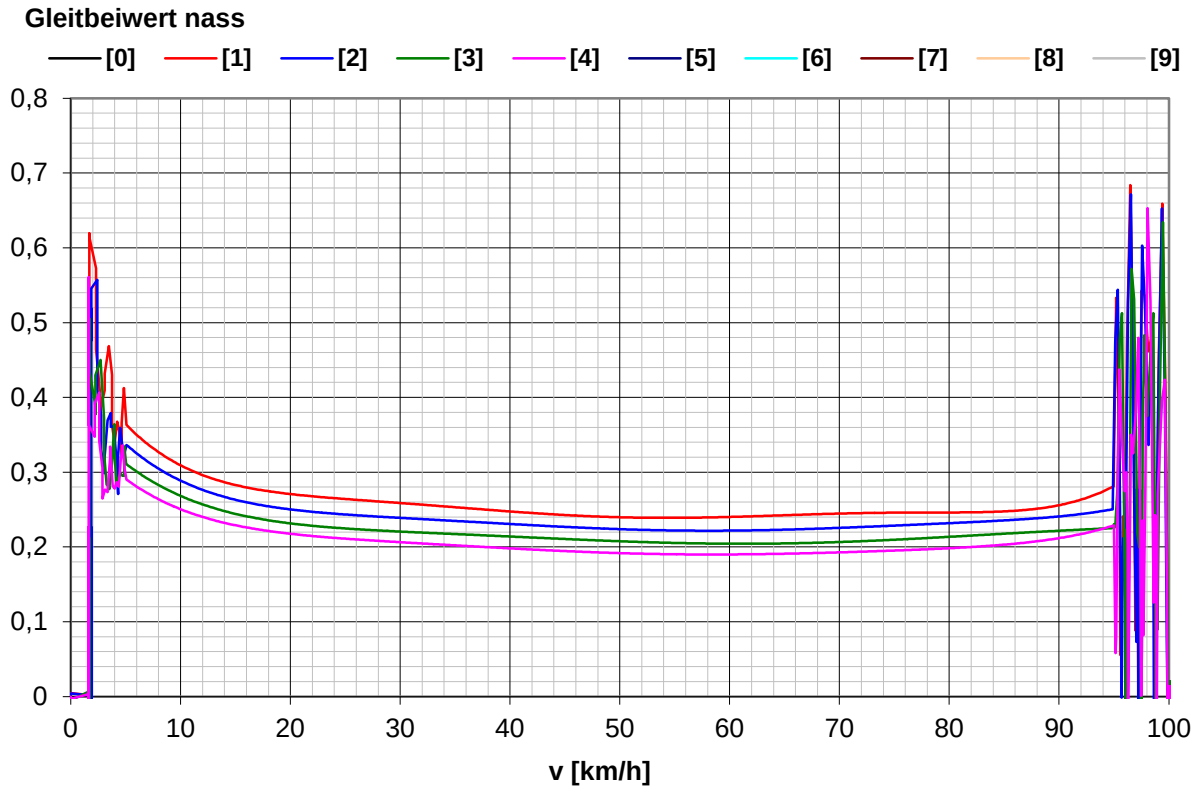


Abbildung B- 2: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 90 000-540 000 ÜR (PR 3)

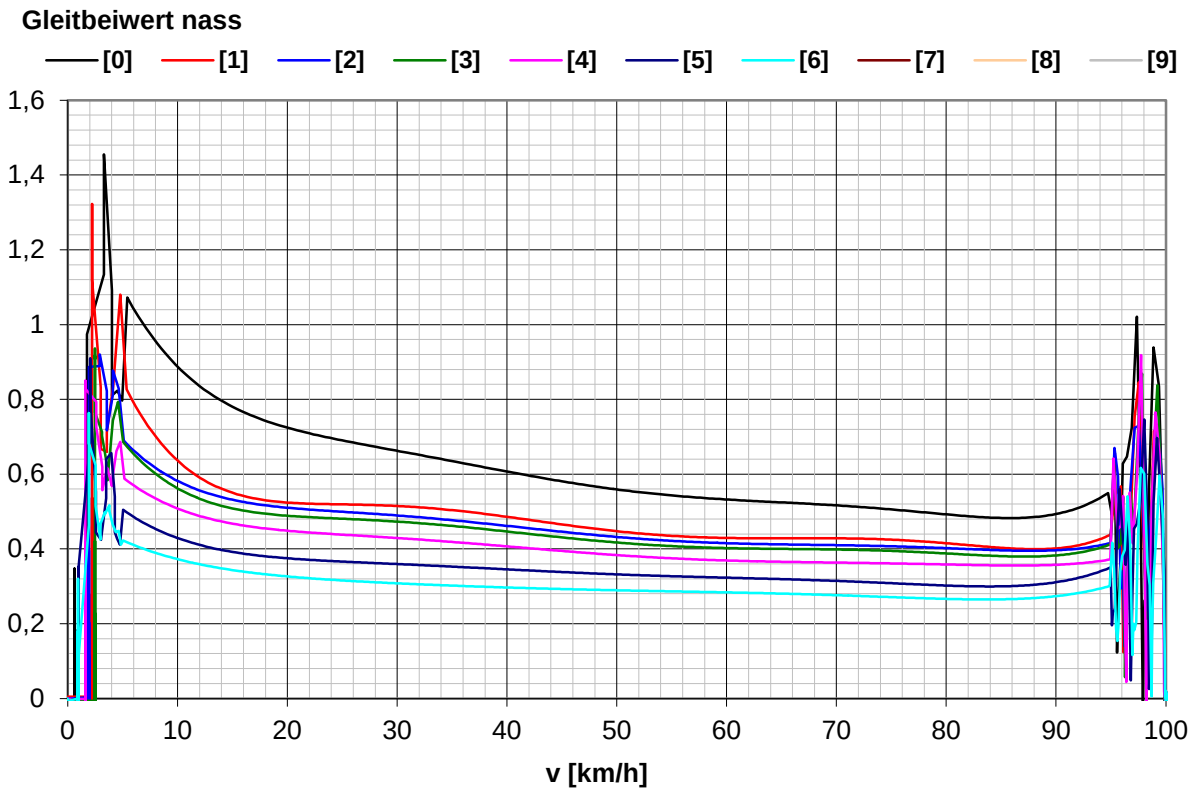


Abbildung B- 3: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 0-90 000 ÜR (PR 4)

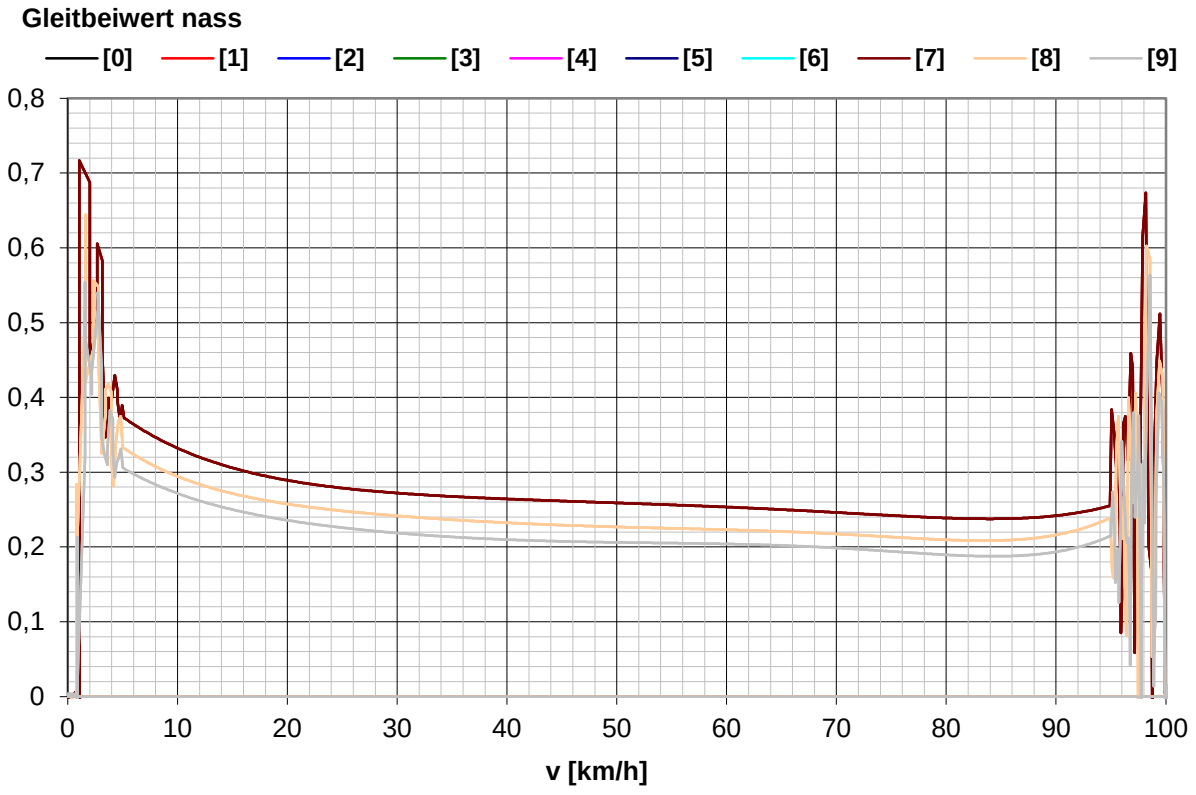


Abbildung B- 4: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 180 000-540 000 ÜR (PR 4)

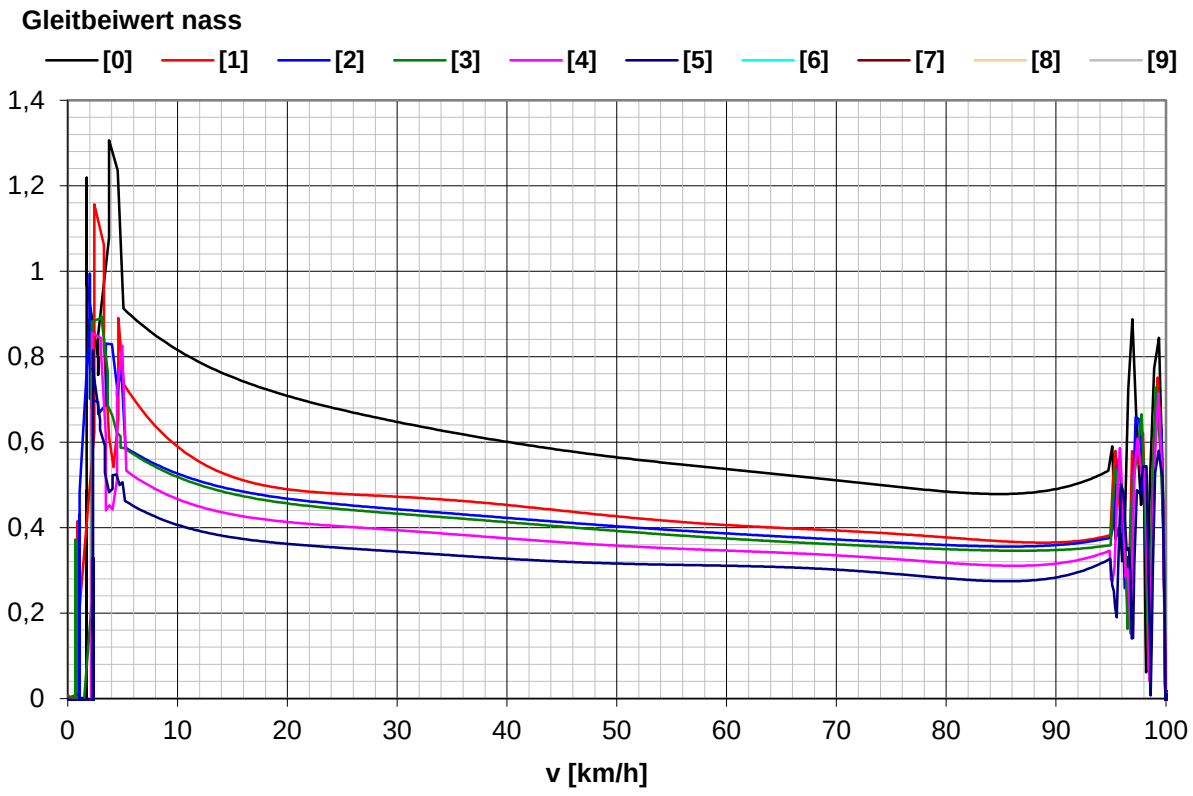


Abbildung B- 5: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 0-30 000 ÜR (PR 5)

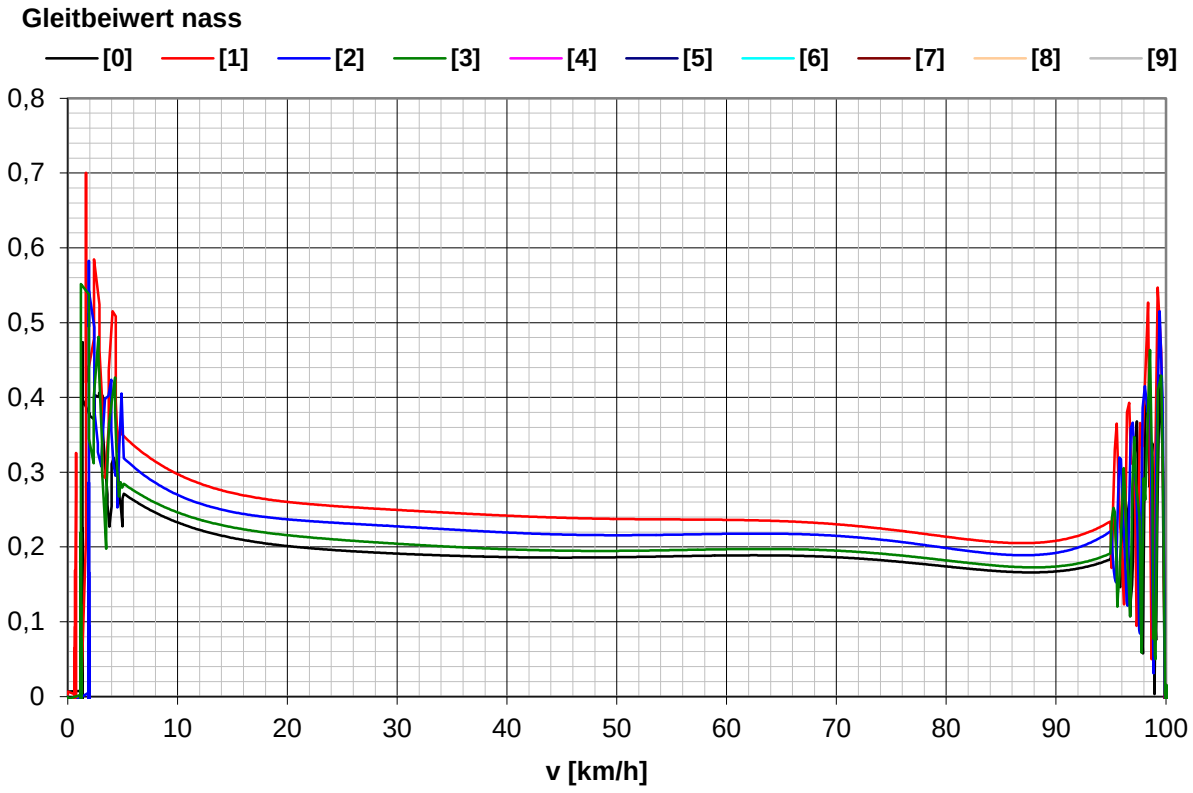


Abbildung B- 6: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 90 000-540 000 ÜR (PR 5)

ANHANG C

Ergebnisse mit Einfluss des Poliermittels

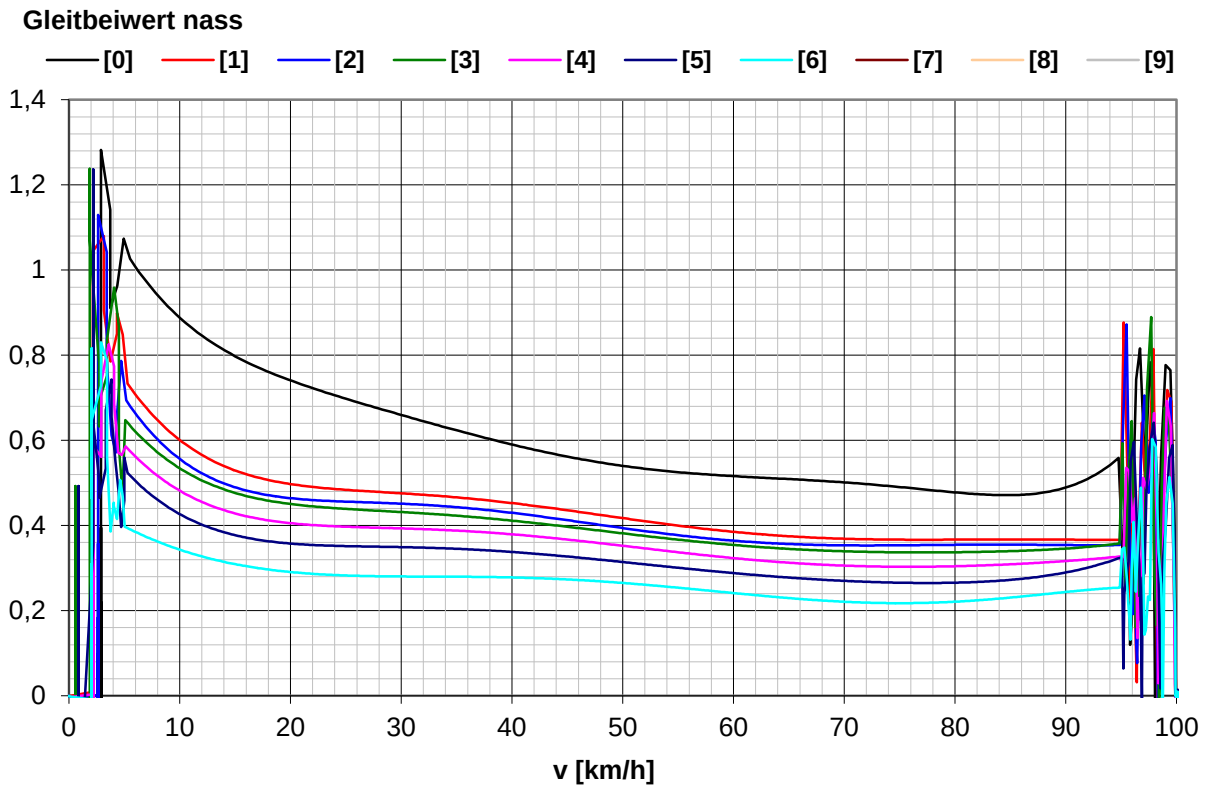


Abbildung C- 1: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 0-90 000 ÜR (Poliermittel-Wasser und Quarzmehl)

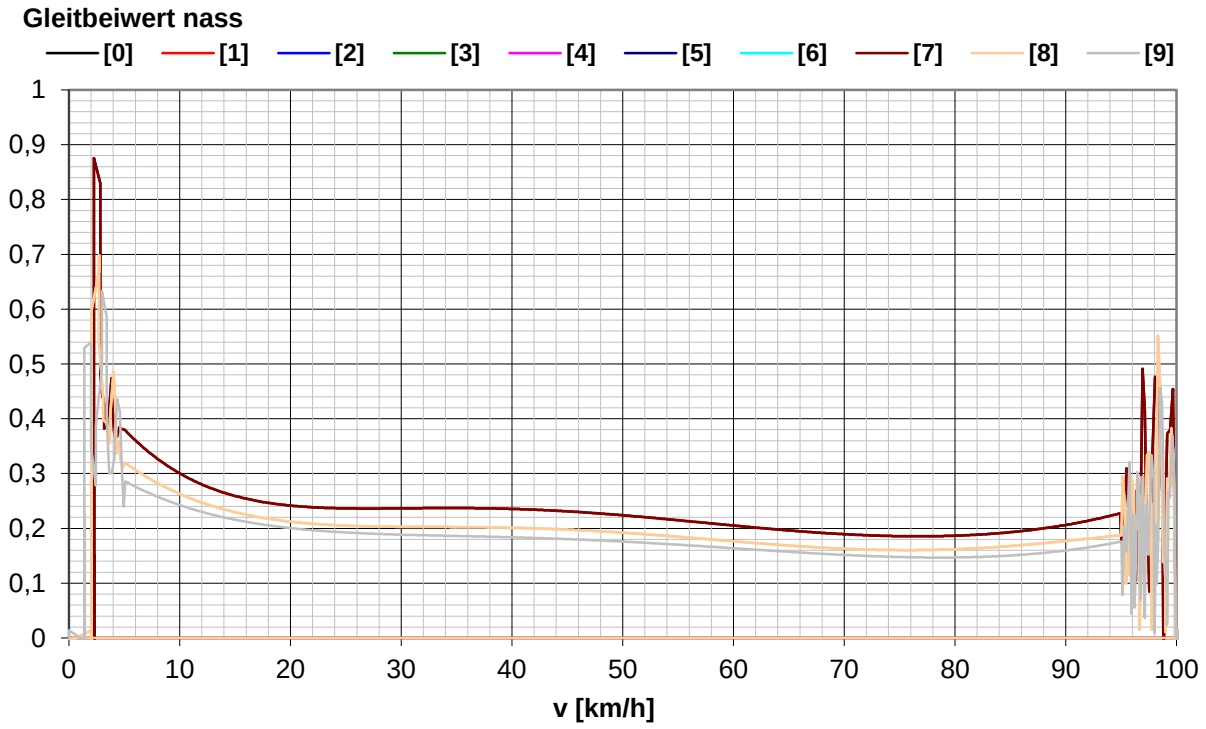


Abbildung C- 2: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 180 000-540 000 ÜR (Poliermittel-Wasser und Quarzmehl)

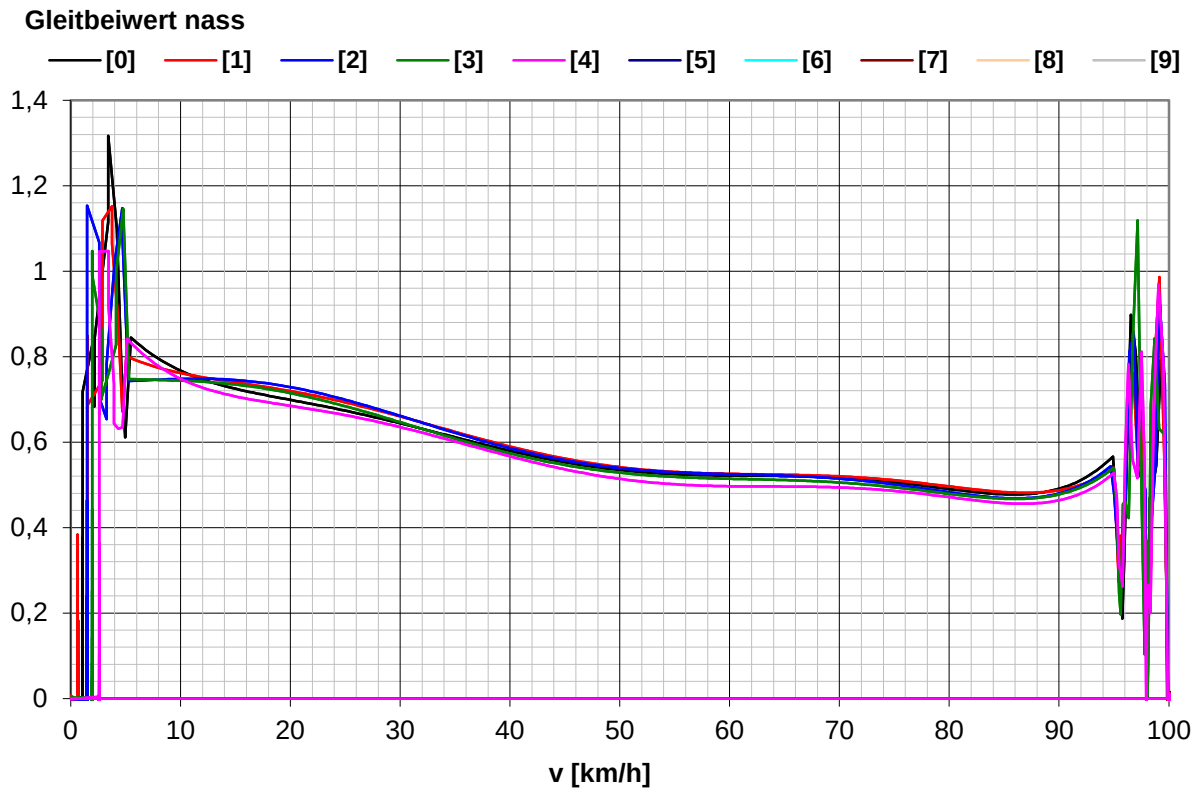


Abbildung C- 3: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 0-30 000 ÜR (Poliermittel-Wasser)

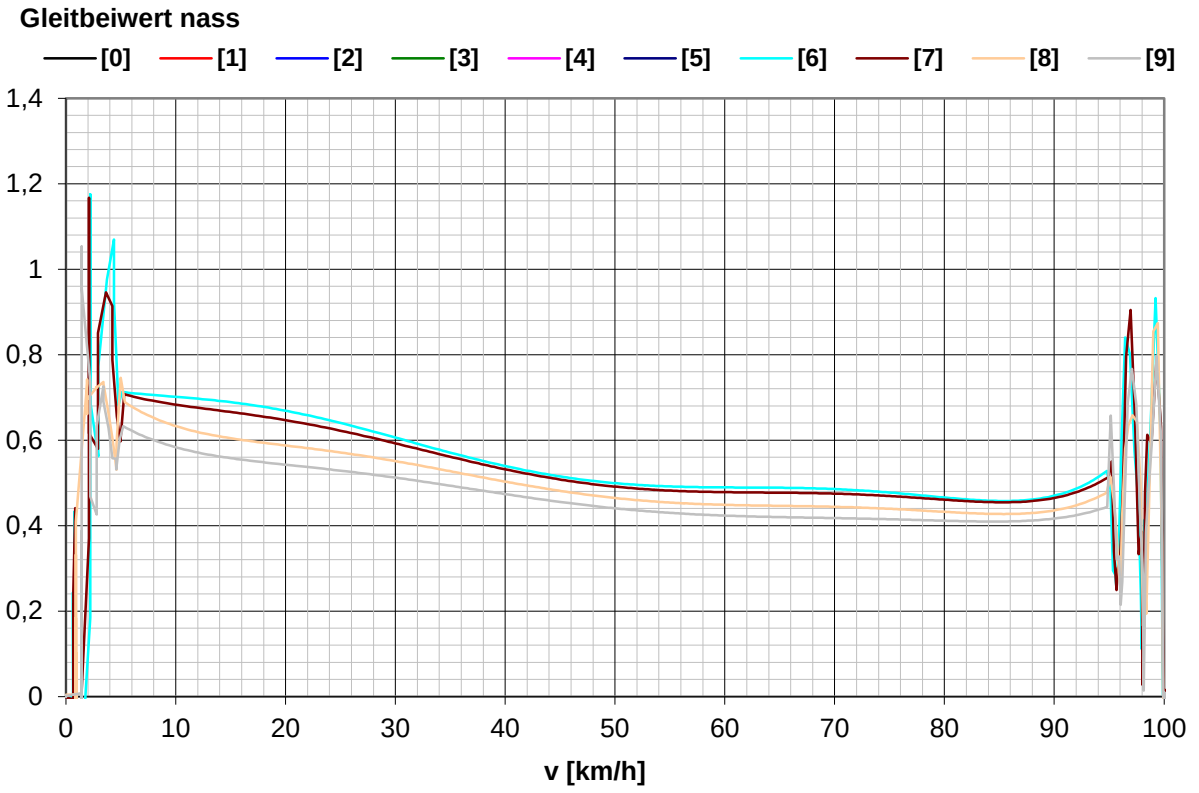


Abbildung C- 4: Gleitbeiwert/ Geschwindigkeit- 90 000-540 000 ÜR (Poliermittel-Wasser)