



**DIPLOMARBEIT**  
Master Thesis

**Herstellung von Waschbetonprobekörpern im  
Labor und deren Prüfung mit der Prüfanlage  
nach Wehner/Schulze**

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen  
Institut für Verkehrswissenschaften  
Fachbereich Straßenwesen

von

Danislav Stratiev

1129347

Aleko Konstantinov Str. 9

9450 Tervel

Wien, im April 2015

## **Kurzfassung**

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 eine Prüfanlage nach Wehner/ Schulze, die einerseits in der Lage ist, die Griffigkeit von Bohrkernen aus der Straße oder im Labor hergestellter Oberflächen zu prüfen und andererseits die Veränderung der Griffigkeit in Abhängigkeit von definierten Belastungszyklen (Polieren) zu simulieren. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung der Griffigkeit an Waschbetonoberflächen. Die Prüfungen erfolgen im Labor mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze. Als Proben dienen sowohl im Labor hergestellte Probekörper, als auch aus der Fahrbahn entnommene Bohrkerne. Im Labor hergestellte Probekörper werden mit einer Ausbürstvorrichtung ausgebürstet. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden verschiedene Arten des Ausbürsten von Waschbetonoberflächen verglichen. Mit der Prüfung der Griffigkeitsentwicklung an Fahrbahnoberflächen lassen sich im Laborversuch Erkenntnisse zu einem Wert für die Griffigkeit zum Ende der Gebrauchsdauer gewinnen. Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit tragen zur Entwicklung eines Laborverfahrens zur realitätsnahen Griffigkeitsprognose von Waschbetonoberflächen bei.

## **Abstract**

This master thesis is part of a comprehensive research project with the aim to develop a laboratory method for long-term prediction of the behavior of surfaces. The Institute of Transportation 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 friction of real and in the laboratory manufactured surfaces and on other hand to simulate the change in the friction depending on defined load cycles (polishing and roughening). This master thesis deals with the determination of the friction of washed concrete surfaces. The tests are performed with the test equipment Wehner/Schulze. Both laboratory prepared specimens, as well as specimens removed from the roadway are used as samples. Laboratory prepared specimens are then conditioned with special brushed equipment. In this master thesis are compared various types of brushing of surfaces. By examining the evolution of pavement friction on road surfaces can be in a laboratory test findings a value for the friction to the end of road life. The results of this master thesis contribute to the development of a laboratory method for realistic prediction of friction of washed concrete surfaces.

## **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. Georgi 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 Georgi Stratiev, meiner Mutter Ivelina Stratieva - für den unbedingten Beistand im Laufe meines Studiums.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Waschbetonprobekörpervorbereitung .....</b>	<b>10</b>
2.1	Erforderliche Prüfgeräte und Hilfsmittel .....	10
2.1.1	Zwangsmischer .....	10
2.1.2	Rütteltisch .....	10
2.1.3	Luftgehaltsprüfer.....	11
2.1.4	Diamant – Kernbohrmaschine.....	12
2.1.5	Andere Prüfgeräte und Hilfsmittel .....	13
2.1.5.1	Laborwaage .....	13
2.1.5.2	Schalungen .....	14
2.1.5.3	Glättkelle .....	14
2.1.5.4	Sprühgerät .....	14
2.1.5.5	Hilfsmittels:.....	15
2.2	Verwendete Materialien .....	16
2.2.1	Gestein.....	16
2.2.2	Zement .....	18
2.2.3	Anmachswasser .....	19
2.2.4	Zusatzmittel .....	20
2.2.5	Kombinationsmittel.....	20
2.3	Betonplattenherstellung .....	22
2.3.1	Rezeptur .....	22
2.3.2	Mischen des Betons .....	22
2.3.3	Bestimmung des Luftporengehaltes .....	23
2.3.4	Einschalung, Glättung und Besprühung des Probekörpers.....	24
2.3.5	Ausbürsten der Platten.....	25
2.3.5.1	Händisch .....	25
2.3.5.2	Mit Ausbürstvorrichtung .....	25
2.3.5.2.1	Aufbau und Funktionsweise .....	25
2.3.5.2.2	Einstellung des Anpressdruckes .....	26
2.3.6	Bohren des Probekörpers.....	26

2.3.7	Bestimmung der Rautiefe.....	27
<b>3</b>	<b>Topographiemessung .....</b>	<b>29</b>
3.1	Oberflächenparameter .....	29
3.2	Aufnahmen mit FRT Laser .....	31
3.2.1	Mechanischer Aufbau .....	31
3.2.2	Messprinzip .....	32
3.3	Aufnahmen mit MicroCAD Laser.....	33
3.3.1	Mechanischer Aufbau .....	33
3.3.2	Messprinzip .....	33
3.4	Statistische Methode für Auswertung der Messergebnisse- T-test .....	34
<b>4</b>	<b>Griffigkeitsprüfung mit der Prüfanlagen nach Wehner/Schulze .....</b>	<b>38</b>
4.1	Allgemeines .....	38
4.2	Beschreibung des Verfahrens .....	38
4.2.1	Verkehrsimulation .....	38
4.2.2	Griffigkeitsmessung.....	39
4.3	Auswertung .....	40
4.4	Bestandteile der Prüfanlage.....	42
4.4.1	Poliergerät:.....	42
4.4.2	Prüfgerät.....	44
4.5	Polierprüfung mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze .....	47
4.5.1	Kalibrieren .....	47
4.5.2	Probekplatte einbauen.....	48
4.5.3	Polieren .....	49
4.5.4	Spülen .....	49
4.5.5	Prüfen .....	50
4.5.6	Probe ausbauen.....	50
<b>5</b>	<b>Untersuchungen zur Griffigkeit von Waschbetonplatten .....</b>	<b>51</b>
5.1	Prüfprogramm.....	51
5.2	Prüfergebnisse und Auswertung.....	53
5.2.1	Sandfleckenversuch.....	53
5.2.2	Profilspitzenanzahl .....	54
5.2.3	Ergebnisse aus der Prüfanlage nach Wehner/Schulze .....	54
5.2.4	Topographiemessung.....	62
5.2.4.1	Bilderdarstellung .....	62

5.2.4.2	Oberflächenparameter.....	64
5.2.4.2.1	Primärparameter von FRT Laser.....	65
5.2.4.2.2	Rauheitsparameter.....	66
5.2.4.2.3	Welligkeitsparameter.....	67
5.2.4.2.4	Primärparameter von MicroCAD Laser.....	68
5.2.4.2.5	Auswertung der Oberflächenparameter.....	69
5.2.4.2.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	70
<b>I.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>71</b>
<b>II.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>72</b>
<b>III.</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>74</b>
<b>IV.</b>	<b>Anhang A.....</b>	<b>75</b>
<b>V.</b>	<b>Anhang B.....</b>	<b>76</b>

## Häufig verwendete Abkürzungen

PWS- Polierwert nach Wehner/ Schulze

$\mu_{pws}$  – Reibungsbeiwert

ÜR- Überrollung

PI- Platte

Bk- Bohrkerne

km/h- Kilometer pro Stunde

U/min- Umdrehungen pro Minute

N/mm<sup>2</sup>- Newton pro Quadratmillimeter

p- Wahrscheinlichkeit

$p_{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}$  - Wahrscheinlichkeit einer empirischen Mittelwertdifferenz

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

$x_n$ - Stichprobenmittelwert

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

$t_{df}$  – standartisiertes Differenz der Stichprobenmittelwerte

$\mu_n$  – theoretische Mittelwert

## 1 Einleitung

Der Waschbeton ist eine Art von Beton, bei dem die Gesteinskörnung durch eine spezielle Oberflächenbehandlung freigelegt wird. Bei der Herstellung von Waschbeton wird auf den geglätteten Beton ein dünner Film eines Verzögerers aufgesprüht, der das Erstarren der oberen Zementleimschicht für eine begrenzte Zeit verzögert. Nach einem bestimmten Ausbürstzeitpunkt wird die verzögerte Zementleimschicht gleichmäßig ausgebürstet und das Grobkorn freigelegt. Der Waschbeton charakterisiert sich mit einer hohen Griffigkeit über die ganze Nutzungsdauer.

Die Entwicklung eines Laborverfahrens, das eine zuverlässige Prognose des Griffigkeitsverhaltens darstellt, ist das Ziel eines großen Forschungsprojekts. Die ausreichende Griffigkeit im Laufe der Benutzungsdauer ist sehr wichtig. Das dient zur Erstellung einer sicheren Straßeninfrastruktur für die Verkehrsteilnehmer. Die Straßengriffigkeit hat unmittelbare Auswirkung auf die Verkehrssicherheit bei einer nassen oder trockenen Oberfläche. Unter der Griffigkeit einer Straßenoberfläche versteht man deren Eigenschaft bei Trocken- als auch Nasszustand im Kontakt mit einem Fahrzeugreifen Reibungskräfte zu entwickeln. Bei einer nassen Straßenoberfläche reduziert der eindringende Wasserfilm die Reibungskräfte in die Kontaktfläche. Wenn die Straßenoberfläche eine gute Griffigkeit besitzt, kann diese Kraftreduktion minimiert werden.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird die Herstellung von Waschbetonprobekörpern im Labor beschrieben. Dabei wird der Fokus auf die Ausbürstvorrichtung und auf die Prüfanlage Wehner/Schulze gelegt. Die Anwendung einer Ausbürstvorrichtung ermöglicht ein praxisnahes Ausbürsten im Labor. Das Ziel ist eine ähnliche Rautiefe wie beim maschinellen Ausbürsten auf der Baustelle zu erreichen. Der Polierwiderstand von Waschbeton wird mit dem Polierverfahren nach Wehner/Schulze ermittelt. Diese Untersuchung ist nach der Fragestellung orientiert, wie die Griffigkeit von Waschbetonoberflächen durch Variation von den verschiedenen Arten des Ausbürsten beeinflusst wird. Das Ziel ist eine realitätsnahe Bewertung der Griffigkeit bei Laborbedingungen zu erreichen. Die durchgeführten Prüfungen liefern einen Beitrag zu den Zielen des Forschungsprojektes zur Definition des Laborverfahrens zur Griffigkeitsprognose von Waschbetonoberflächen, sowie zur Festlegung von entsprechenden Laborgrenzwerten in den relevanten Regelwerken.

## 2 Waschbetonprobekörpervorbereitung

Das folgende Kapitel beschreibt das Verfahren zur Herstellung von Betonprüfplatten im Labor.

### 2.1 Erforderliche Prüfgeräte und Hilfsmittel

#### 2.1.1 Zwangsmischer

Ein Zwangsmischer dient zur schnellen und vollständigen Durchmischung der trockenen, feuchten und nassen Baumaterialien. Das Mischgut wird in den Behälter gegeben und mit der vorgeschriebenen Flüssigkeitsmenge aufbereitet. Kräftige Mischarme sorgen zeitsparend für eine homogene Mörtelmischung. Die Prüfmaschine besteht im Wesentlichen aus einem ruhenden Behälter, in dem Mischwerkzeuge die Materialien mischen. Der Trommelinhalt des Prüfgerätes ist 100 l und es ist für 60 Liter Fertigmischgut. Der Zwangsmischer ist geeignet für fein- und grobkörniges Mischgut bis zu einer Korngröße von 16 mm. Die schnelle Entleerung erfolgt über einen Segmentschieber am Trommelboden. Die nötige Sicherheit bietet dabei den eingebauten Entleerschutzgitter [14].



Abbildung 1: Zwangsmischer

#### 2.1.2 Rütteltisch

Der Rütteltisch dient zur Verdichtung von Beton oder Schüttgütern. Ebenso werden Rütteltische in bestehende Anlagen integriert um Produkte zu verdichten oder zu verteilen. Das Prüfgerät besteht grundsätzlich aus zwei Teilen. Der obere Teil ist ein mobiler Rütteltisch (A), der auf einen Ständer (B) mit optimaler Arbeitshöhe 75 cm gestellt ist. Der Rütteltisch hat eine Formzentrierung und beidseitige Tropfkante und ist mit galvanisch verzinktem Korrosionsschutz.

Der Rütteltisch besteht aus:

- (1) Drehzahlregelung
- (2) Großflächiger Ein/Aus-Wippschalter – zum Starten und Stoppen des Geräts
- (3) Zeitschaltwerk – variable Zeiteinstellung von 0 – 60 Sekunden

Die Verdichtung des Frischbetones erfolgt auf einem Rütteltisch bei einer Frequenz von 50 Hz für eine Dauer von 30 bis 60 Sekunden je nach der Konsistenz. Durch Anwendung des Rütteltisches ist eine völlige Verdichtung von Beton erzielt. Der Beton ist mit der Probenahmeschaufel so in die Schalung einzufüllen, dass möglichst wenig Luft eingeschlossen wird. Die Rüttelbehandlung muss mindestens für die Dauer angewendet werden, die für eine vollständige Verdichtung des Betons notwendig ist. Die Schalung mit dem frisch gefüllten Beton sollte vorzugsweise am Tisch befestigt sein oder fest dageengehalten werden. Zu langes Rütteln, das den Verlust künstlich eingeführter Luftporen bewirken kann, ist zu vermeiden [14].

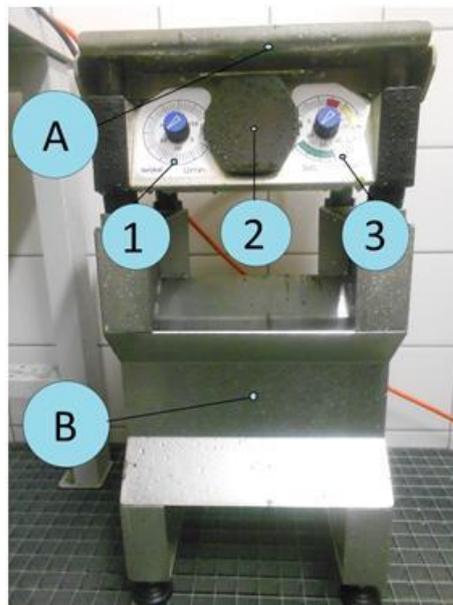


Abbildung 2: Rütteltisch

### 2.1.3 Luftgehaltsprüfer

Der Luftgehaltsprüfer dient zur Bestimmung des Luftporengehaltes im Beton. Dieses Prüfgerät arbeitet nach dem Prinzip des Boyle-Mariotteschen-Gesetzes und das Prüfverfahren ist als Wassersäulenverfahren bezeichnet. Wasser wird über eine verdichtete Betonprobe bekannten Volumens bis auf eine festgelegte Höhe eingefüllt und ein festgelegter Luftdruck über dem Wasser aufgebracht. Die Abnahme des Luftvolumens in der Betonprobe wird durch Beobachten der Verringerung des Wasserpegels gemessen, die Wassersäule ist dabei auf den prozentualen Luftgehalt der Betonprobe kalibriert. Das Prüfgerät besteht aus zwei Teilen: Behälter (A) und Oberteil (B).



Abbildung 3: Luftgehaltsprüfer

Der Behälter ist ein angeflanshtes zylindrisches Gefäß aus Stahl oder einem anderen harten Metall, das reaktionsträge gegenüber dem Zementleim ist, mit einem Nennvolumen von 8 l. Der Behälter muss wasserdicht sein, Behälter und Verschluss müssen außerdem für einen Prüfdruck von etwa 0,1 MPa (N/mm<sup>2</sup>) geeignet und ausreichend biegesteif sein, um die Druckausdehnungskonstante  $e$ , auf 0,1 % Luftgehalt zu begrenzen. Der Oberteil des Gerätes besteht aus:

- (1) Klemmenverschluss – zur robusten 3-Punkt Verspannung zwischen Oberteil und Behälter
- (2) Aufsatzverschluss – mit einer geeigneten Vorrichtung zum Belüften der Luftkammer, einer Rückflusssperre und einem kleinen Ventil zum Ablassen des Wassers.
- (3) Nadelventil mit großer Rändelschraube zur optimalen 0 - Justierung
- (4) Handpumpe – zum Aufbringen des Arbeits-bzw. Prüfdruck
- (5) Manometer mit stabilem Manometerschutz, gleichzeitig als Tragegriff für das Oberteil nutzbar [14]

#### 2.1.4 Diamant – Kernbohrmaschine

Die Diamant - Kernbohrmaschine wird bestimmungsgemäß nur zum Bohren von Asphalt, Beton und Mauerwerk verwendet. Die Kernbohrmaschine wird ausschließlich im Bohrständler (2) montiert betrieben (ständergeführt) und nur für den gewerblichen Gebrauch bestimmt ist. Die Bohrkronen, ist ein Hohlbohrer, der mit Diamantsplittern imprägnierten Segmenten bestückt ist. Das Gerät besteht aus:

- (1) Bohrständler
- (2) Bohrkronen
- (A) Kugelbahn und Stecknippel
- (B) Ein-und Ausschalten – Taste [14]



Abbildung 4: Diamant-Kernbohrmaschine

## 2.1.5 Andere Prüfgeräte und Hilfsmittel

### 2.1.5.1 Laborwaage

Die Laborwaage ist ein Messgerät zur Bestimmung der abgewogenen Masse. Mit der Hilfe der Laborwaage werden die entsprechenden Mengen des Mischgutansatzes bestimmt. Auf dem Display der Waage sind die folgenden Tasten:

- (1) ON/OFF – Taste kurz drücken zum Einschalten der Waage und zum Ausschalten die selbe Taste ca. 2 – 3 Sekunden gedrückt halten
- (2) MODE – die Taste vier Sekunden lang drücken, um den Kalibriermodus aufzurufen
- (3) SET – zur Auswahl von Einheit
- (4) PRINT – zum Ausdrucken
- (5) TARE – Zum Einstellen auf Null (tarieren) [14]

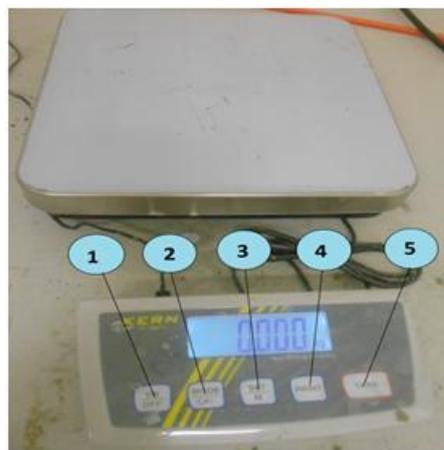


Abbildung 5: Laborwaage

### 2.1.5.2 Schalungen

Eine Schalung ist die Gussform, in die der Frischbeton zur Herstellung von Betonplatten eingebracht wird. Die Schalung wurde einlagig mit Beton befüllt. Nach dem Erhärten des Betons wird die Schalung im Regelfall entfernt. Zur Herstellung der Probekörper wurden Holzformen mit Maßen 30 cm x 28 cm x 4,5 cm verwendet. Eine Schalung besteht aus drei Teilen:

(1) untere Platte, die zum Boden des Probekörpers dient

(2) zwei Wände, die mit Klemmen (A) verbunden sind [14].

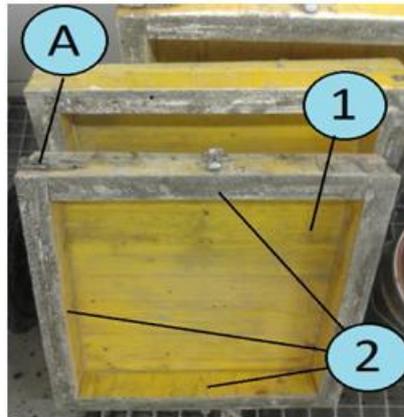


Abbildung 6: Schalung

### 2.1.5.3 Glättkelle

Die Glättkelle ist ein Werkzeug, mit dem der Frischbeton geglättet oder strukturiert wird. Durch wenige Striche mit der Glättkelle wird der Beton in die Schalung gleichmäßig verteilt und strukturiert. Zur Ausrichtung der Einzelkörner wird die Oberfläche mit einer Glättkelle bei leichtem Anpressdruck geglättet. Der sich beim Glätten an einer Seite ansammelnde Oberflächenmörtel wird anschließend von der Glättkelle entfernt [14].



Abbildung 7: Glättkelle

### 2.1.5.4 Sprühgerät

Das Sprühgerät dient zum Sprühen der verschiedenen Flüssigkeiten unter hohem Druck. Das Sprühgerät ist geeignet zum Aufsprühen des Verzögerers auf die Oberfläche der Betonplatten. Das Gerät besitzt eine rund sprühende Düse, die eine gleichmäßige Verteilung der Verzögerer auf die Oberfläche der Platten gewährleistet. Das Sprühgerät hat auch eine stufenlose Regulierung für materialgerechte Anwendung. Das verwendete Sprühgerät hat folgende technische Daten:

Tabelle 1: Technische Daten des Sprühgerätes

Nennaufnahme	280 W
Förderleistung	0-110 g/min
Zerstäubungsenergie	55 W
Auftrag	5m <sup>2</sup> in 12 min
Behältervolumen	600 ml



Abbildung 8: Sprühgerät

2.1.5.5 **Hilfsmittels:**

(1) Stoppuhr,

(2) Probenahmeschaufel,

(3) Behälter für Beton



Abbildung 9: Hilfsmittels

## 2.2 **Verwendete Materialien**

### 2.2.1 **Gestein**

Das Gestein ist ein körniges Material, das im Bauwesen verwendet wird. Gesteinskörnungen können natürlich, industriell hergestellt oder recycelt sein. Die natürlichen Gesteinskörnungen sind aus mineralischem Vorkommen und sind ausschließlich einer mechanischen Aufbereitung unterzogen. Die industriell hergestellten Gesteinskörnungen sind in einem industriellen Prozess unter Einfluss einer thermischen oder sonstigen Veränderung entstanden. Die Recycling-Gesteinskörnungen sind aus aufbereitetem anorganischem Material, das zuvor als Baustoff eingesetzt war. Die Gesteinskörnungen können Füller(Gesteinsmehl), feine Gesteinskörnungen und grobe Gesteinskörnungen sein. Der Füller ist eine Gesteinskörnung, deren überwiegender Teil durch das 0,063-mm-Sieb hindurchgeht und den Baustoffen zur Erreichung bestimmter Eigenschaften zugegeben werden kann. Die feine Gesteinskörnung ist Bezeichnung für Korngruppen mit oberer Korngröße nicht größer als 4 mm und die grobe Gesteinskörnung ist Bezeichnung für größere Korngruppen mit oberer Siebgröße nicht kleiner als 4 mm und untere Siebgröße nicht kleiner als 2 mm. Der Beton besteht aus etwa 75% Gesteinskörnungen. Als Grundlage für die Ausbildung einer Waschbetonstruktur ist der Oberbeton aus Sand 0/1 mm oder 0/2 mm und Körnungen 4/8 mm oder 4/11 mm herzustellen. Das Korngemisch zur Herstellung von Betonplatten besteht aus einer Mischung feiner Gesteinskörnungen 0/2 mm und grober Gesteinskörnungen 4/8 mm. Für die grobe Gesteinskörnung wurden Edelsplite eingesetzt. Als feine Gesteinskörnung wurde Sand verwendet [14],[4].

Zu erwarten ist, dass bei Verwendung der stetigen Sieblinie eine geringere Rautiefe erreicht wird. Es kann mit stetiger Sieblinie als auch mit Ausfallkörnung gearbeitet werden. Für die Verwendung einer stetigen Sieblinie spricht zunächst, dass sich hiermit eine Waschbetonoberfläche im Labor zielsicherer herstellen lässt. Die Gefahr von Bereichen ohne Größtkorn ist geringer. Gleichzeitig besteht die Gefahr, dass Körner über 2 mm ausgebürstet werden und die Rautiefe so überproportional erhöht wird [4].

Tabelle 2: Sieblinie für GK 8

Siebennweite [mm]	Nr.	1	2	Gesamtsieblinie
	Körnung	EBK 0/2	EBK 4/8	
	Herkunft	Klöch	Klöch	
	LNr.	19 08 14/7	19 08 14/7	
	Anteil	30M%	70M%	
0.063	Siebdurchgang [Masse %]	6.2	0	1.9
0.125		10.1	0	3
0.25		17.8	0	5.3
0.5		30.2	0	9.1
1		52.9	0.7	16.4
2		89.7	1.3	27.9
4		100	11.4	38
8		100	93.1	95.2
11		100	100	100

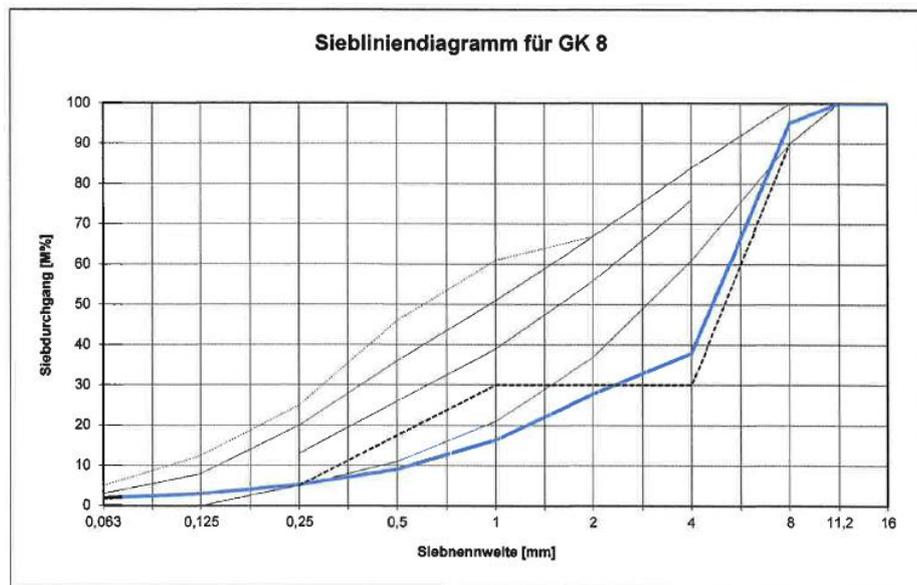


Abbildung 10: Sieblinie für GK 8 [4]

## 2.2.2 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das mit Wasser reagiert und Zementleim ergibt. Durch Hydratation erstarrt und erhärtet der Zementleim und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt. Der Zement besteht aus Klinker (gebranntes Gemisch aus Kalk und Mergel), Hüttensand, Flugasche, Kalkstein und Gips. Ein Spezialzement CEM II/B-S 42,5 N (DZ) wird zur Herstellung der Waschbetonprobekörper verwendet. Die hohe Biegezugfestigkeit CEM II/B-S 42,5 N trägt wesentlich zur einen hohen Biegezugfestigkeit und damit zur Dauerfestigkeit des Waschbetons bei [14].

Tabelle 3: CEM II/B-S 42,5 N

Eigenschaften gem. Leufender Eigenüberwachung	Richtwerte	Normanforderungen
		ON EN 197-1
Dichte kg/m <sup>3</sup>	3,04	-
Druckfestigkeit (bei 20° C) in Mpa:		
1 Tag	12	-
2 Tage	22	≥10
7 Tage	-	-
28 Tage	52	≥42,5≤62,5
Biegezugfestigkeit (bei 20° C) 28 Tage C in MPa	8	-

In der Tabelle 4 sind die in den verschiedenen Zementtypen enthaltenden Komponenten dargestellt.

Tabelle 4: Hauptkomponenten

Hauptkomponenten	
K	Portlandzementklinker
S	Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke)
P,Q	Natürliche und industrielle Puzzolane
V,W	Kieselsäurereiche und kalkreiche Flugasche
T	Gebrannter Schiefer
L, LL	Kalkstein
D	Silicastaub

Der CEM-Zement muss bei entsprechender Dosierung und nach entsprechendem Mischen mit Gesteinskörnung und Wasser, Beton oder Mörtel ergeben, der ausreichend lange verarbeitbar sein muss, nach einer bestimmten Zeit ein festgelegtes Festigkeitsniveau erreichen muss und langfristig raumbeständig sein muss.

Die hydraulische Erhärtung von CEM-Zement beruht vorwiegend auf der Hydratation von Calciumsilicaten und Aluminaten. Der Massenanteil an reaktionsfähigem Calciumoxid (CaO) und reaktionsfähigem Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>) muss in CEM-Zementen mindestens 50 % betragen.

In Europa sind die Zemente in der Norm DIN EN 197-1 (Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzement) erfasst. Nach dieser Norm werden die allgemein gebräuchlichen Zemente in die folgende Hauptzementarten eingeteilt:

Tabelle 5: Hauptzementarten

Hauptzementarten	
Hauptarten	Bezeichnung
CEM I	Portlandzement
CEM II	Portlandkompositzement
CEM III	Hochofenzement
CEM IV	Puzzolanzement
CEM V	Hüttensand-Puzzolan-Zement
CEM VI	Kompositzement

Die Zemente CEM I, II, III sind bereits im Betonstraßenbau zum Einsatz gekommen. Für die Laboruntersuchungen wurde ein CEM II B-S der Festigkeitsklasse 42,5 N verwendet. Dieser Zementart enthält neben Portlandzementklinker 21 bis 35 M.-% Hüttensand als Hauptbestandteil. Die Zusammensetzung des verwendeten Zements kann man in der folgenden Tabelle sehen [14].

Tabelle 6: Zementarten und deren Zusammensetzung

Hauptarten	Bezeichnung der 35 Produkte (Normalzementarten)	Zusammensetzung (Massenanteile in Prozenta)									
		Hauptbestandteile									Nebenbestandteile
		Klinker	Hüttensand	Silicastaub	Puzzolan		Flugasche		Gebrannter Schiefer	Kalkstein	
natürlich	natürlich getempert				kiesel-säurereich	kalkreich					
CEM II	Portlandhüttensandzement	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5

### 2.2.3 Anmachswasser

Das Wasser wird für die chemische Reaktion (Hydratation) benötigt. Jedes Trinkwasser, als auch Brauchwasser (Wasch- und Regenwasser) ist für fast alle Betonsorten geeignet. Für die Betonherstellung wird Trinkwasser verwendet.

#### 2.2.4 Zusatzmittel

Zur Einstellung gewünschter Frischbetoneigenschaften werden ein Superfließmittel auf Acrylpolymerbasis und ein Mikroluftporenbildner auf Basis synthetischer Tenside verwendet. Die Zugabemengen werden im Mischungsansatz eingegeben. Beide sind vom selben Hersteller und für eine gemeinsame Verwendung im Beton geeignet. Das Ziel des Luftporeneintrags ist eine gute Verarbeitbarkeit durch die Erhöhung der Leimmenge und dem Kugellagereffekt durch die runden Luftporen. Da kein Einfluss des Luftgehaltes auf die Rautiefe festgestellt wurde, kann für den Luftgehalt ein relativ großer Bereich zugelassen werden [14].



Abbildung 11: Fließmittel und Luftporenbildner

#### 2.2.5 Kombinationsmittel

Der Verzögerer dient zur Verzögerung des Erstarrens der oberen Zementleimschicht für eine begrenzte Zeit. Für die Herstellung von Waschbetonoberflächen wird der Verzögerer direkt auf die frische Betonoberfläche aufgebracht (Positivverfahren). Bei dem Negativverfahren wird der Oberflächenverzögerer auf die Schalung vor der Betonage appliziert. Im Bereich des Betonstraßenbaus wird nur das Positivverfahren angewendet. Der Oberflächenverzögerer soll gewährleisten, dass eine dünne Schicht des Oberflächenmörtels durch mechanisches Ausbürsten wieder entfernt werden kann, obwohl der darunter liegende Beton normal erhärtet und schon befahrbar ist. Ein Oberflächenverzögerer muss deshalb in jedem Fall auch die Erhärtung verzögern. Die Wirkung eines Verzögerer hängt von seinem Wirkstoff, der Zugabemenge und dem Zugabezeitpunkt ab. Bei verschiedenen Verzögerern in Abhängigkeit der Zugabemenge ein Umschlag vom Verzögerungseffekt in einen Beschleunigungseffekt zu beobachten ist. Trotz intensiver Forschung ist es bis heute nicht möglich, die Verzögerungswirkung eines bestimmten Verzögerer in Kombination mit einem bestimmten Zement vorherzusagen. Es wird deshalb immer empfohlen, das Zusammenwirken eines bestimmten Verzögerer und dem zu verwendenden Zement im Einzelfall zu untersuchen [14].



Abbildung 12: Verzögerer

Grundsätzlich stehen zwei Arten von Verzögerer – Reine Verzögerer und eine Kombination aus Verzögerer und Nachbehandlungsmittel. Bei ersterem Variant muss der Beton nach Applikation des Verzögerers bis zum Ausbürsen des Oberflächenmörtels mittels Folie nachbehandelt werden. Für die Kombination aus Nachbehandlungsmittel und Verzögerer entfällt dieser Arbeitsgang. Beide Varianten bedingen Unterschiede in der Herstellung und haben Vor- und Nachteile:

Tabelle 7: Arten der der Verzögerung der Oberflächenleimschicht

	Reine Verzögerer	Kombinationsmittel
Auftragsmengen [g/m <sup>2</sup> ]	250 – 350	150 – 250
Verzögerungsdauer [h]	12 – 30	8 – 18
Vorteile	Einbau auch bei Regen	geringere Kosten
Nachteile	teuer: Entsorgung der Folien	kein Einbau bei Regen
Abbürstungsvorgang	Nass	Trocken

Die Betonfahrbahnen, die in der Waschbetonbauweise ausgeführt werden, zeichnen sich ab, dass die Kombinationsmittel den größten Anteil ausmachen. Die Verwendung der reinen Oberflächenverzögerer und einer Nachbehandlung mit Folie wird vielfach als zu teuer und aufwendig gesehen. Aus diesem Grund soll sich für die Herstellung von Betonplatten auf die Kombinationsmittel beschränkt werden [14],[4].

## 2.3 Betonplattenherstellung

### 2.3.1 Rezeptur

Tabelle 8: Mischungsansatz

Mischungsansatz		
Gesteinskörnung trocken:		
EBK 0/2 fk5 GS	22 M %	8 975.0 g
EBK 4/8 GS	52,5 M %	20 936.2 g
CEM II/B-S 42.5 N (DZ)	18 M %	7 183.2 g
Gesamtwasser	7,5 M %	2 905.6 g
Fließmittel (FM)	0,15 % ZM	10.8 g
Luftporenbildnerkonzentrat (LP)	0,6 % ZM	43.1 g
Verzögerer (V)	200 g/m <sup>2</sup>	16.8 g

Die Zementmenge sollte für den Prüfbeton 430 kg pro Kubikmeter Frischbeton betragen. Der dadurch erhöhte Mörtelgehalt bewirkt eine gute Verarbeitbarkeit.

Der Wasser/Zement-Wert sollte auf 0,4 beschränkt bleiben. Bei höheren w/z-Werten besteht die Gefahr, dass aufgrund der hohen Zementmenge die Wassergehalte so hoch sind, dass es unter Laborbedingungen zum Bluten, d.h. zur Bildung eines Wasserfilms auf der Betonoberfläche kommt. Für die Prüfung ist dies nicht zulässig, da bei Auftrag des Kombimittels auf eine blutende Fläche eine Verdünnung eintritt. Durch die Wahl des w/z-Wertes von 0,4 wurde das Wasserabstoßen der Betone so weit reduziert, dass es nicht zur Bildung eines Wasserfilms kommt. Das heißt, mit der Wahl des w/z-Wertes von 0,4 kann für übliche Fahrbahndeckenbetone ein Beton hergestellt werden, der nicht zu einer unerwünschten Wasseransammlung an der Oberfläche führt [14].

### 2.3.2 Mischen des Betons

Zur Herstellung des Betons werden getrocknete feine und grobe Gesteinskörnungen verwendet. Die entsprechende Menge für 40 kg Frischbeton wird mit der Hilfe einer Laborwaage bestimmt.

Zuerst werden die entsprechende Menge grobe Gesteinskörnungen 4/8 und Zement in den Zwangsmischer 20 Sekunden trocken gemischt. Dann sind die feinen Gesteinskörnungen 0/2 zuzugeben und wieder 20 Sekunden trocken zu mischen. Anschließend wird das Anmachwasser mit den entsprechenden Mengen Zusatzmitteln 5 Minuten beigemischt.

Tabelle 9: Mischregime

Vorgang		Zeit [sec]
Einfüllen der Gesteinskörnung		
1	Trockenmischen von grobe Gesteinskörnungen und Zement	20
2	Trockenmischen und Zugabe des feinen Gesteinskörnungens	20
3	Mischen und Zugabe des Wassers (mit FM und LP)	300

Als Zusatzmittel werden ein Fließmittel und ein Luftporenbildnerkonzentrat verwendet. Ins Wasser wird die entsprechende Menge zugegeben und händisch gemischt.

Damit eine höhere Genauigkeit der Zeit erreicht wird, sind diese Zeitintervalle mit der Hilfe einer Stoppuhr zu messen. Die Herstellung der Betone erfolgte in einem Labor bei Temperaturen zwischen 18° – 22° C [14].



Abbildung 13: Mischen des Betons

### 2.3.3 Bestimmung des Luftporengehaltes

Zur Charakterisierung des Frischbetons wird der Luftporengehalt bestimmt. Die Bestimmung des Luftgehaltes erfolgte gemäß DIN EN 12350 – 7. Die Messungen erfolgen 10 Minuten nach Mischende. Zu den entsprechenden Messterminen ist der Beton mit Hilfe einer Probenahmeschaufel in den Behälter des Luftgehaltsprüfers einzufüllen, so dass der Behälter bis zum oberen Rand gefüllt wird. Dann wird der Behälter am Rütteltisch befestigt oder fest dagegehalten, um eine völlige Verdichtung zu erzielen. Wenn die notwendige Verdichtung erzielt wird, werden der Oberteil und der Behälter durch Klemmenverschluss verspannt. Der Luftgehaltsprüfer wird mit Wasser gefüllt, damit die Störung des Betons gering gehalten wird. Dann wird die Handpumpe zum Aufbringen des Druckes gepumpt und der Luftporengehalt wird auf dem Manometer abgelesen [14].



Abbildung 14: Bestimmung des Luftporengehaltes

### 2.3.4 Einschalung, Glättung und Besprühung des Probekörpers

Zur Herstellung von Betonprobekörpern werden drei Holzformen mit den entsprechenden Maßen verwendet. Die Montage der Schalungen kann vorläufig gemacht werden. Das Herstellen der Probekörper erfolgte 10 – 15 Minuten nach Mischende.

Die notwendige Betonmenge wird vollständig in die Form gefüllt, wobei bereits beim Einfüllen versucht wird, die Ecken der Form mit Beton auszufüllen. Erst nach dem vollständigen Befüllen des Betons wird der Rütteltisch eingeschaltet und solange verdichtet, bis sich der Beton gleichmäßig in der Form verteilt. Nach dem Befüllen und der Verdichtung der Formen, wurde mittels der Laborwaage das Gewicht jedes Probekörpers bestimmt.

Durch einige Schritte mit einer Glättkelle wird die Verteilung des Betons unterstützt und die Ausrichtung der Körner an der Oberfläche begünstigt. Dann wurde der Auftrag der Kombinationsmittel mittels eines Sprügeräts durchgeführt. Zur Kontrolle der Auftragsmenge werden die Proben auf einer Waage besprüht und durch eine Schablone sichergestellt, dass nur die geglättete Betonoberfläche besprüht wird. Nach dem Aufsprühen des Verzögerers verblieben die Proben bis zum Ausbüstzeitpunkt im Klimaraum [14].



Abbildung 15: Einschalung, Glättung und Besprühung des Probekörpers

## 2.3.5 Ausbürsten der Platten

### 2.3.5.1 Händisch

Die gewählten Ausbürstzeitpunkte variierten je nach Lagerung. Bei einer Lagerung bei 25 °C / 60 % r. F. erfolgte das Ausbürsten 6 h nach Mischende. Das Ausbürsten der Betonplatten erfolgt zunächst nur mit einer Kunststoffwurzelsbürste, die mit einem Handdruck mehrmals über die Fläche geführt wird, bis kein nennenswerter Materialabtrag mehr auftritt. Die Drahtbürste soll dazu mit der gesamten Fläche parallel zu den Außenkanten bei gleichmäßigem Druck über die Betonoberfläche geführt werden. Schließlich wurden die Probekörper ausgeformt. Damit leichtere Ausformung des Betonplatten erreicht wird, können die Schalungen mit einem speziellen Öl gefettet werden [14].

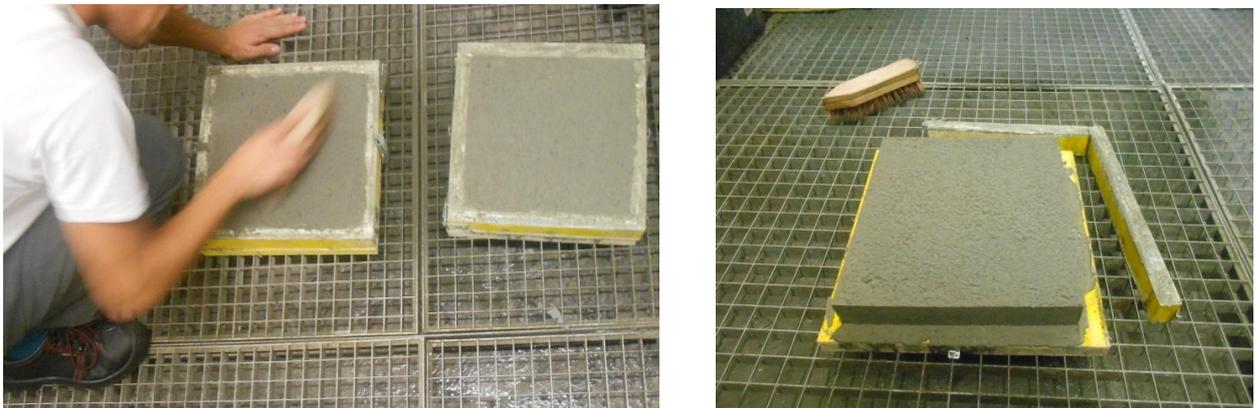


Abbildung 16: Ausbürsten der Platten händisch

### 2.3.5.2 Mit Ausbürstvorrichtung

#### 2.3.5.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Bei dem händischen Ausbürsten der Waschbetonplatten mit einer Drahtbürste entsteht ein Problem, da die Drahtbürste nicht immer mit einem gleichmäßigen Handdruck über die Fläche der Platten geführt wurde. Eine Ausbürstvorrichtung mit Pendelbesen wurde in Deutschland entwickelt, damit der Subjektivismus bei dem händischen Ausbürsten minimiert wird. Diese Vorrichtung ermöglicht ein praxisnäheres Ausbürsten im Labor. Das Ziel ist eine ähnliche Rautiefen wie beim maschinellen Ausbürsten auf der Baustelle zu erreichen. Diese automatisierte Vorrichtung besteht aus einem pendelnd gelagerten Stahlbesen, der auf zwei Schienen gefahren wird. Der Besen wird durch das Gewicht des Bearbeiters auf die senkrecht stehenden Fahrschienen gedrückt. Auf diese Weise ist der Druck, mit dem der Besen die Platte belastet, immer gleichmäßig. Wenn der Stahlbesen über die Probe hinweggeschoben wird, pendelt er wieder in seiner Ausgangsstellung. Durch Rückwärtsziehen des Stahlbesens erfolgt das Ausbürsten analog [4].

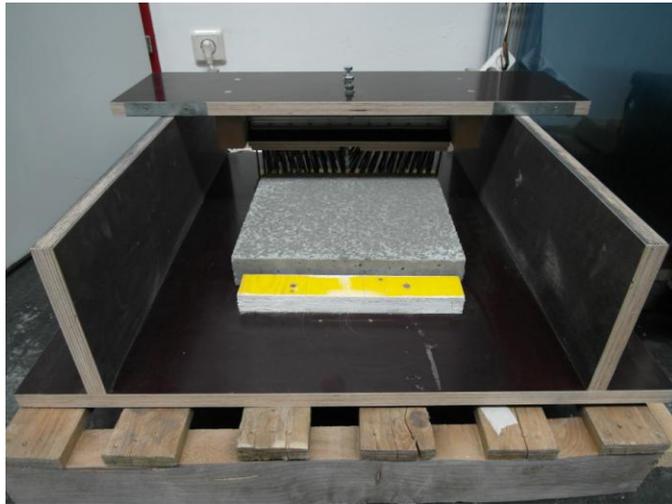


Abbildung 17: Ausbürstvorrichtung

#### 2.3.5.2.2 **Einstellung des Anpressdruckes**

Die Ausbürstvorrichtung muss kalibriert werden. Der Anpressdruck wird mit einer Waage eingestellt, die in der Vorrichtung eingebaut wird. Die Fahrschienen werden durch Zusatzstücke erhöht, damit der Stahlbesen zur Waagenoberfläche die gleiche Höhenposition wie auf den auszubürstenden Platten besitzt. Wenn der Stahlbesen auf die senkrecht stehenden Fahrschienen bewegt wird, belastet er die Waage mit gleicher Kraft wie beim Ausbürsten der Platten. Wenn der Besen die Platte anschlägt, wird er mit einem bestimmten Winkel ausgelenkt. Je steiler der Winkel ist, desto höher wird der Anpressdruck. Der Anschlag des Stahlbesens kann durch zwei Schrauben variiert werden. Der Stahlbesen muss die Platte mit einer Kraft von  $130 \pm 5$  N belasten [4].



Abbildung 18: Einstellung des Anpressdruckes

#### 2.3.6 **Bohren des Probekörpers**

Die Waschbetonprobekörper müssen einen Durchmesser  $\varnothing$  225 mm haben, damit sie in die Prüfanlage nach Wehner/Schulze eingebaut werden können.

Zur Herstellung des erforderlichen Bohrdurchmessers des Betonprobekörpers wird eine Kernbohrmaschine verwendet. Das Gerät ist für Gestein, Beton, Asphalt und Mauerwerk geeignet.

Die Platte wird unter die Bohrkronen mit Durchmesser  $\varnothing$  225 mm so gelegt, dass die Bohrkronen mittig über der Betonplatte ist. Durch Wasserzugabe über den Kugelhahn durch die Bohrkronen wird das abgetragene Material weggespült, und das Werkzeug gekühlt (Nassbohren). Die Maschine muss über den Stecknippel an die Wasserversorgung angeschlossen sein. Vorzugsweise ist es nur sauberes Leitungswasser zu verwenden, da durch Schmutzwasser der Wärmeübergang an den Kühlflächen erheblich gestört wird, und dadurch am Motor irreparable Schäden entstehen können. Nach dem Bohren muss die Bohrvorrichtung mit Wasser besprüht und gereinigt werden [14].

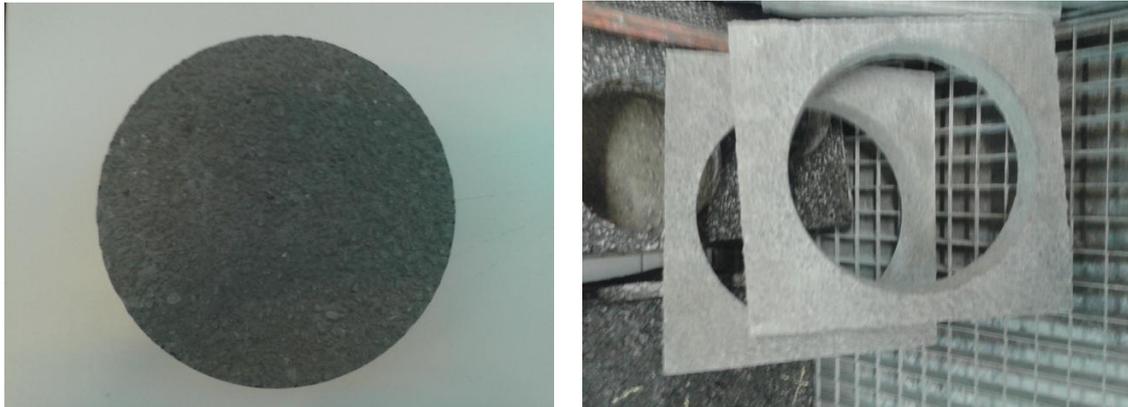


Abbildung 19: Bohren des Probekörpers

### 2.3.7 Bestimmung der Rautiefe

Bei Betondecken mit Waschbetonstruktur sind die Rautiefe und die Profilspitzenzahl unmittelbar nach der Herstellung zu überprüfen. Die Rautiefe ist gemäß ÖNORM EN 13036-1 und die Anzahl der Profilspitzen (zu zählen sind nur Spitzen, die von Körnern  $\geq 4$  mm stammen) je Flächeneinheit (Profilspitzenzahl als Mitte aus 3 Teilflächen von je  $25 \text{ cm}^2$ ) zu bestimmen.

In Österreich schreibt die RVS 08.17.02 neben der Rautiefe auch die Anzahl der Profilspitzen (von Körnern  $\geq 4$  mm) vor. Es wird weiterhin zwischen Waschbeton mit Größtkorn 8 mm (Splitt 4 – 8 mm) und Waschbeton mit Größtkorn 11 mm (Splitt 4 – 11 mm) unterschieden.

Tabelle 10: Anforderungen an Waschbetonoberflächen

Kenngröße	Waschbeton (GK 8 mm)	Waschbeton (GK 11 mm)
Rautiefe [mm]	0,8 – 1,0	1,0 – 1,3
Profilspitzenanzahl [-] (auf Fläche 5cm x 5 cm)	Richtwert 60	Richtwert 45

Das Bauverfahren ist so zu berichtigen, dass die zulässigen Werte aus der Tabelle oben erreicht werden. Die Prüfungen sind im Zuge der Arbeiten laufend zu wiederholen, insbesondere bei Änderung der Erscheinungsbilder der Oberfläche der Decke. Die Ursachen allfälliger Mängel sind festzustellen und zur künftigen Fehlervermeidung zu beheben.

Die Bestimmung der Rautiefe ist durch Sandfleckverfahren möglich. Es ist ein volumetrisches Verfahren, mit dessen Hilfe eine Messung der Makrotexturtiefe der Probekörperoberfläche gemacht wird. Die normativen Grundlagen dieses Verfahrens sind DIN EN 13036-1 beschrieben. Das Prinzip des Verfahrens ist, dass eine bestimmte Sandmenge auf einer Probekörperoberfläche ausgebreitet wird. Auf dieser Weise wird der Sand so verteilt, dass er einen kreisförmigen Fleck bildet und dessen Durchmesser wird gemessen. Das Sandvolumen wird durch die bedeckte Fläche dividiert und so ist einen Wert erhalten, der mittlere Tiefe der Sandschicht darstellt (eine mittlere Texturtiefe) [14].



Abbildung 20: Bestimmung der Rautiefe

Die notwendigen Materialien und Geräte sind:

- (1) Runde Glaskugeln mit 90% Massenanteil ein Sieb mit 0,25 mm Lochweite
- (2) Verteilerwerkzeug – eine flache harte Scheibe mit Durchmesser von etwa 65 mm, auf einer Seite mit einer harten Gummipolitur und einer Masse von  $305 \pm 10$  g
- (3) Zylindrischer Probenbehälter mit bekanntem Rauminhalt von mindestens  $25\,000 \pm 150$  mm<sup>3</sup>
- (4) Lineal mit einer Länge von 500 mm und mit einem Skalenteilungswert von 1 mm

Zuerst ist der Zylinder mit bekanntem Rauminhalt mit trockenem Glassand zu füllen und mit dem Boden mehrmals leicht auf eine feste Oberfläche zu klopfen. Der Behälter muss bis zum oberen Rand gefüllt werden und mit einer Abziehlplatte zu glätten. Der Glassand ist auf die trockene und saubere Probekörperoberfläche zu schütten. Dann ist der Glassand sorgfältig mit der gummibeschichteten Seite der Scheibe so zu verteilen, dass die Oberflächenhöhlräume bis auf die Höhe der Gesteinsspitzen gefüllt werden und ein kreisrunder Fleck entsteht. Es ist mit der Hand so viel Druck auszuüben, dass die Scheibe die Gesteinsspitzen auf der Probekörperoberfläche berührt. Der Durchmesser der vom Glassand

bedeckten Kreisfläche ist an mindestens vier gleichweit voneinander entfernten Stellen auf dem Umfang des Prüfbereichs zu messen und festzuhalten. Der mittlere Durchmesser ist zu berechnen und festzuhalten. Die Berechnung der mittleren Oberflächentexturtiefe ist nach der folgenden Gleichung ermittelt:

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}, \text{ wo} \quad \text{Gl. 1}$$

MTD - die mittlere Oberflächentexturtiefe, in Millimeter (mm);

V - das Probenvolumen (d. h. Zylinderinnenvolumen), in Kubikmillimeter (mm<sup>3</sup>);

D - der mittlere Durchmesser der vom Glassand bedeckten Fläche, in Millimeter (mm). [15]

### 3 Topographiemessung

Nach dem Ausbürsten werden die Oberflächeneigenschaften der Platten mit Laser aufgenommen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Laser verwendet.

#### 3.1 Oberflächenparameter

Die Oberflächenparameter werden in drei Gruppen- Primärparameter, Rauheitsparameter und Welligkeitsparameter getrennt. Die Oberflächenparameter beschreiben eine Oberfläche in einer senkrechten Ausbildung. Mit der Analysesoftware können die Oberflächenparameter automatisiert berechnet werden.

Diese Primärparameter werden direkt aus dem erhaltenen Primärprofil, also ohne den Einsatz von Filtern, bestimmt [1].

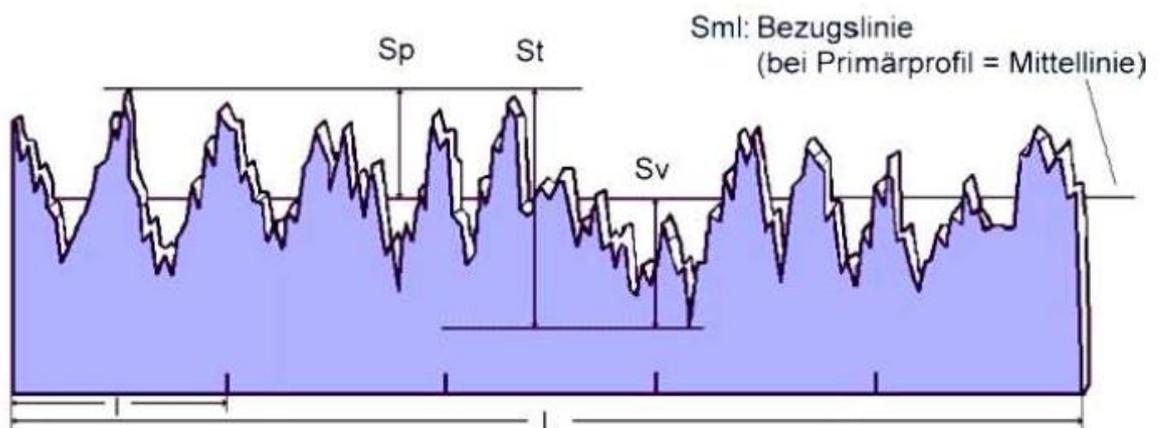


Abbildung 21: Graphische Darstellung der Primärparameter [1]

In der Abbildung 21 sind die verschiedenen Größen der Primärparameter graphisch dargestellt.

- Sp - Die größte Höhe der ausgewählten Fläche
- St - Die maximale Höhe der ausgewählten Fläche (=Sp+Sv)
- Sv - Die größte Tiefe der ausgewählten Fläche
- Sml – Mittellinie des Primärprofils.

Im Anschluss an die Primärparameter werden die Rauigkeitsparameter und die Welligkeitsparameter dargestellt, die nach Anwendung eines Hochpassfilters auf das Primärprofil bestimmt werden können.

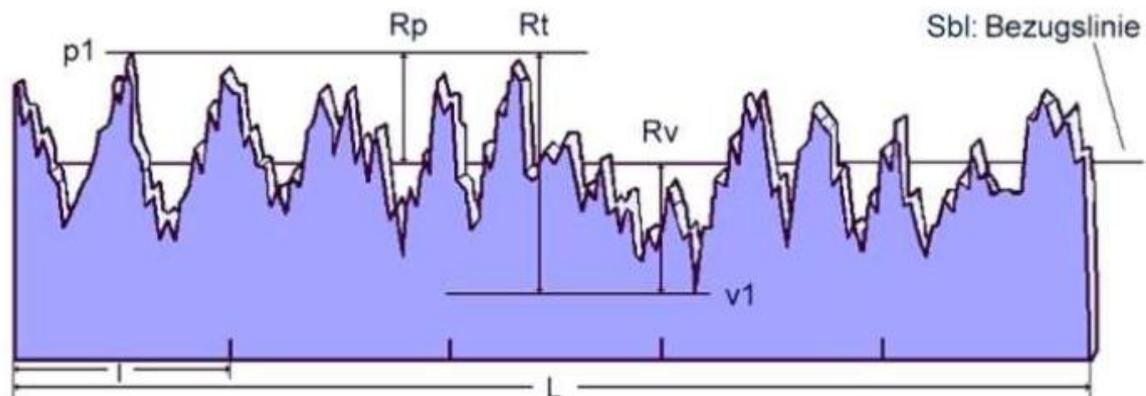


Abbildung 22: Graphische Darstellung der Rauheitsparameter [1]

- Rp - Die Maximalrauheit
- Rv - Die Minimalrauheit
- Rt - Die Gesamthöhe des Profils (=Rp+RV)

Rp, die so genannte Maximalrauigkeit ist die Höhe der größten Profilspitze im Rauigkeitsprofil, während Rv, die so genannte Minimalrauigkeit, die Tiefe des tiefsten Profiltales über die gesamte Messstrecke L angibt. Ein weiterer Rauheitsparameter von großer Bedeutung ist die so genannte Durchschnittliche Rauheit Ra. Die Durchschnittliche Rauheit ist die Höhe zwischen den Rauheitsprofil und seiner Zentrallinie [1].

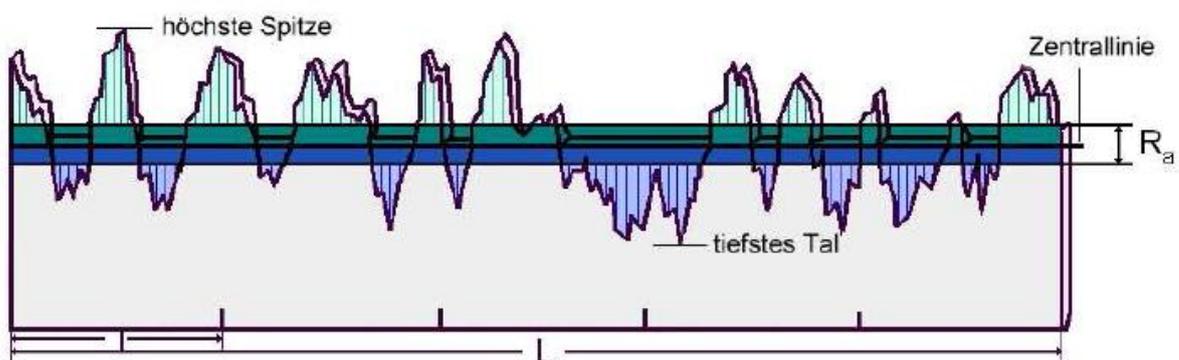


Abbildung 23: Graphische Darstellung der Durchschnittlichen Rauheit Ra [1]

Wie aus obiger Abbildung ersichtlich, werden durch die höchste Profilspitze und durch das tiefste Tal der untersuchten Länge L des Rauigkeitsprofils parallele Linien gezogen, sowie eine Zentrallinie die parallel zwischen den beiden vorhin erstellten Linien liegt. Die Fläche zwischen Profilkurve und Zentrallinie wird oberhalb dieser in grün und schraffiert dargestellt, und unterhalb dieser in blau schraffiert. Der grüne und blaue Flächeninhalt werden anschliessend als Rechteck mit einer Seitenlänge L und der anderen sich aus dem jeweiligen Flächeninhalt ergebenden Seitenlänge g ( für grün) und b (für blau) aufgetragen. Der Abstand zwischen den Flächenkanten ergibt dann die Durchschnittliche Rauheit  $R_a = g + b$  [1]

## 3.2 Aufnahmen mit FRT Laser

Der FRT Laser ist ein Messgerät zur präzisen optischen Topographiemessung an Oberflächen. Der Laser arbeitet als optisches Profilometer (2D) und als bildgebendes Messgerät (3D) mit einem direkt abbildenden Flächensensor. Rauheiten und Welligkeiten können zwei- wie dreidimensional entsprechend den DIN/EN/ISO-Vorschriften bestimmt werden. Das Gerät ist voll automatisierbar. Der FRT Laser ermöglicht Messungen bis zu  $600 \times 600 \text{ mm}^2$  an Proben bis 5 kg. Die Probenhöhe muss 50 mm nicht überschreiten. Die Ergebnisse werden mittels eines Programm Mark III ausgewertet. Mark III ist das universelle Analyseprogramm für 2D- und 3D Oberflächendaten. Das Programm ermöglicht die Auswertung der Rauheit und Welligkeit der Probekörpern [13].

### 3.2.1 Mechanischer Aufbau

Der FRT Laser besteht aus einer Grundplatte aus schwarzem Granit. Diese Platte sichert die stabile Basis des Gerätes. Auf der Grundplatte ist xy-Tisch angebracht. Spezielle Probenhalter werden auf dem XY Tisch mittels Schrauben befestigt. Auf der x-Achse kann sich der Tisch nach links und rechts bewegen. Die y-Achse sichert eine vorne/hinten Bewegung. XY-Tisch soll nicht von Hand bewegt werden. Er wird über Computer gesteuert. Auf der Granitplatte ist eine Sensorhalterung angeschraubt, an der der Sensorkopf befestigt ist und über ein Glasfaserkabel mit der Sensorelektronik verbunden ist [13].



Abbildung 24: FRT MicroProf 300 mit XY Kreuztisch

### 3.2.2 Messprinzip

Der FRT Laser benutzt das Prinzip der chromatischen Abstandmessungen ausnutzt. Die Probe wird mit einem fokussiertem Weißlicht mittels einer Optik beleuchtet. Das Licht wird durch einen chromatischen Messkopf auf die Oberfläche der Probe fokussiert. Wenn das Licht auf die Oberfläche der Probe trifft, wird dieses Licht reflektiert. Die Wellenlänge des reflektierten Lichtes ergibt sich durch ein Spektrometer. Das Spektrum des reflektierten Lichtes zeigt einen ausgeprägten Peak, aus dessen spektraler Position der Abstand bestimmt wird. Messprinzip wird auf der Abbildung 25 dargestellt. Durch dieses Prinzip arbeitet das Messgerät problemlos auf praktisch allen Oberflächen, von hoch reflektierenden bis zu stark absorbierenden Materialien [13].

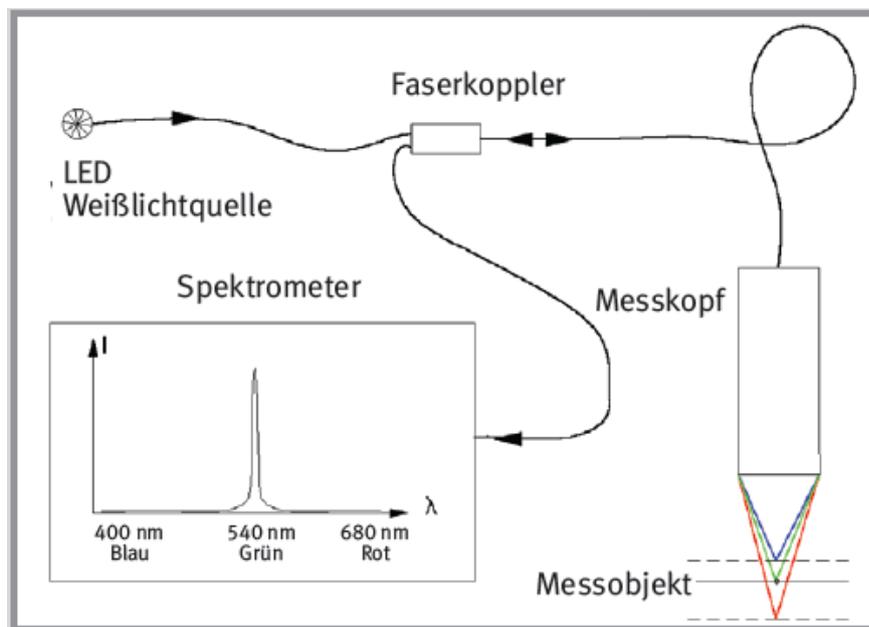


Abbildung 25: Chromatisches Messprinzip

Der FRT Laser arbeitet mit einem konfokalen Punktsensor. Der Vorteil dieses Sensors liegt in seiner sehr hohen Ortsauflösung und der hohen Messgeschwindigkeit. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Sensor hat folgende technische Daten:

- Messbereich in z-Achse: 6mm
- Messabstand von der Probe: 35mm
- Messrate: 1000 Hz
- Maximale Auflösung in z-Richtung: 60 nm
- Maximale Auflösung in x-, y- Richtung: 8  $\mu\text{m}$
- Zulässiger Messwinkel:  $90 \pm 25$
- Lichtquelle: LED [13]

### 3.3 Aufnahmen mit MicroCAD Laser

Das optische 3D-Messsystem ist ein Oberflächensystem, mit dem sowohl 2D als auch 3D-Messungen an verschiedenen Oberflächen aufgenommen werden können. Die Vorteile des optischen 3D-Messsystems sind die hohe Messgeschwindigkeit und die hohe Messgenauigkeit [12].

#### 3.3.1 Mechanischer Aufbau

Der MicroCAD Laser besteht aus einem kompakten 3D-Sensor, einer hochauflösenden CCD-Kamera, einer Aufnahmeoptik und einem Auswertrechner. Der 3D-Sensor ist basierend auf der Verwendung eines DMD-Projektors. Als Lichtquelle wird eine Kaltlichtquelle verwendet. Der optische 3D-Sensor ist an einem Stativ oder einer Traverse angebracht und mit einer manuellen Höhenverstellung für die Einstellung des Arbeitsabstandes zum Messobjekt zu versehen. Das Messsystem kann mit einem mechanisch oder elektromechanisch verfahrbaren Kreuztisch zum Einsatz kommen, der das Aufnehmen des Messobjektes unter dem 3D-Sensor und somit dessen Messung an verschiedenen Positionen ermöglicht [12].

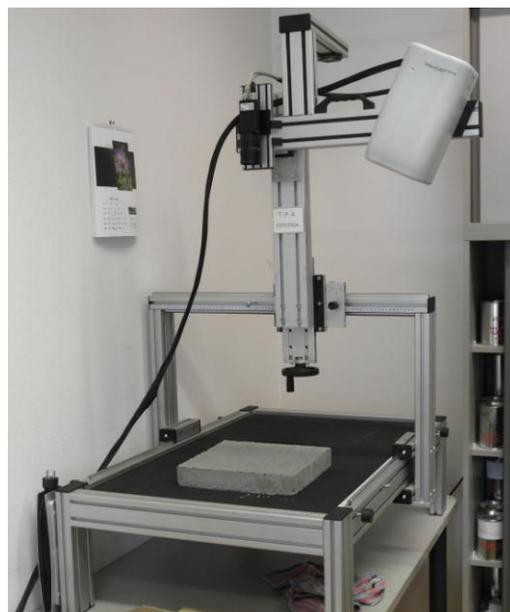


Abbildung 26: Messsystemkonfiguration von dem MikroCAD Laser

#### 3.3.2 Messprinzip

Als optische Messmethode kommt die digitale Streifenprojektion mit Mikrospiegelprojektoren zur Anwendung. Dabei werden Streifen mit einer sinusartigen Helligkeitsintensität unter einem definierten Triangulationswinkel auf die Oberfläche des Messobjektes projiziert und deren Abbildung mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Das Höhenbild des Messobjektes wird aus der Lage der Streifen und dem Grauwert der einzelnen Bildpunkte errechnet. Der funktionale Aufbau des optischen 3D-Sensors ist in der Abbildung 27 gezeigt [12].

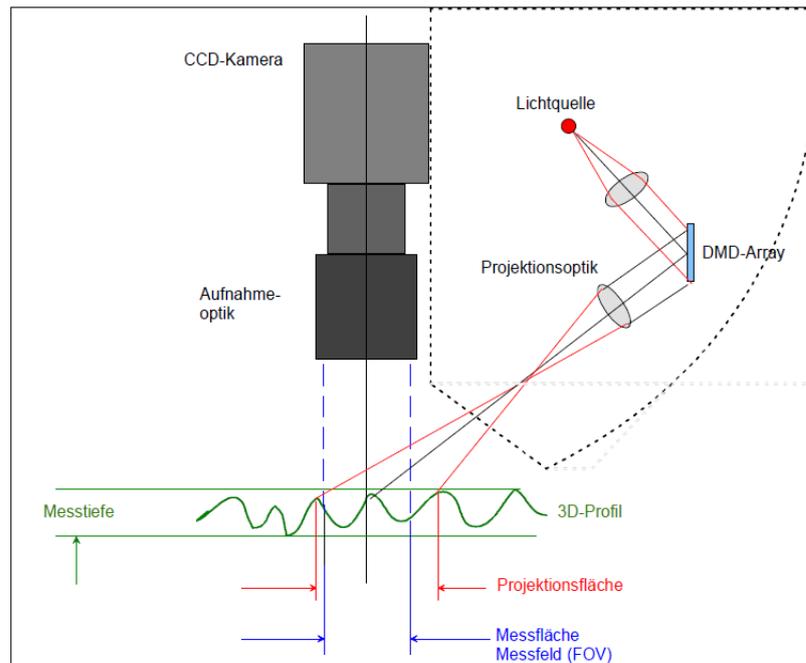


Abbildung 27: Prinzipdarstellung des optischen 3D-Sensors

In dem Sensor sind sowohl Projektions- und Aufnahmeoptik als auch die Aufnahmekamera und der DMD-Projektor sowie die Elektroplatinen für dessen Ansteuerung integriert [12].

### 3.4 Statistische Methode für Auswertung der Messergebnisse- 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 statistisches 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“. 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 [2]. Der maßgebende Kennwert des t-Tests ist die Differenz der Mittelwerte:

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

Gl. 2

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

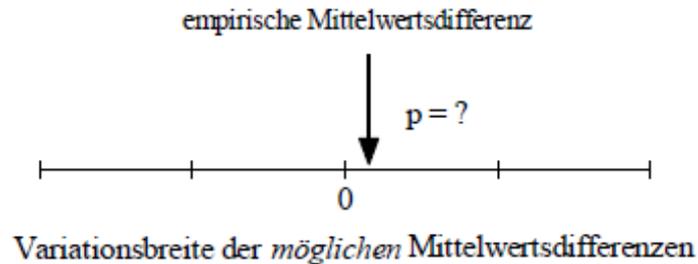


Abbildung 28: Fragestellung des t-Tests [2]

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 28). Daraus stammt der Name dieser Hypothese (Nullhypothese  $H_0$ ). Nach dieser Hypothese ist die Variation der Stichprobenmittelwerte auf Zufall oder auf einem Stichprobenfehler zurückzuführen [2], [3].

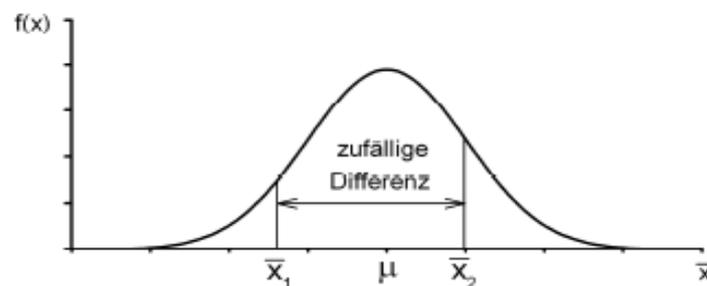


Abbildung 29: Stichprobenkennwertverteilung von Mittelwerten mit zwei zufällig entstandenen Stichprobenmittelwerten, sowie dem gemeinsamen Populationsmittelwert  $\mu$  [2]

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. 3 allgemein definiert werden:

$$t_{df} = \frac{\text{Mittelwertdifferenz}_{\text{empirisch}} - \text{Mittelwertdifferenz}_{\text{theoretisch}}}{S \text{ tandardfehler}}$$

$$t_{df} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} \quad \text{Gl. 3}$$

Die theoretische Mittelwertdifferenz ist  $\mu_1 - \mu_2 = 0$  und kann bei der Berechnung weggelassen werden. Nach der Gl. 4 ist die t- Wert nur durch den Zusammenhang zwischen der Mittelwertdifferenz ( $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$ ) und der geschätzten Standardfehler ( $\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}$ ) untersucht. Die vereinfachte Formel lautet:

$$t_{df} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\hat{\sigma}_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} \quad \text{Gl. 4}$$

Der Zusammenhang zwischen der Mittelwertdifferenz und der geschätzten Standardfehler ist in der Abbildung 30 graphisch dargestellt.

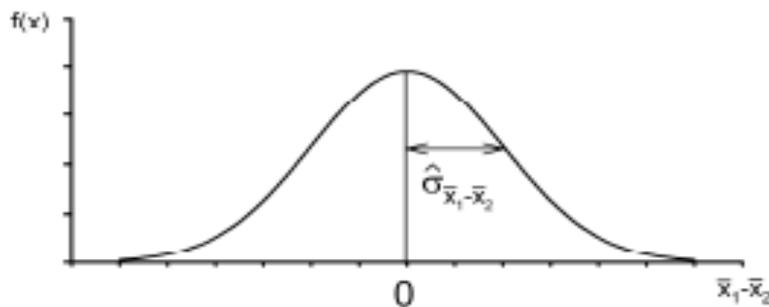


Abbildung 30: Konstruktion einer Stichprobenkennwertverteilung von Mittelwertdifferenzen unter der Nullhypothese [2]

Die Abbildung 31 stellt die Wahrscheinlichkeit eines t-Wertes in einer t-Verteilung dar.

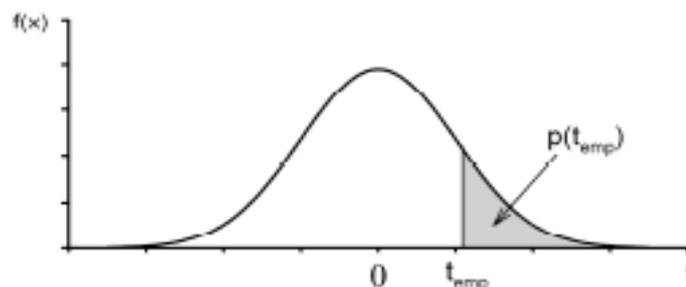


Abbildung 31: Die Wahrscheinlichkeit eines t-Wertes in einer t-Verteilung [2]

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 [3]:

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

Zu berechnen ist:

$$t_{df} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_g} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} \quad \text{mit Freiheitsgrad } f = n_1 + n_2 - 2, \quad \text{Gl. 5}$$

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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -Fehler ist [3].

## 4 Griffigkeitsprüfung mit der Prüfanlagen nach Wehner/Schulze

### 4.1 Allgemeines

In den 1960 Jahren wurde von Prof. Dr. B. Wehner und Dr. K.-H. Schulze ein Labor-Griffigkeitsmessgerät entwickelt, mit dem die mechanische Verkehrseinwirkung auf Fahrbahnoberflächen simuliert und die Veränderung der Griffigkeit gemessen werden kann. Mit dem von Wehner/Schulze entwickelten Verfahren wird der Polierwert PWS von Gesteinskörnungen durch eine zeitraffende Simulation der Verkehrseinwirkungen auf der Straßenoberfläche und eine anschließende Griffigkeitsmessung bestimmt. Mit diesem Verfahren sind auch Prüfungen zur Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Fahrbahnoberflächen möglich, sowohl an im Labor hergestellten Asphaltprobekörper als auch an aus Straßen gezogenen Bohrkernen. Die Prüfanlage nach Wehner/Schulze arbeitet vollautomatisiert. Lediglich bei der Herstellung der Probekörper hat der Laborant noch einen großen Einfluss auf die Prüfgenauigkeit. Aufgrund der Automatisierung und digitalen Aufzeichnung können Schwankungen bei der Aufbringung der Polierbeanspruchung sowie bei der Griffigkeitsmessung erfasst und ausgewertet werden. Mit dem Prüfverfahren nach Wehner/Schulze lässt sich zudem eine erheblich größere Spreizung und bessere Wiederholbarkeit erreichen. Die Bestimmung des Polierwiderstandes beziehungsweise die Messung der Griffigkeit von Straßenoberflächen erfolgt an Prüfkörpern mit einem Durchmesser von 225 mm. Die für die Ermittlung des Reibungsbeiwertes PWS herangezogene polierte Fläche beträgt ca. 82 cm<sup>2</sup>. Somit steht zur Beurteilung der Griffigkeit von Oberflächen beziehungsweise des Polierwiderstandes eine ebene Fläche zur Verfügung [6].

### 4.2 Beschreibung des Verfahrens

Das Verfahren dient zur Ermittlung des Polierwertes PWS bei Asphalt- und Betonprobekörpern, die entweder unter Laborbedingungen hergestellt, oder direkt aus der Straßenkonstruktion ausgebohrt werden. Die Maschine besteht aus einem Poliergerät und einem Prüfgerät. Die Bestimmung des Polierwertes erfolgt in zwei Schritten:

- Verkehrssimulation
- Griffigkeitsmessung

#### 4.2.1 Verkehrssimulation

Mit dem Poliergerät wird eine Verkehrsauswirkung auf die zu prüfende Oberfläche des Probekörpers im Labor simuliert. Dabei wird die polierende Wirkung durch drei unter Schlupf mit konstanter Geschwindigkeit laufende konische Gummirollen nachgeahmt, die mit einem Querprofil versehen sind. Die Polierwirkung wird durch ein Quarzmehl/Wasser-Gemisch verstärkt, das während des Versuches kontinuierlich auf die Prüfoberfläche gefördert wird [9].



Abbildung 32: Simulation der Verkehrsbeanspruchung [Donchev, 2007]

#### Kennzahlen des Poliervorganges:

- Mittlerer Kontaktdruck: ca. 0,40 N/mm<sup>2</sup>
- Schlupf: <1%
- Bahngeschwindigkeit: ca. 17 km/h
- Drehzahl des Rollenkopfes: 500 U/min (90.000 Überrollungen pro Stunde)
- Durchflussmenge des Wasser-Quarzmehl-Gemisches: 5.0 l/min ± 10%
- Temperatur: ≈20°C [9]

#### 4.2.2 Griffigkeitsmessung

Das Laborgriffigkeitsmessgerät arbeitet nach dem Prinzip der blockierten Schlepprades. Es ist in Abstimmung mit dem Poliergerät für Messungen auf ebenen, kreisförmigen Prüfoberflächen, mit einem Durchmesser von 225 mm, eingerichtet. Drei mit einer Umfangsgeschwindigkeit von etwa 100 km/h rotierende Messgummis werden auf der bewässerten Oberfläche des Probekörpers bis zum Stillstand abgebremst. Beim Abbremsen entstehen zwischen den drei Prüfgummis und der Prüfoberfläche horizontale Reibungskräfte ( $F_x$ ), welche ein Drehmoment ( $M_D$ ) erzeugen. Das erzeugte Drehmoment wird über die fest montierte Probeneinspannvorrichtung auf den Probentisch übertragen. Mit Hilfe des bekannten Auflastgewichtes sowie dem Abstand der Prüfgummis zum Drehmittelpunkt wird anschließend der Reibungsbeiwert rückgerechnet. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$M_D = 3 \cdot R \cdot F_x \text{ [Nm] mit} \quad \text{Gl. 6}$$

$$\mu = \frac{3 \cdot F_x}{F_z} \text{ [-] folgt} \quad \text{Gl. 7}$$

$$\mu = \frac{M_D}{R \cdot F_z} \text{ [-]} \quad \text{Gl. 8}$$

$M_D$  - Aufgezeichnetes Drehmoment mittels Referenz-Drehmomentmessscheibe

$R$  - Abstand zum Drehpunkt (0,09 m)

$F_x$  - aktivierte Horizontalkraft an einem Gleitschuh

$F_z$  - einwirkende Vertikalkraft zufolge Auflast (250 N)

## $\mu$ - Reibungsbeiwert

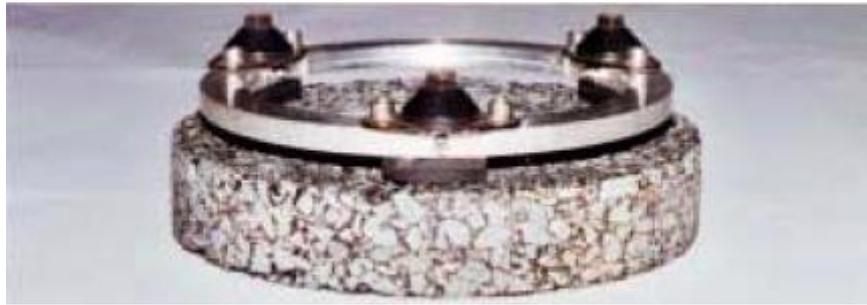


Abbildung 33: Prinzip der Griffigkeitsmessung [Donchev, 2007]

### Kennzahlen der Griffigkeitsmessung:

- Mittlerer Kontaktdruck: 20 bar
- Prüffläche: 82.0 cm<sup>2</sup>
- Prüfbahnlänge: 565 mm je Messkopfumdrehung
- Durchflussmenge: 20 l/min
- Temperatur: 12 °C ± 4 °C. [9]

### 4.3 Auswertung

Bei jeder Griffigkeitsmessung wird der Zusammenhang zwischen der abnehmenden Drehgeschwindigkeit und dem zugehörigen Gleitbeiwert mittels einer Kurve mit eigener Farbe in das Gleitbeiwert/Geschwindigkeit-Diagramm automatisch eingetragen. Außerdem ist die Messkurve im Bereich zwischen den ersten und den letzten 5 km/h durch ein Polynom 6. Ordnung angenähert, bei dem in einem Spektrum von 10 km/h bis 90 km/h der Gleitbeiwert errechnet werden kann. Der Polierwert PWS wird bei einer bestimmten Geschwindigkeit 60 km/h von dem an die Prüfmaschine angeschlossene PC als Verhältnis zwischen Reibungskraft und Aufstandskraft des Messgummis erfasst. Das Prüfergebnis ist auf zwei Dezimalstellen anzugeben [9].

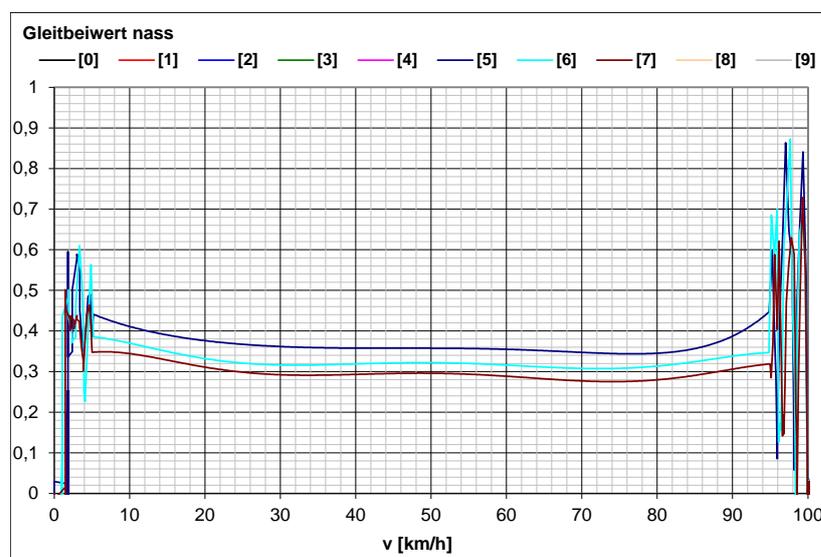


Abbildung 34: Gleitbeiwert/Geschwindigkeit-Diagramm

Vom Poliervorgang wird der Verlauf des gemessenen Drehmoments als blaue Kurve und der gemessenen Drehzahl als rote Kurve über der Überrollungszahl als Bezugsgröße in das Polier-Diagramm eingetragen [8].

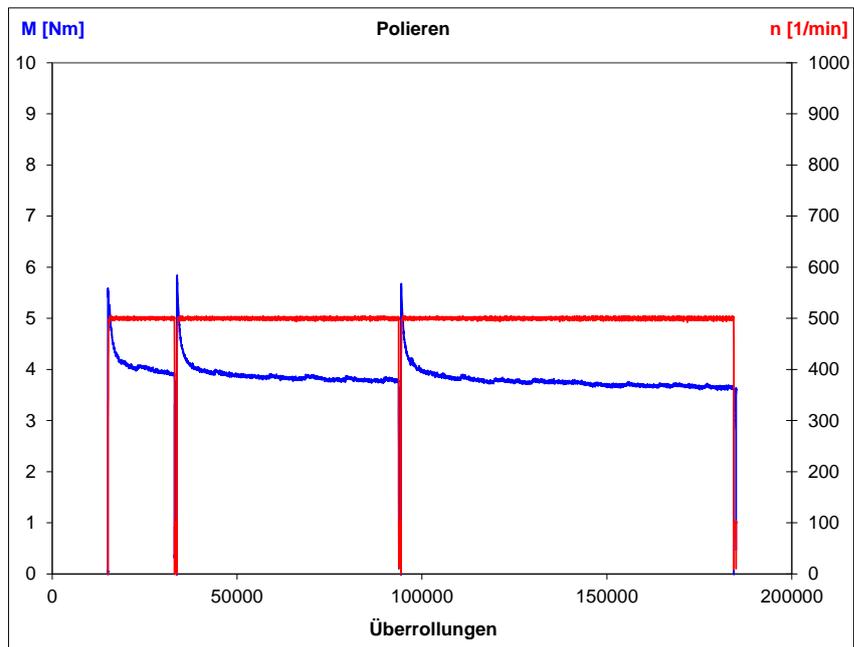


Abbildung 35: Polier-Diagramm

Von jeder Prüfung wird eine Kalibrierung durchgeführt. Dadurch kann der Einfluss der Abnutzung der Messgummis auf das Prüfergebnis festgestellt werden[8].

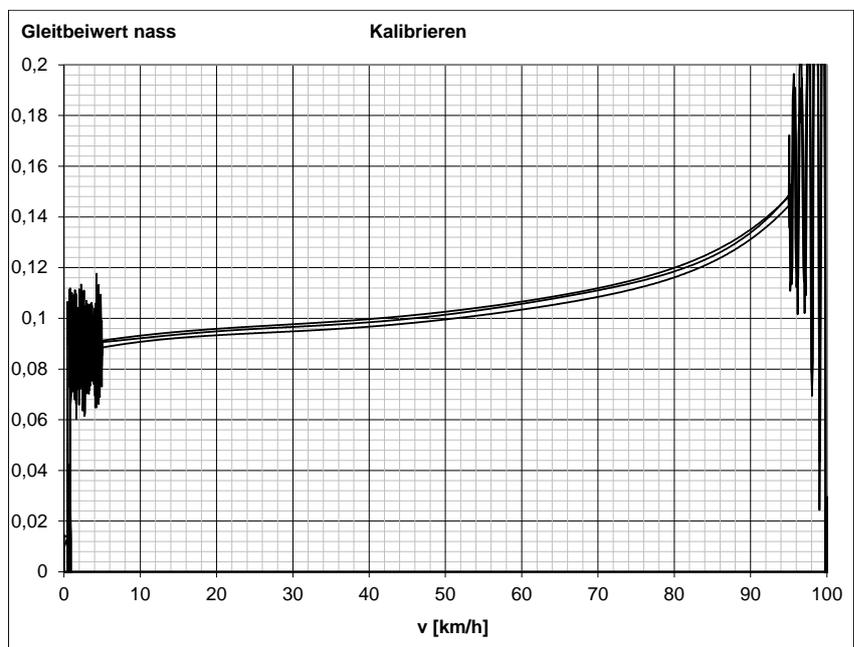


Abbildung 36: Kontroll-Diagramm

#### 4.4 Bestandteile der Prüfanlage

Die Prüfmaschine besteht im Wesentlichen aus dem Poliergerät mit den 3 Polierrollen links, dem Prüfgerät mit den Prüfgummis rechts, dem externen Quarzmehl/Wasserbehälter sowie einem Kompressor für die Druckluftzufuhr.

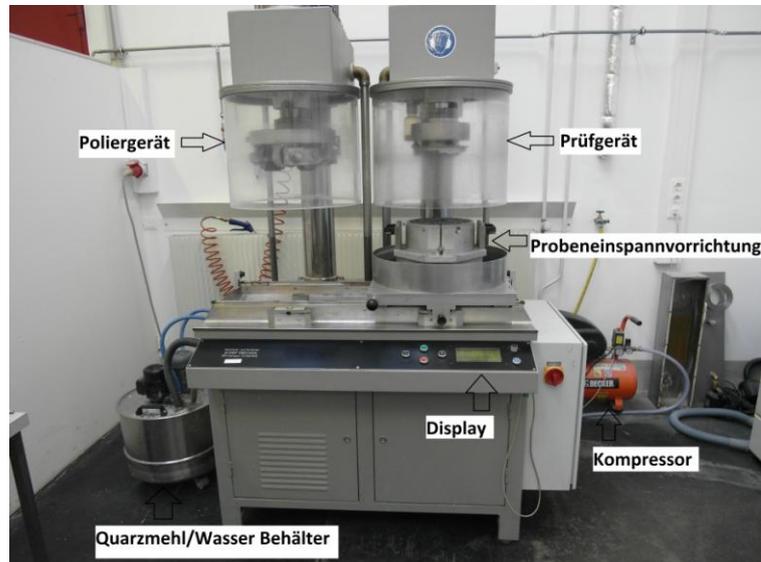


Abbildung 37: Wehner/Schulze Prüfanlage

##### 4.4.1 Poliergerät:

- Einspannvorrichtung für einen Probekörper
- Polierkopf mit drei Polierrollen
- Auflastgewicht von 392 N (40 kg)
- Mischbehälter mit Rührwerk für das Wasser/Quarzmehl – Gemisch
- Pumpe zur Aufbringung des Wasser/Quarzmehl- Gemisches auf die Prüfoberfläche, Pumpenleistung: 5,0 l/min  $\pm$  10%
- Polierrollen



Abbildung 38: Polierkopf

Das Poliergerät besteht aus einem maschinenbetriebenen Polierkopf mit drei Polierrollen, der auf die Prüfoberfläche abgesenkt werden kann. Das Auflastgewicht des Polierkopfes von 392 N entspricht einem mittleren Kontaktdruck der Polierrollen auf die Prüfkörperoberfläche von  $0,37 \text{ N/mm}^2$ . Der Spitzenkontaktdruck liegt zwischen  $0,6$  und  $0,7 \text{ N/mm}^2$  und entspricht dem mittleren Spitzenkontaktdruck von LKW-Reifen.

Die Polierrollen bestehen aus einem kreiskegelförmigen Metallträgergehäuse, auf dem eine  $8,8 \text{ mm}$  Gummischicht aufgebracht ist. In diese Gummischicht werden 8 Profilrillen von ca.  $4,5 \text{ mm}$  Tiefe und  $3,5 \text{ mm}$  Breite geschnitten. Die äußeren Maße der Polierrollen betragen:

- Durchmesser: 36 bzw. 80 mm
- Höhe 56,3 mm
- Mantellinie  $s = 60 \text{ mm}$
- Shorehärte:  $65 \pm 3$  [6]

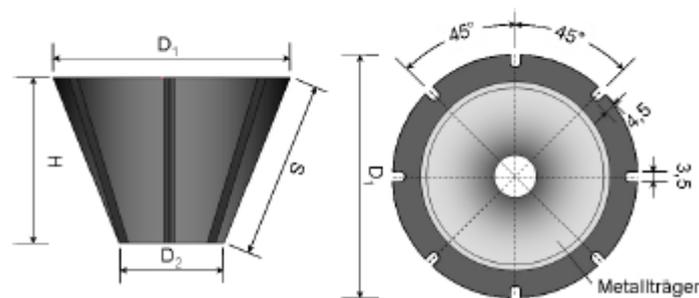


Abbildung 39: Detailansicht einer Polierrolle [Kirchmaier 2011]

Die Drehzahl des Polierkopfes beträgt  $500 \text{ U/min}$  und das entspricht einer Bahngeschwindigkeit von  $17 \text{ km/h}$ . Somit beträgt die Dauer eines Poliervorganges von  $90.000$  Überrollungen genau eine Stunde. Die Polierbeanspruchung der Probenoberfläche verläuft kontinuierlich einerseits durch Zugabe eines Wasser/Quarzmehl-Gemisches, andererseits durch einen festgelegten Schlupf der Polierrollen. Der Schlupf wird während der Poliersimulation durch die Lagerreibung hervorgerufen und liegt zwischen  $0,5$  und  $1,0 \%$ .

Als Poliermittel wird ein Quarzmehl verwendet. Die wichtigsten Kenngrößen des Quarzmehls sind:

- Obere Korngröße:  $120 \mu\text{m}$
- Mittlere Korngröße:  $45 \mu\text{m}$
- Mohs Härte: 7
- pH-Wert: 7
- $\text{SiO}_2$ -Anteil:  $99 \text{ M-\%}$  [6]

Das Verhältnis von Quarzmehl zu Wasser ist  $2,4:40$  festgelegt. Auf  $1 \text{ l}$  Wasser sind  $60 \text{ g}$  Quarzmehl zugegeben. Während der Poliersimulation soll die Temperatur des Wasser/Quarzmehl-Gemisches  $20 \pm 2^\circ \text{ C}$  betragen. Eine konstante Zufuhr des Wasser/Quarzmehl-Gemisches von  $5 \text{ l / min.} \pm 10\%$  wird durch eine Pumpe gewährleistet. Nach der Poliersimulation werden die Prüfkörper mittels einer Spülvorrichtung gereinigt. Eine Reinigung ist notwendig, um die Proben von Quarzmehlrückständen zu befreien. Der

Spüllvorgang mit Wasser dauert 120 S mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit des Polierkopfes von 100 U/min. Die Polierrollen drücken die Probenoberfläche mit einem unveränderten Kontaktdruck. Die zusätzliche Überrollungen werden für die Gesamtüberrollungen mitgerechnet.

Die Polierrollen sind nach jedem Poliervorgang auf starken Abrieb zu überprüfen. Die Rollen sind auszutauschen, wenn sie beschädigt sind, wenn sie sich klebrig anfühlen, wenn ein starker Gummiabrieb zu erkennen ist oder wenn sich auf der Prüfoberfläche dunkle Abriebspuren bilden.



Abbildung 40: Getauschte Rollengimms

#### 4.4.2 Prüfgerät

- Einspannvorrichtung zur planparallelen Ausrichtung der Prüfoberfläche
- Messkopf mit der Prüfgummi
- Antrieb für den Messkopf
- Wasseranschluss mit regelbarer Wassermenge
- Drehmomentmesssystemen
- Messwernerfassung und Datenverarbeitung
- Gleitschuhe



Abbildung 41: Messkopf

Das Prüfgerät ist für Messungen auf kreisförmigen Prüfoberflächen eingerichtet, die einen Durchmesser von 225 mm aufweisen. Das Laborgriffigkeitsmessgerät besteht aus einem maschinenbetriebenen Messkopf, der mit der Prüfgummis (Gleitschuhe) ausgestattet ist. Die Griffigkeitsmessgummis bestehen aus einem kreisringssegmentförmigen Metallträger mit Einspannvorrichtung, auf dem eine 5 mm starke Gummischicht aufgebracht ist. Die äußeren Maße eines Gleitschuhes betragen:

- Breite: 14,5 mm
- Dicke( inkl. Träger): 10 mm
- Mittlere Länge: 30 mm
- Shorehärte:  $65 \pm 3$  [6]

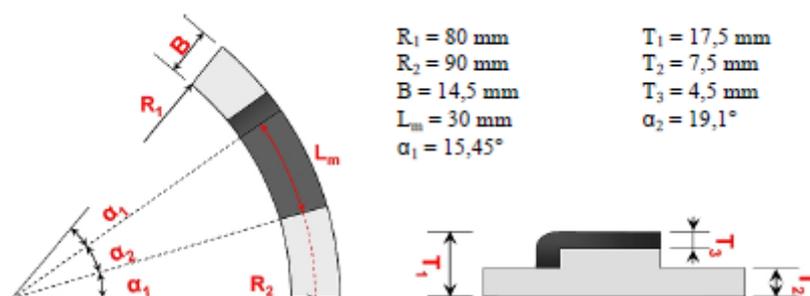


Abbildung 42: Detailansicht eines Prüfgummis [Kirchmaier 2011]

Der mittlere Kontaktdruck der Prüfgummis auf die Probenoberfläche beträgt ca.  $0,2 \text{ N/mm}^2$  vergleichbar mit dem mittleren Reifeninnendruck von 2 bar bei PKW-Reifen. Das entspricht einer Auflast von ca. 250 N. Bei der auf der Prüfstation durchgeführten Griffigkeitsmessung handelt es sich um einen dynamischen Prozess. Der Kontaktdruck ist beim ersten Auftreffen der Prüfgummis auf der Probenoberfläche höher und variiert solange bis die Prüfgummis gleichmäßig über die Prüfoberfläche gleiten. Die Abbildung 43 zeigt die Position der Prüfgummis auf der zu prüfenden Oberfläche.

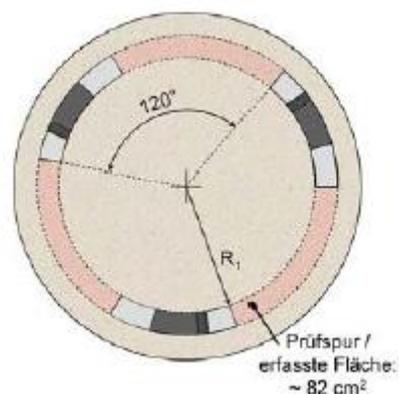


Abbildung 43: Anordnung der Prüfgummis auf der Prüfoberfläche [Kirchmaier und Blab, 2010b]

Die Zufuhr rate des Prüfwassers während des Abbremsvorganges beträgt 20 Liter pro Minute, wobei eine Prüfwassertemperatur von  $10 \pm 2^\circ \text{C}$  einzuhalten ist. Die Kühlung des Prüfwassers erfolgt mit einem integrierten Kühlgerät.

Nach jeder Messung sind die Messgummis auf mögliche Beschädigungen zu prüfen. Ist die Oberfläche der Messgummis verschlissen oder sind Verformungen (Luftblasen, Schwanzbildung infolge Reibungswärme) erkennbar, so sind die Gleitschuhe auszutauschen. Der Gleitschuhsatz ist auch zu erneuern, wenn die Stärke der Messgummischicht nur noch 2 mm beträgt. Es muss immer der gesamte Satz an Messgummis ausgetauscht werden, der Ersatz einzelner Gleitschuhe ist nicht zulässig. Der Verschleiß der Gleitschuhe ist von der Art der Prüfoberfläche (Asphalt, Beton) abhängig. Es ist deshalb für jede Art von Prüfoberfläche jeweils ein gesonderter Satz Gleitschuhe zu verwenden. Auf dem nächsten Bild sind Prüfgummis gezeigt, deren Oberfläche stark verschlissen ist [6].



Abbildung 44: Getauschte Prüfgummis

Zusätzlich zu dem Verschleiß können bei den Prüfgummis auch Blasen entstehen. Wird, die während des Abbremsvorganges entstehende Hitze nicht ausreichend schnell abgeführt, so verbrennen die Prüfgummis und entstehen Blasen unter der Oberfläche [6].

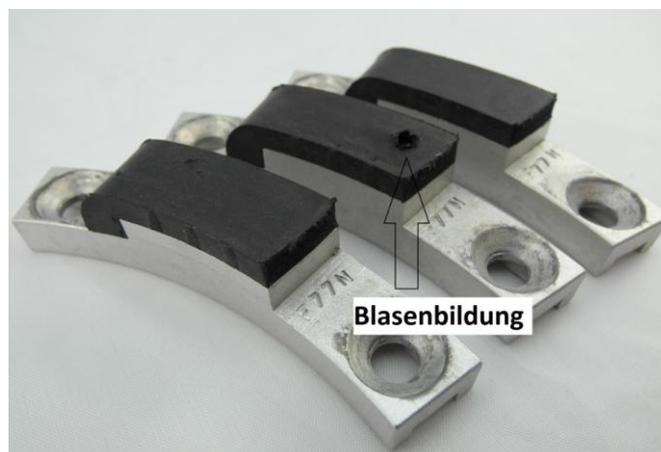


Abbildung 45: Prüfgummis mit Blasenbildung

## 4.5 Polierprüfung mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Vor und nach jedem Versuchablauf ist eine Verbindung zwischen der Wehner/Schulze Maschine und dem dazu angeschlossenen PC-Rechner herzustellen bzw. zu trennen. Die Reihenfolge der einzelnen Schritte für den Prüfungsablauf sind:

- Probeplatte einbauen
- Kalibrieren
- Polieren
- Spülen
- Prüfen
- Kalibrieren
- Probe ausbauen

### 4.5.1 Kalibrieren

Die präzise Bestimmung des Reibbeiwertes hängt von vielen Faktoren (Prüfwassertemperatur, Abnutzung der Prüfgummis, Auflast) ab, die vor jeder Messreihe kontrolliert werden müssen. Die vorhandenen Prüfgummis werden mit der Kalibrierplatte, die aus einer Glasoberfläche besteht, auf Funktionstüchtigkeit überprüft.

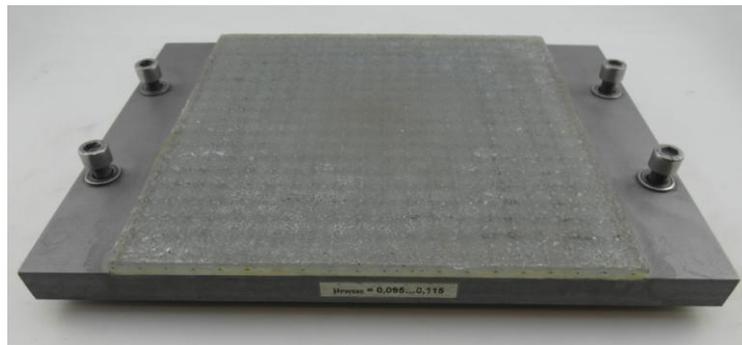


Abbildung 46: Kalibrierplatte

Diese Kontrollplatte besteht aus Drahtornamentglas mit Handelbezeichnung 521-7 mm, welches auf Aluminiumplatte aufgeklebt ist. Aufgrund des Herstellungsprozesses des Ornamentglases und der gleichbleibenden Oberflächenstruktur wiesen die Glaskontrolloberflächen ein sehr ähnliches und vor allem konstantes Griffigkeitsniveau auf. Die Oberflächentextur der Kontrollplatte hat Rautiefe bis 1,0 mm. Der Reibwert von neuen Prüfgummisätzen weist auf der Glasplatte einen Wert von 0,095 bis 0,115 auf. Der Kalibriervorgang findet auf der Prüfstation statt. Der Kalibrierablauf ist somit, bis auf das Einbauen der Kontrollplatte, mit dem Prüfablauf einheitlich [6].

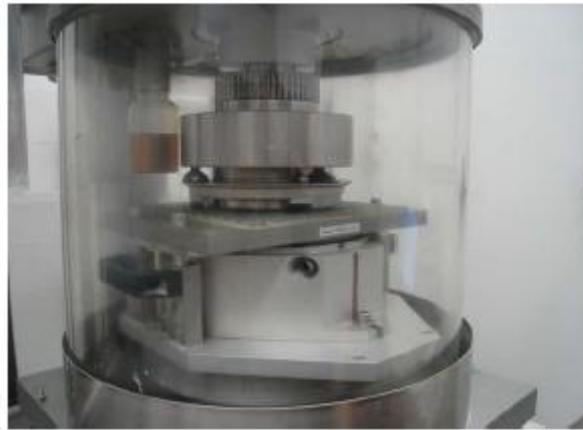


Abbildung 47: Kalibrierung der verwendeten Prüfummis

#### 4.5.2 Probeplatte einbauen

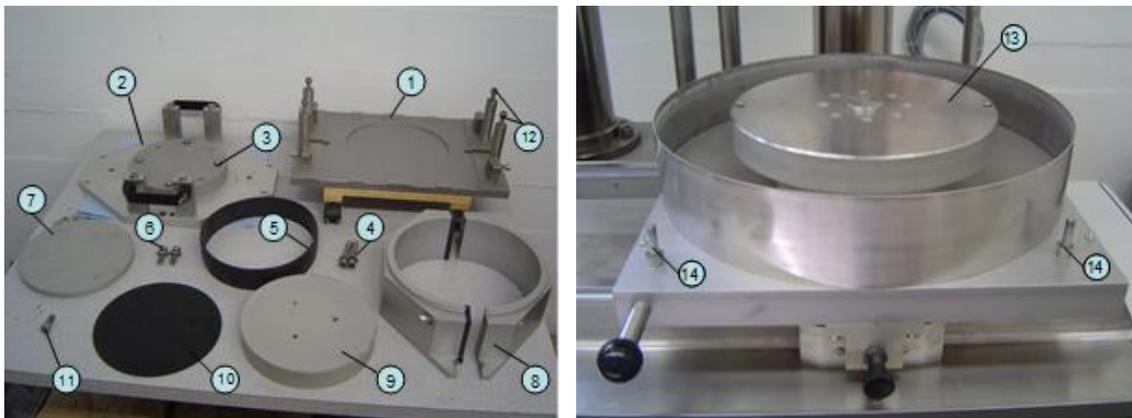


Abbildung 48: Bestandteile der Probenform

- 1) Hilfsvorrichtung zum Probeneinbau mit Holzwagen
- 2) Grundplatte
- 3) 4 Gewindestifte M16x35 zum horizontalen Justieren
- 4) 2 Zylinderschrauben M10x65 mit Beilagscheibe  $\varnothing$  20 und 2 mm dick
- 5) Schaumstoffring
- 6) 2 Zylinderschrauben M10x25 mit Beilagscheibe  $\varnothing$  25 und 4 mm dick
- 7) Zwischenplatte
- 8) 2 Halbschalen
- 9) Holzplattenträgerkörper (wird für Asphaltprobekörper nicht benötigt)
- 10) Gummimatte
- 11) Stellschraube M10x25
- 12) 4 Zylinderschrauben M10x35 mit Beilagscheibe  $\varnothing$  20 und 2 mm dick
- 13) Probentisch
- 14) 2 Zylinderschrauben M10x30 mit Beilagscheibe  $\varnothing$  20 und 2 mm dick [8]

### 4.5.3 Polieren

Der Poliervorgang findet auf der Polierstation statt. Der Prüfkörper wird horizontal in der Einspannvorrichtung befestigt. Bei dem Poliervorgang wird die Oberfläche des Probekörpers bei einer Drehgeschwindigkeit von  $500 \pm 1$  U/min unter konstanter Zugabe eines Quarzmehl/Wasser- Gemisches bei einem vertikalen Kontaktdruck von  $0,4 \text{ N/mm}^2$  poliert. Die Temperatur des Quarzmehl/Wasser- Gemisches soll  $20^\circ \text{ C}$  betragen und ist während des Versuches konstant zu kontrollieren. Für die Griffigkeitsprognose an Fahrbahnoberflächen wird die unbeanspruchte Oberfläche mit 500, 1.500, 3.000, 6.000, 12.000, 30.000, 60.000, 90.000 und 180.000 Überrollungen poliert. Nach jeder Beanspruchungsstufe wird eine Griffigkeitsmessung durchgeführt [9].



Abbildung 49: Poliervorgang unter konstanter Zugabe von Quarzmehl/Wasser- Gemisches

### 4.5.4 Spülen

Nach dem Polieren ist die Oberfläche des Probekörpers sowie der Rollenkopf und die Einspannvorrichtung gründlich von Poliermittel mittels der Funktionsstellung Spülen zu reinigen. Die Reinigung der Probenoberfläche erfolgt mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 100 U/min, wodurch eine zusätzliche Polierbeanspruchung der Proben von ca. 600 Überrollungen stattfindet [9].



Abbildung 50: Spülen der Probeoberfläche von Poliermittel

#### 4.5.5 Prüfen

Die Messung des Polierwertes findet auf der Prüfstation statt. Am Messbeginn wird die Prüfspindel mit den Messgummis pneumatisch angehoben und auf eine Umlaufgeschwindigkeit von 100 km/h beschleunigt. Bei Erreichen von 90 km/h schaltet sich der Prüfwasserzufluss ein. Bei Erreichen der maximalen Geschwindigkeit von 100 km/h werden die Messgummis auf die zu prüfende Oberfläche pneumatisch abgesenkt, wo sie bis zum Stillstand abgebremst werden. Die aktivierte Reibungskraft während des Abbremsvorganges wird über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bis zum Stillstand mittels dafür vorgeseher Software am PC aufgezeichnet und ausgewertet [9].



Abbildung 51: Abbremsvorgang

#### 4.5.6 Probe ausbauen

Zum Ausbau der Probe sind die beiden Befestigungsschrauben zu lösen, die Stellschraube anzuziehen, die Grundplatte vom Proben Tisch wegzuheben und der Proben Tisch sofort sorgfältig zu reinigen.

## 5 Untersuchungen zur Griffigkeit von Waschbetonplatten

### 5.1 Prüfprogramm

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonplatten nach Wehner/Schulze beurteilt. Das Griffigkeitsverhalten ist im Vergleich mit der Art des Ausbürsten zu beurteilen. Das Ausbürsten ist ein wichtiger Prozess bei der Herstellung von Waschbetonstruktur. Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden sechs Platten hergestellt, die mit einer speziellen Ausbürstvorrichtung ausgebürstet wurden. Die Funktionsweise von dieser Ausbürstvorrichtung wurde im Kapitel 2.3.5.2 erleutert. Die ersten drei Betonplatten wurden mit der Ausbürstvorrichtung nach 8 h ausgebürstet. Jede Platte wurde in die Vorrichtung gesetzt und der Stahlbesen wurde über die Platte 5 vorwärts und rückwärts geführt. Das bedeuten zehn Übergängen des Stahlbesens. Die anderen drei Platten wurden auch nach 8 Stunden mit 8 Übergänge ausgebürstet. Aus der Mitte jeder Platte wurde einer Probekörper gebohrt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden noch zwölf Bohrkerne verwendet. Die Bohrkerne wurden aus dem Autobahn A9 entnommen. Die Bohrkerne wurden aus einer neugebauten Strecke entnommen, wo die Waschbetonoberfläche noch nicht befahren wurde. Die weitere Tabelle gibt mehr Information über die Bohrkerne.

Tabelle 11: Bohrkerne A9

Bohrkernentnahme A9 bei Graz- Richtung Wien			
Bohrkerne Nr.	Abschnitt:	Position	Gewählte Bk.
Bk1	1	195+657,5	Bk2
Bk2		195+647,5	
Bk3		195+437,5	
Bk4		195+627,5	
Bk5	2	193+157,5	Bk7
Bk6		193+147,5	
Bk7		193+137,5	
Bk8		193+127,5	
Bk9	3	191+397,5	Bk11
Bk10		191+387,5	
Bk11		191+377,5	
Bk12		191+367,5	

Die Bohrkerne wurden aus drei Abschnitten gezogen. Aus jedem Abschnitt wurden vier Bohrkerne in 10 m Schnitten entnommen. Die Bohrkerne wurden im Labor mit dem MicroCAD Laser gemessen. Aus jedem Abschnitt wurde ein Bohrkern ausgewählt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch Daten aus der vorherigen Diplomarbeit zu dem gleichen Thema Griffigkeitsprognose von Waschbetonplatten verwendet. In der vorheriger Arbeit wurden neun Waschbetonplatten händisch mit einer Drahtbürste ausgebürstet. Die Funktionsweise des händischen Ausbürsten ist im Kapitel 2.3.5.1 beschrieben. Diese Diplomarbeit vergleicht, welche von den beiden Arten des Ausbürsten (händisch oder mit

der Ausbürstvorrichtung) näher zu den Bohrkernen ist. Das Ziel ist ein näheres Ergebnis im Labor zu der Baustelle zu erreichen.

Die drei gewählten Bohrkernen und die Probekörper, die maschinell im Labor ausgebürstet wurden, wurden mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze geprüft. Das gewählte Versuchsprogramm für die Polierprüfung ist für Griffigkeitsprognose von Waschbetonplatten strukturiert.

Tabelle 12: Gewähltes Programm für die Griffigkeitsuntersuchungen an den Waschbetonplatten

Beanspruchungstufen (B-Stufen)	
Griffigkeitsmessung mit dem Prüfgerät in der Poliermaschine unter konstanter Zugabe von Wasser und Quarzmehl	
Stufe Nr.	Anzahl der Überrollungen
1	500
2	1500
3	3000
4	6000
5	12000
6	30000
7	90000
8	180000

Jeder Probekörper wurde laut des oben gewählten Programm poliert und geprüft. Bei dem Poliervorgang sind Wasser und Quarzmehl als Poliermittel verwendet. Sie sind im Mischgutverhältnis 2400g Quarzmehl pro 1 Liter Wasser. Nach jedem Poliervorgang sind zusätzlich 70g Quarzmehl zu zugeben, da ein großes Teil von dem auf der Probe bleibt und weggewaschen wird.

## 5.2 Prüfergebnisse und Auswertung

### 5.2.1 Sandfleckenversuch

Die Rautiefe jedes Probekörpers wurde durch Sandfleckenversuch bestimmt. Diese Prüfung ist ausführlich im Kapitel 2.3.7 beschrieben.

Tabelle 13: Sandfleckenversuch

Sandfleckenversuch				
Ausbürsten:	Platte Nr.	D	V	Rautiefe
		mm	mm <sup>3</sup>	mm
Händisch	PI 7	183,0	25.000	0,95
	PI 8	182,0	25.000	0,96
	PI 9	185,0	25.000	0,93
Maschinell 10 Übergänge	PI 10	167,5	25.000	1,13
	PI 11	155,0	25.000	1,32
	PI 12	157,5	25.000	1,28
Maschinell 8 Übergänge	PI 13	162,5	25.000	1,21
	PI 14	172,5	25.000	1,07
	PI 15	165,0	25.000	1,17
Bohrkerne A9	BK 2	172,5	25.000	1,07
	BK 7	172,5	25.000	1,07
	BK 11	162,5	25.000	1,21

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Rautiefe der Bohrkernen und der maschinell (8 ÜR) ausgebürsteten Platten sehr ähnlich ist. Die Tabelle zeigt auch deutlich, dass die Rautiefe der händisch ausgebürsteten Platten besonders niedriger als die Rautiefe der Bohrkernen ist. Es fällt auch auf, dass die maschinell (10 ÜR) ausgebürsteten Platten die größte Rautiefe aufweisen.

### 5.2.2 Profilspitzenanzahl

Die nächste Tabelle zeigt die Anzahl der Spitzen, die mit dem MikroCAD Laser bestimmt wurden.

Tabelle 14: Anzahl der Spitzen

Ausbürsten:	Platte Nr.	Xm	Ym	Fläche	Anzahl der Spitzen	Spitzen pro 25 cm <sup>2</sup>
		Mm	Mm	cm <sup>2</sup>	-	-
Händisch	PI 7	293,9	240	705,36	<b>1444</b>	<b>51</b>
	PI 8	291,6	240	699,84	<b>1272</b>	<b>45</b>
	PI 9	294,7	240	707,28	<b>1453</b>	<b>51</b>
Maschinell 10 Übergänge	PI 10	293,1	240	703,44	<b>1515</b>	<b>54</b>
	PI 11	294,7	240	707,28	<b>1464</b>	<b>52</b>
	PI 12	296,3	240	711,12	<b>1506</b>	<b>53</b>
Maschinell 8 Übergänge	PI 13	291,6	240	699,84	<b>1346</b>	<b>48</b>
	PI 14	293,9	240	705,36	<b>1356</b>	<b>48</b>
	PI 15	290	240	696,00	<b>1394</b>	<b>50</b>
Bohrkerne A9	BK 2	127,9	120,8	154,50	<b>1242</b>	<b>39</b>
	BK 7	127,9	120,8	154,50	<b>1186</b>	<b>30</b>
	BK 11	128,7	121,2	155,98	<b>1212</b>	<b>34</b>

In der Tabelle kann man leicht sehen, dass die Anzahl der Spitzen der Bohrkernen sehr niedrig ist. Die maschinell (10 ÜR) ausgebürsteten Platten charakterisieren sich mit der größten Anzahl der Spitzen.

### 5.2.3 Ergebnisse aus der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Alle neun Probekörper (3 Bk., 3 Pl. maschinell 10 ÜR, 3 Pl. maschinell 8 ÜR) wurden mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze geprüft.

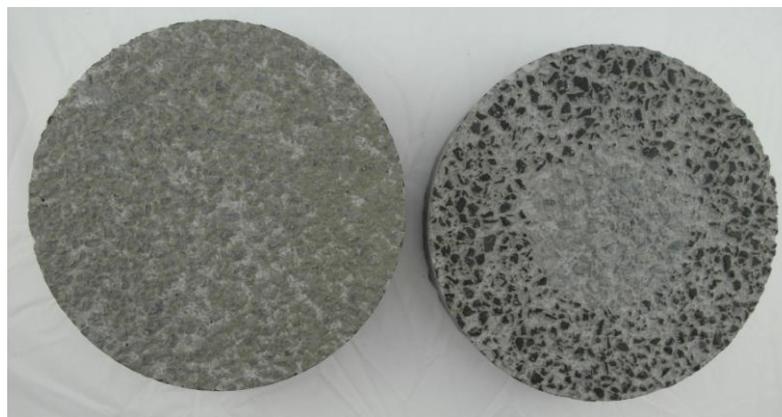


Abbildung 52: Probekörper bei 0 ÜR und bei 180 000 ÜR

Die obige Abbildung zeigt einen Probekörper in unbeanspruchtem Zustand (links) und nach 180 000 ÜR (rechts).

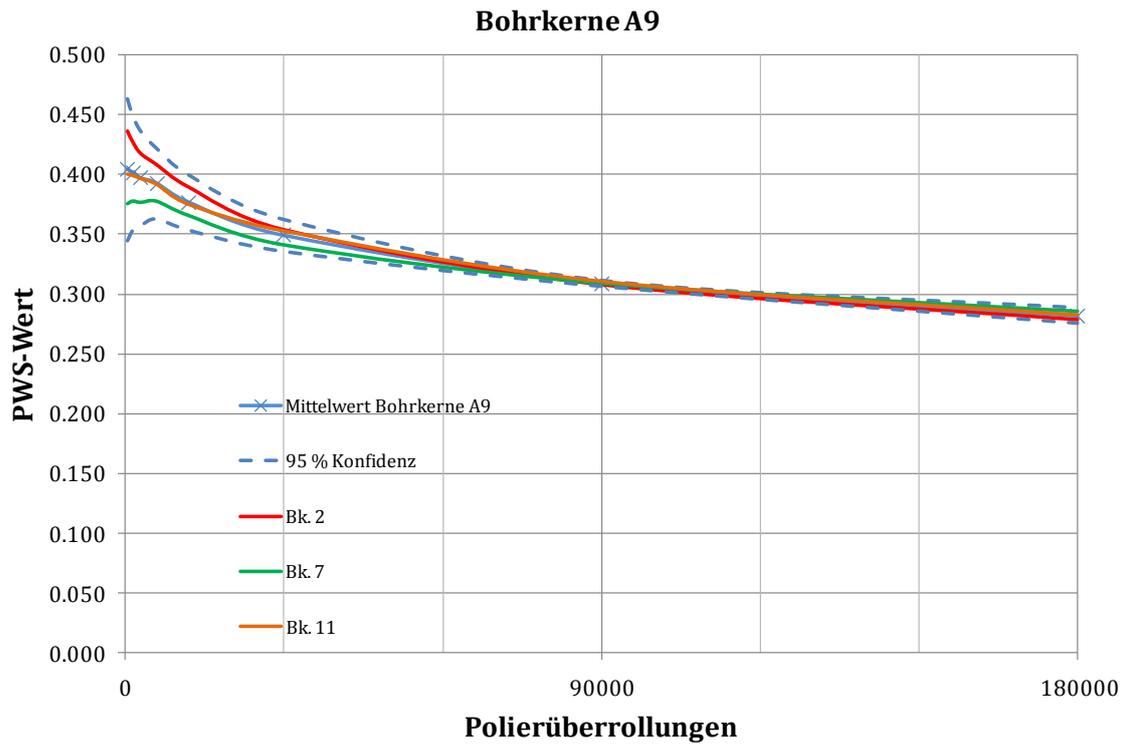


Abbildung 53: PWS-Werte Bohrkerne

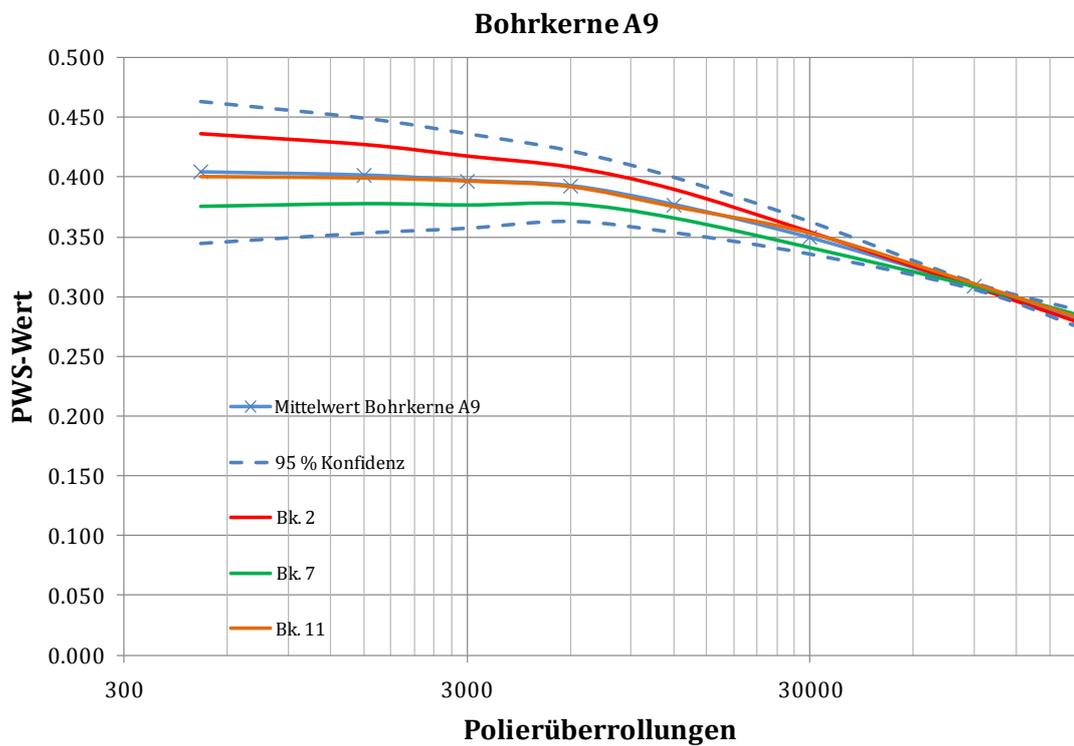


Abbildung 54: PWS-Werte Bohrkerne - logarithmisch

Die Abbildung 53 stellt sowohl PWS – Werte von den gewählten Bohrkernen, als auch den Mittelwert mit der Standardabweichungen. Die nächste Abbildung 54 stellt die gleiche Werte logarithmisch dar.

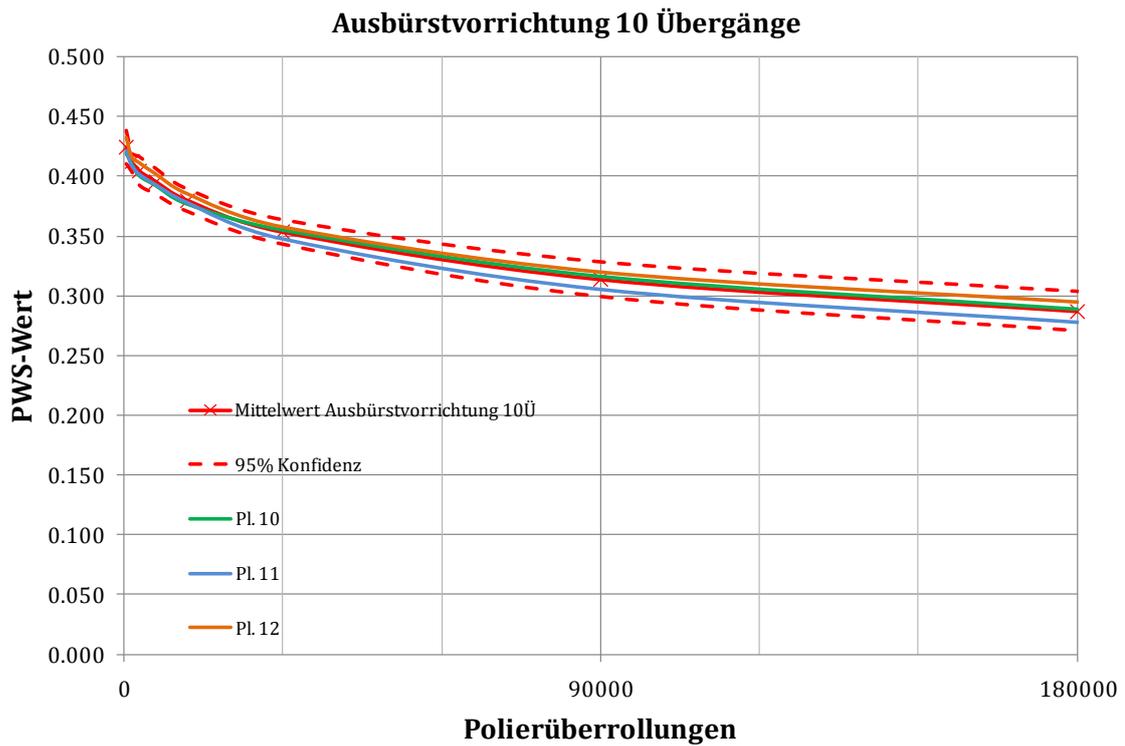


Abbildung 55: PWS-Werte Waschbetonkörper - 10 ÜR maschinell

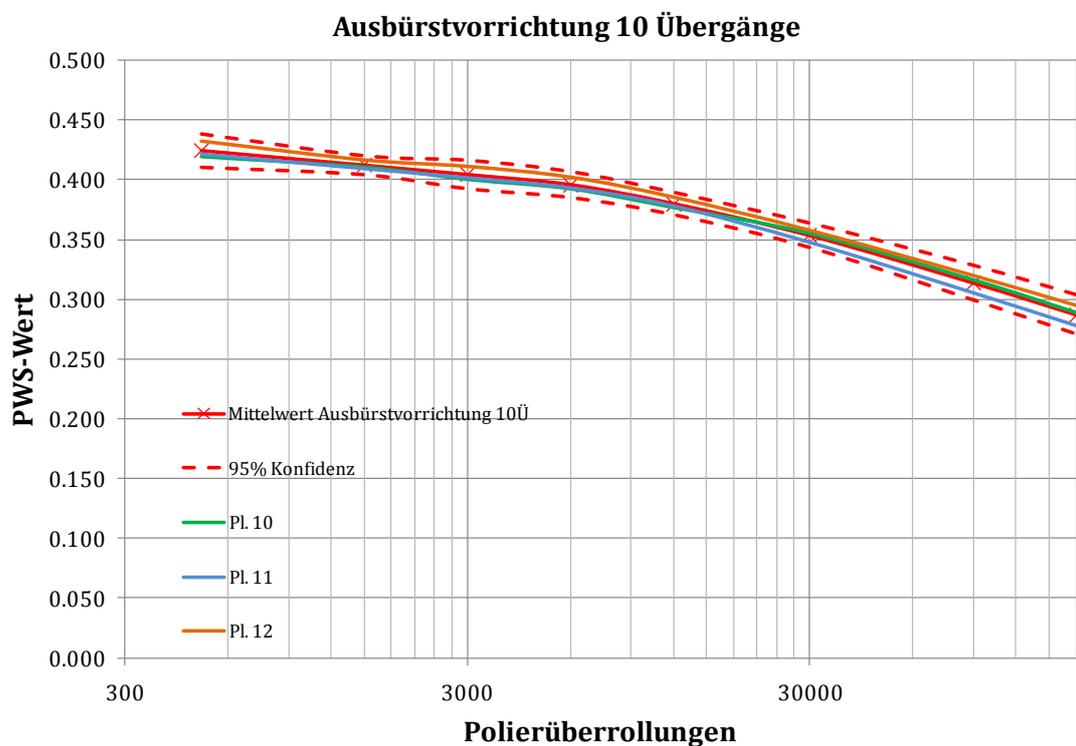


Abbildung 56: PWS-Werte Waschbetonkörper - 10 ÜR maschinell - logarithmisch

Die Abbildung 55 gibt einen Überblick über den PWS – Werte von den Probekörpern, die mit 10 Übergängen maschinell ausgebürstet wurden. Die nächste Abbildung 56 stellt die gleiche Werte logarithmisch dar.

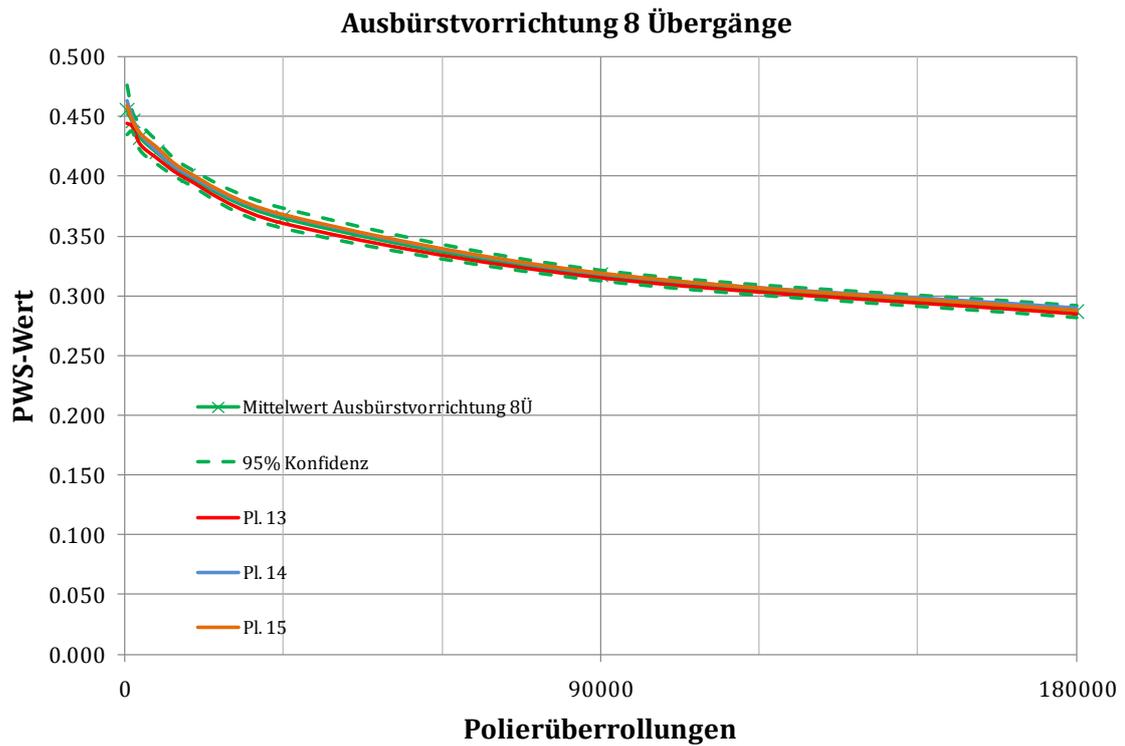


Abbildung 57: PWS-Werte Waschbetonkörper - 8 ÜR maschinell

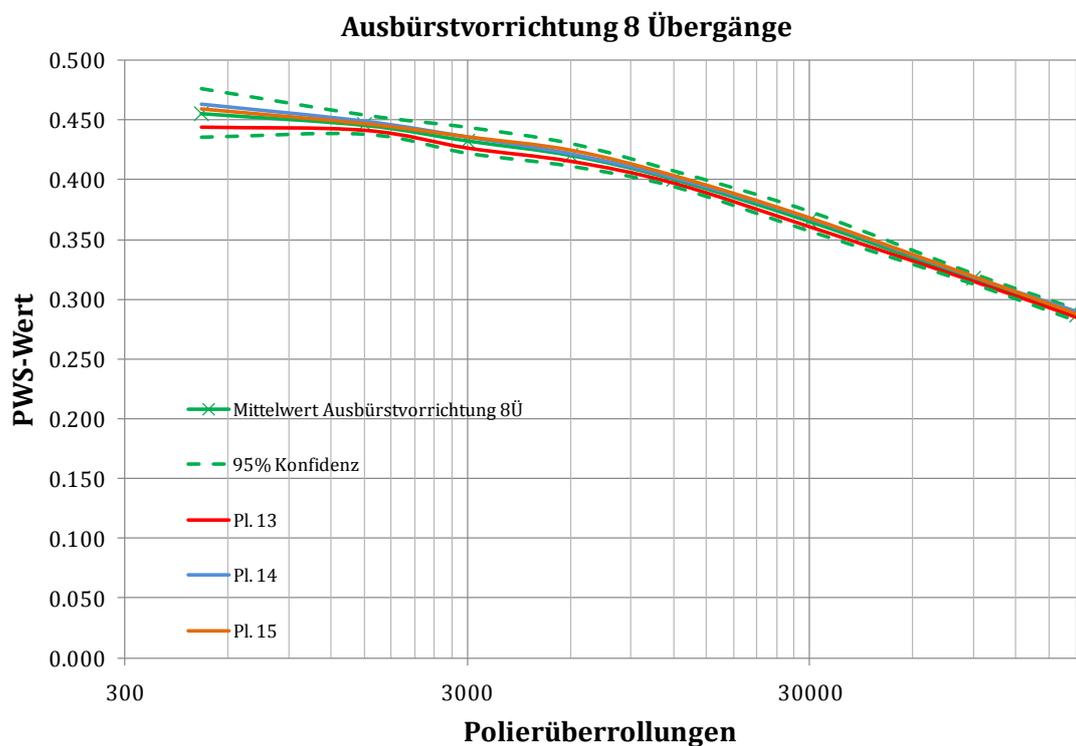


Abbildung 58: PWS-Werte Waschbetonkörper - 8 ÜR maschinell - logarithmisch

Die Abbildung 57 zeigt PWS – Wert von den Probekörpern, die mit 8 Übergängen maschinell ausgebürstet wurden Die nächste Abbildung 58 stellt die gleiche Werte logarithmisch dar.

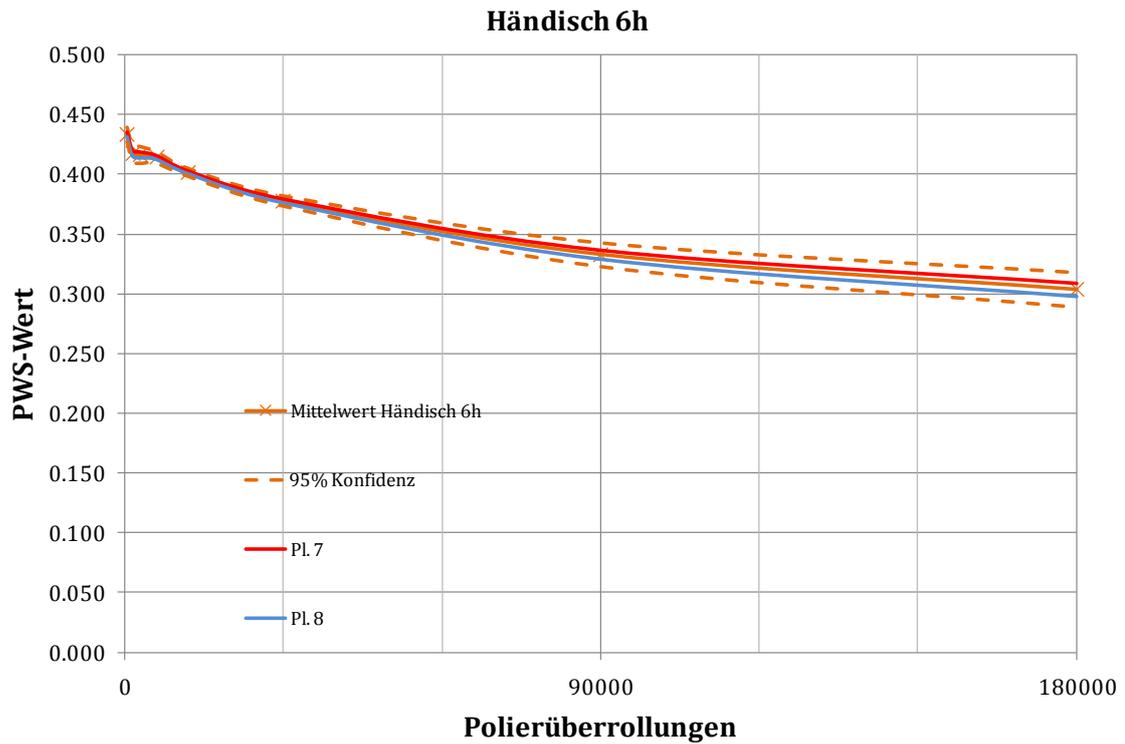


Abbildung 59: PWS-Werte Waschbetonkörper - händisch

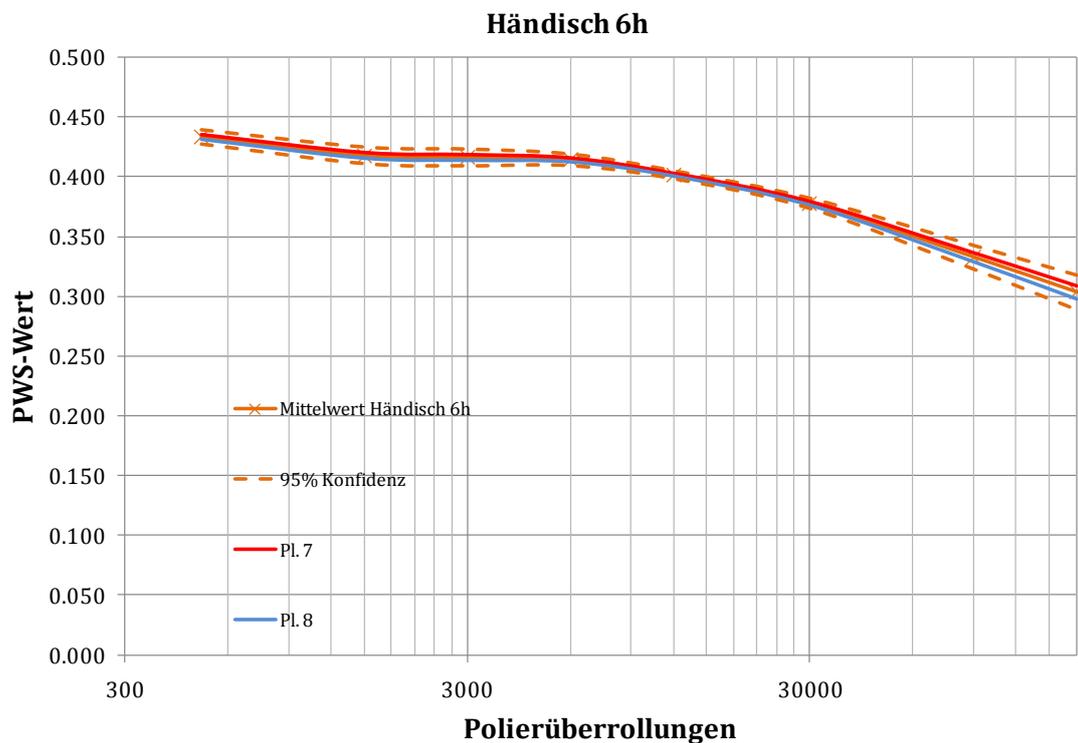


Abbildung 60: PWS-Werte Waschbetonkörper – händisch - logarithmisch

Die Abbildungen 59 und 60 zeigen den PWS – Wert von zwei Probekörpern, die händisch nach 6 h ausgebürstet wurden. Diese zwei Probekörper wurden in einer vorherigen Diplomarbeit geprüft.

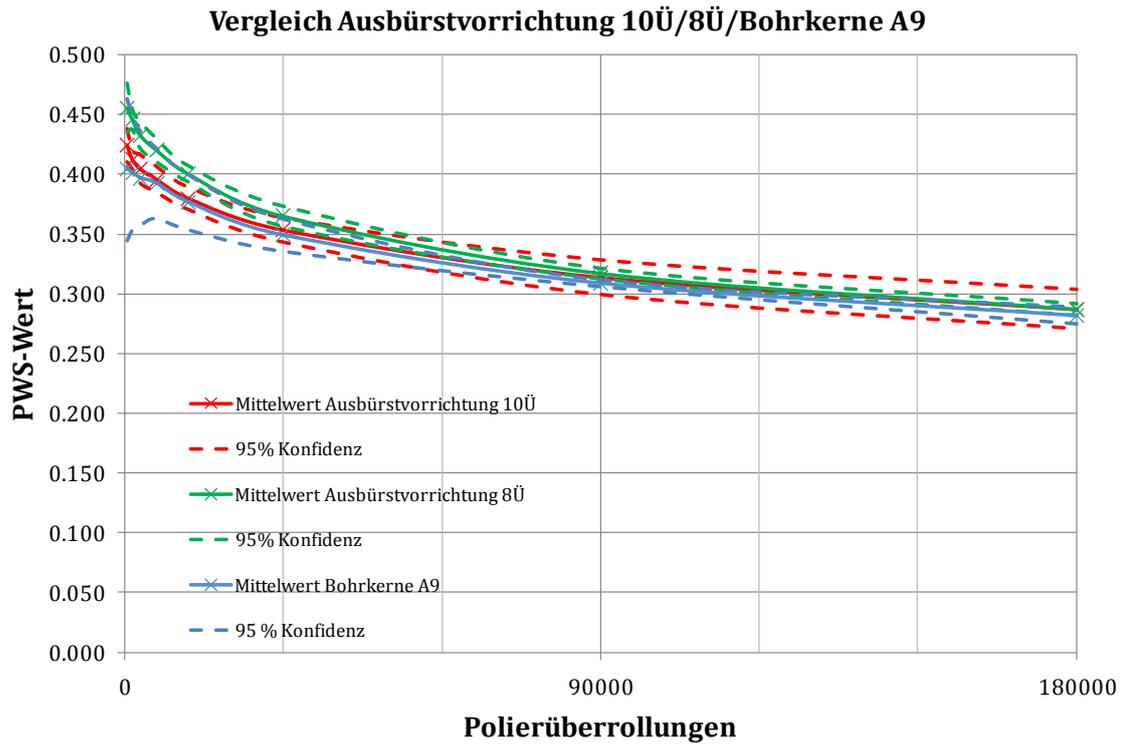


Abbildung 61: Vergleich Ausbüstvorrichtung/Bk. A9

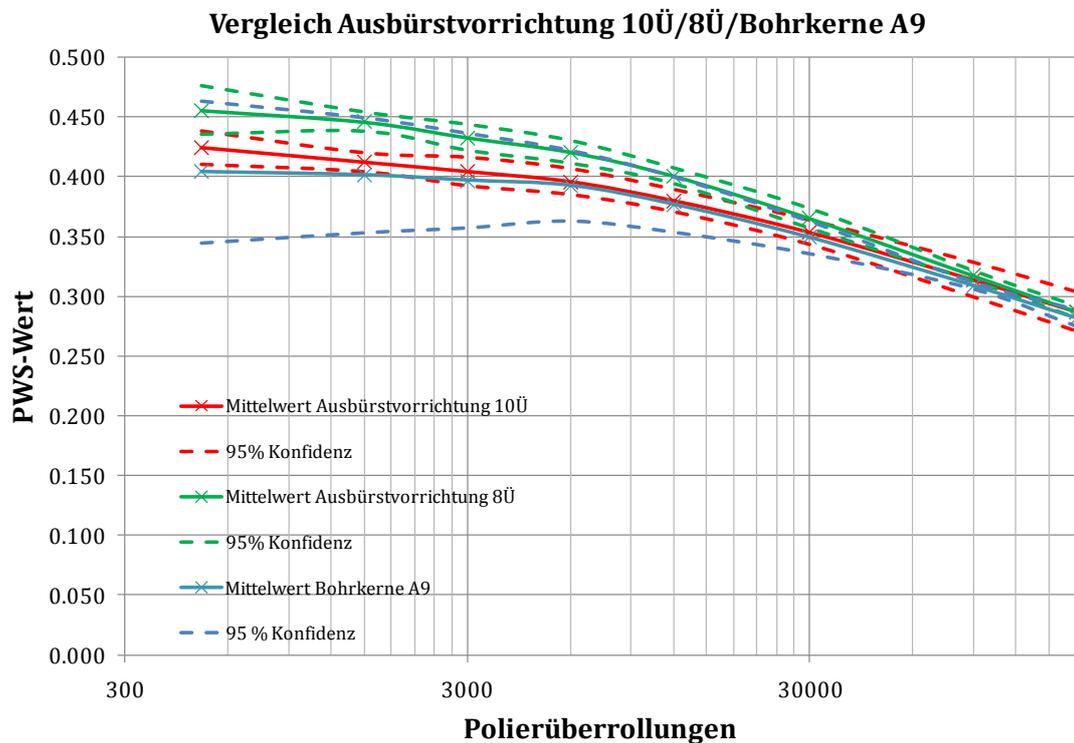


Abbildung 62: Vergleich Ausbüstvorrichtung/Bk. A9 - logarithmisch

Die Abbildungen 61 und 62 vergleichen die Bohrkerne mit der Ausbüstvorrichtung 10 Übergänge und 8 Übergänge. Dieser Vergleich zeigt, dass die die Ausbüstvorrichtung 10 ÜR näher zu den Bohrkerne ist.

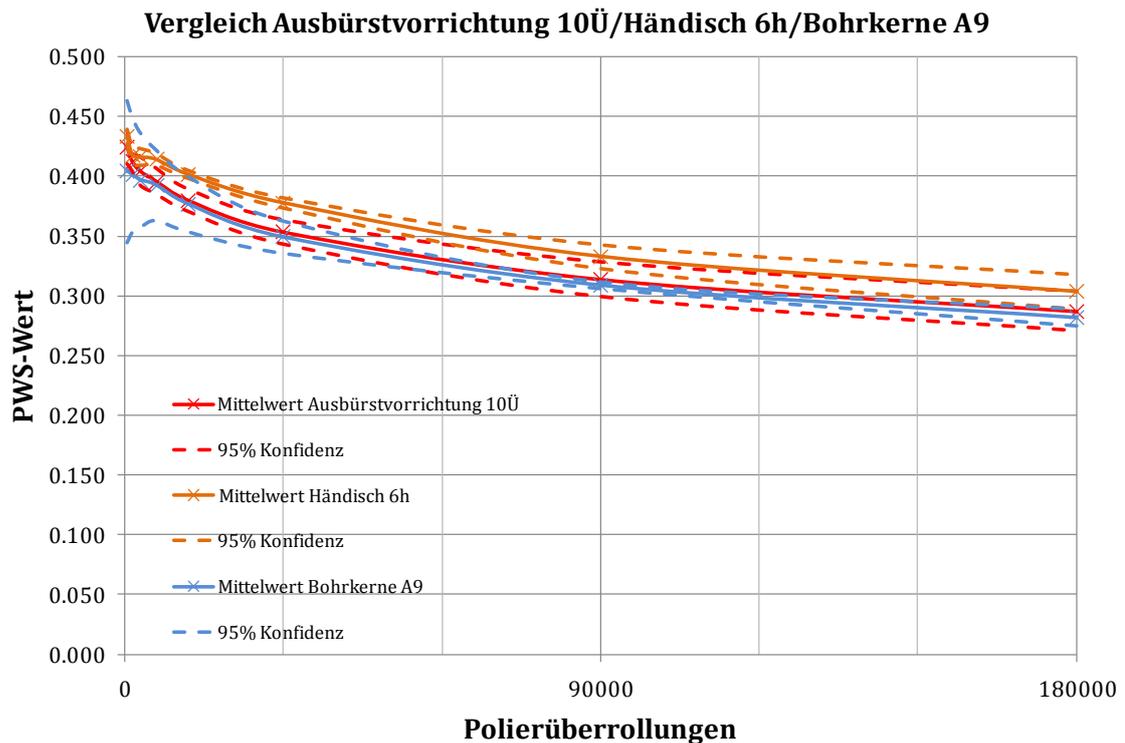


Abbildung 63: Vergleich Ausbürstvorrichtung/Händisch/Bk. A9

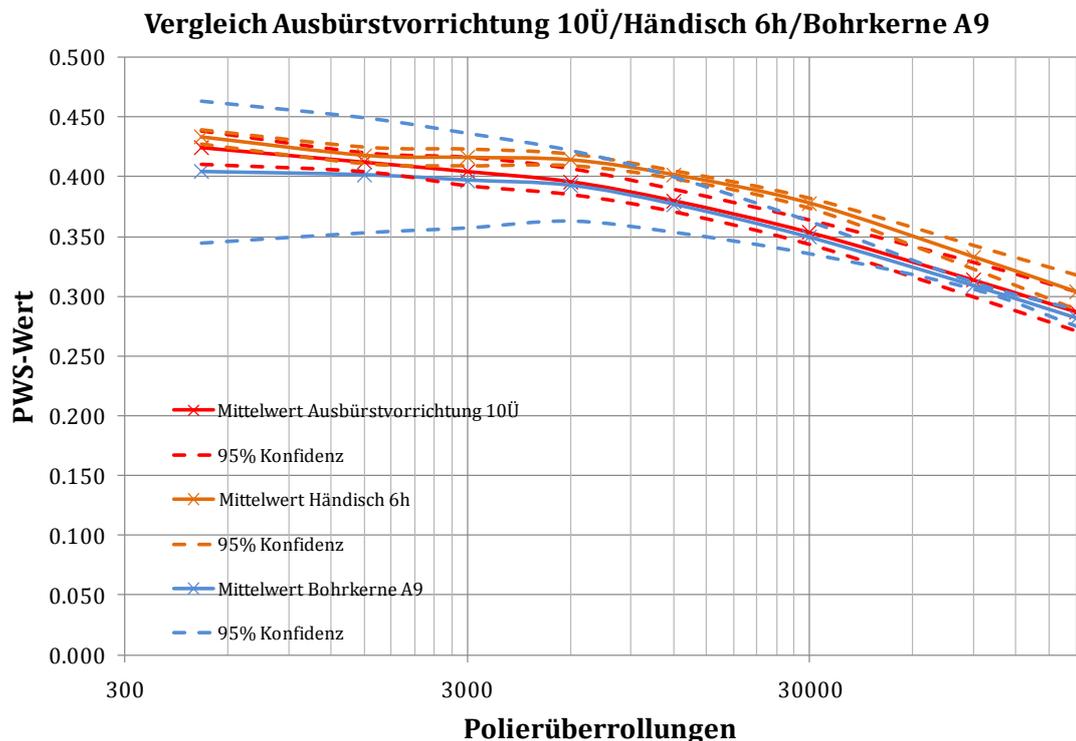


Abbildung 64: Vergleich Ausbürstvorrichtung/Händisch/Bk. A9 - logarithmisch

Die Abbildungen 63 und 64 stellen einen zweiten Vergleich zwischen Ausbürstvorrichtung 10 Übergänge, händisch AUSBÜRSTEN und den Bohrkerne. Im Vergleich zu den maschinell ausgebürsteten Probekörper sind die PWS - Werte von den händisch ausgebürsteten Probekörper höher. Abschliessend ist festgestellt, dass der Reibungsbeiwert von der

Ausbürstvorrichtung 10 Übergänge am nächsten an den Bohrkernen liegt. Alle Daten in diesen Grafiken sind im Anhang A zu sehen.

Um verschiedene Methode des Ausbürsten von Waschbetonplatten zu vergleichen, werden die Reibungswerte mittels statistischer Verfahren „t-Test“ ausgewertet. Die notwendige Kenngröße für Durchführung des t-Tests sind im Anhang E hinzugefügt.

Tabelle 15: T-Test

Ergebnisse T-Test:	Reibungsbeiwert							
	500	1500	3000	6000	12000	30000	90000	180000
Pl. Maschinell 10 ÜR / Bohrkern	32,1	49,5	57,4	73,7	68,3	43,9	33,4	38,3
Pl. Maschinell 8 ÜR / Bohrkern	4,9	3,6	4,1	3,7	2,8	2,6	0,6	11,0
Pl. händisch/Bohrkerne	28,7	43,7	29,5	15,3	6,7	1,2	0,4	2,0

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 Reibungsbeiwerte der maschinell (8 ÜR) ausgebürsteten Probekörper im Vergleich zu den Bohrkernen zu bezeichnen. Allgemein kann abgeschlossen werden, dass die Reibungswerte der maschinell (10 ÜR) ausgebürsteten Probekörper am nächsten zu den Reibungswerten der Bohrkernen sind.

## 5.2.4 Topografiemessung

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. Jede Stelle hat Fläche von 25 cm<sup>2</sup>. Infolgedessen sind Bilder der Oberfläche nach Belastungsstufen 0 ÜR und 180000 ÜR vorhanden sein. Dabei kann man die Oberflächenzustand am Anfang (0 ÜR) und am Ende (180 000 ÜR) vergleichen.

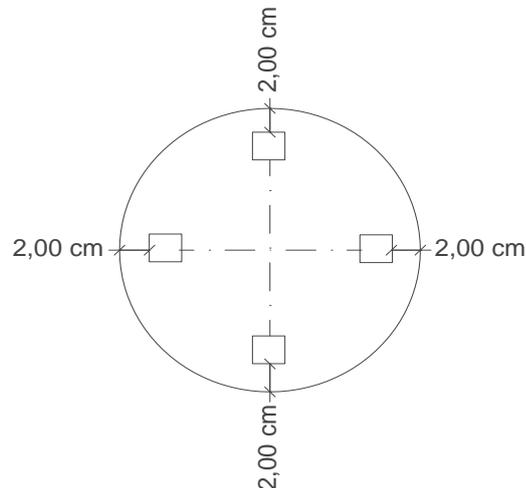


Abbildung 65: Topographieerfassung der Oberfläche mittels optischen Geräts

### 5.2.4.1 Bilderdarstellung

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

- Pl.9- händisch Ausbürsten
- Pl.11- mit Ausbürstvorrichtung, 10 Übergänge
- Pl.14- mit Ausbürstvorrichtung, 8 Übergänge
- Bk.7- Bohrkernen A9

Die Abbildung 66 verfolgt den Poliervorgang der Pl.9, die händisch ausgebürstet wurde. Am Anfang ist eine gute Makrotextur ersichtlich. Auf der Abbildung (links) kann man jede Spitze der Oberfläche sehen. In diesem Zustand ist der Probekörper noch nicht poliert und der Reibungsbeiwert ist 0,448. Am Ende des Poliervorgangs (rechts) ist der Reibungsbeiwert 0,256. Die Oberflächentextur ist wesentlich poliert und sieht ganz anders aus.

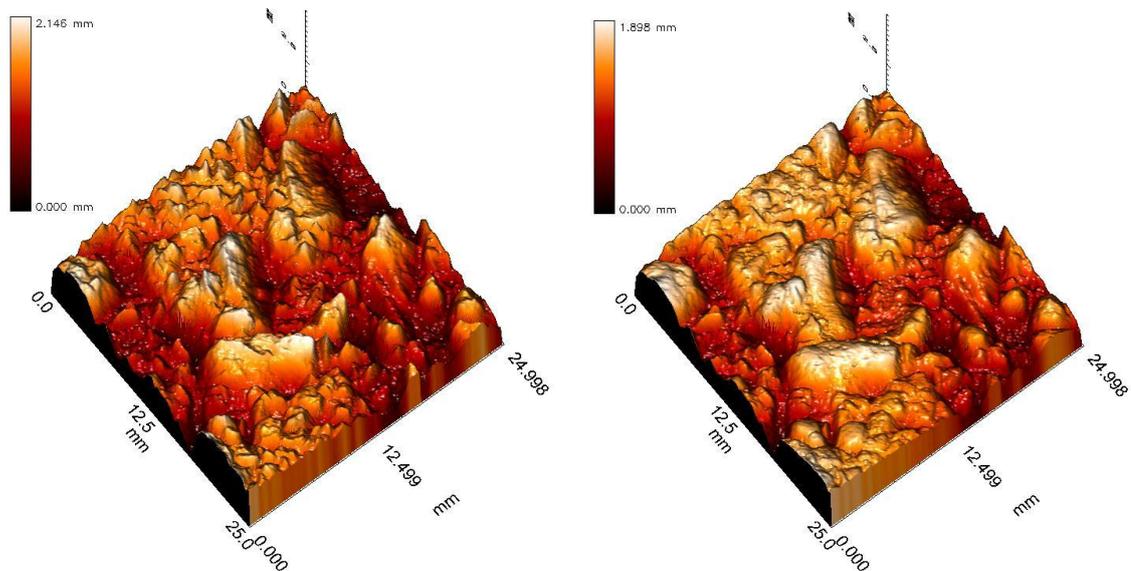


Abbildung 66: Pl.9 vor dem Poliervorgang (0 ÜR) und nach dem Poliervorgang (180 000 ÜR) Pl.11, die maschinell (10 Übergänge) ausgebürstet wurde, charakterisiert sich mit Anfangsreibungswert von 0,421. Auf der Abbildung 67 (links) ist die nicht polierte Oberflächentextur aufgenommen. Nach dem Poliervorgang beträgt der Reibungsbeiwert 0,278. Darüber spricht die gleiche Abbildung (rechts), wo die Oberflächentextur wesentlich poliert ist.

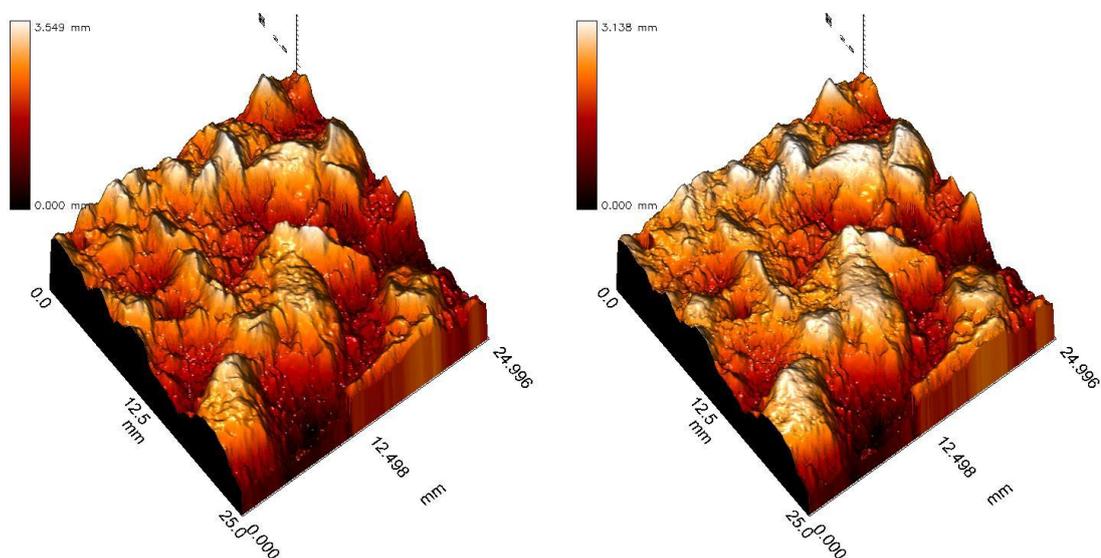


Abbildung 67: Pl.11 vor dem Poliervorgang (0 ÜR) und nach dem Poliervorgang (180 000 ÜR)

Pl.14 charakterisiert sich mit Anfangsreibungswert von 0,464. Auf der Abbildung 68 (links) ist die nicht polierte Oberflächentextur aufgenommen. Nach dem Poliervorgang beträgt der Reibungsbeiwert 0,289. Darüber spricht die gleiche Abbildung (rechts), wo die Oberflächentextu auch wesentlich poliert ist.

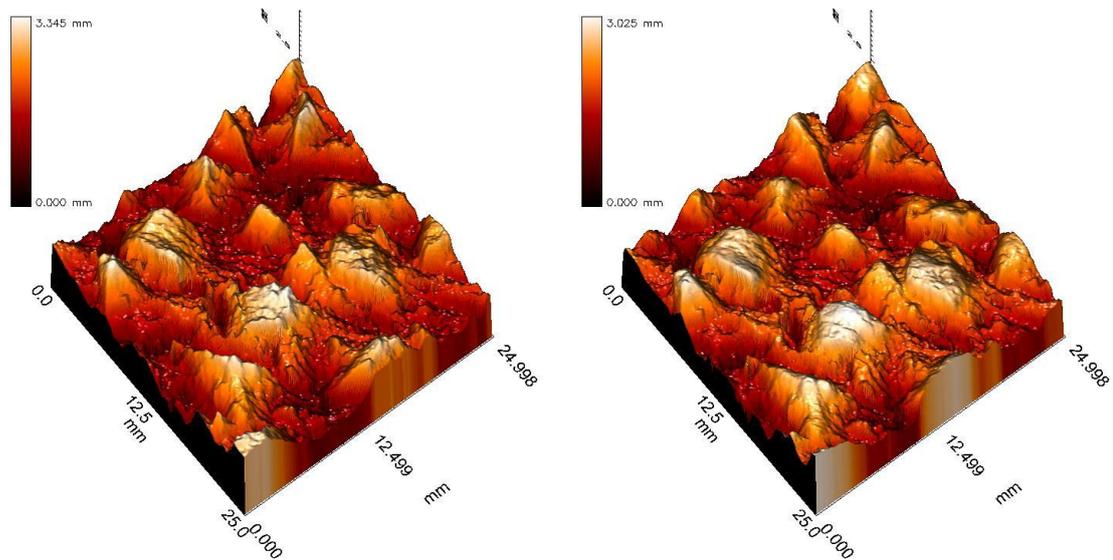


Abbildung 68: PI.14 vor dem Poliervorgang (0 ÜR) und nach dem Poliervorgang (180000 ÜR)

Der Poliervorgang bei der Bk.7, die aus dem Autobahn A9 entnommen wurde, verläuft ähnlich wie bei der PI.11 (maschinell 10 Übergänge). Die Bk.7 charakterisiert sich mit Anfangsreibwert von 0,376 und dieser Wert ist nur mit 0,035 weniger als den Anfangsreibwert bei der PI.11. Nach dem Poliervorgang beträgt der Reibungsbeiwert 0,285. Die Differenz zwischen diesem Wert und dem endlichen Reibungsbeiwert bei der PI.11 ist nur 0,007.

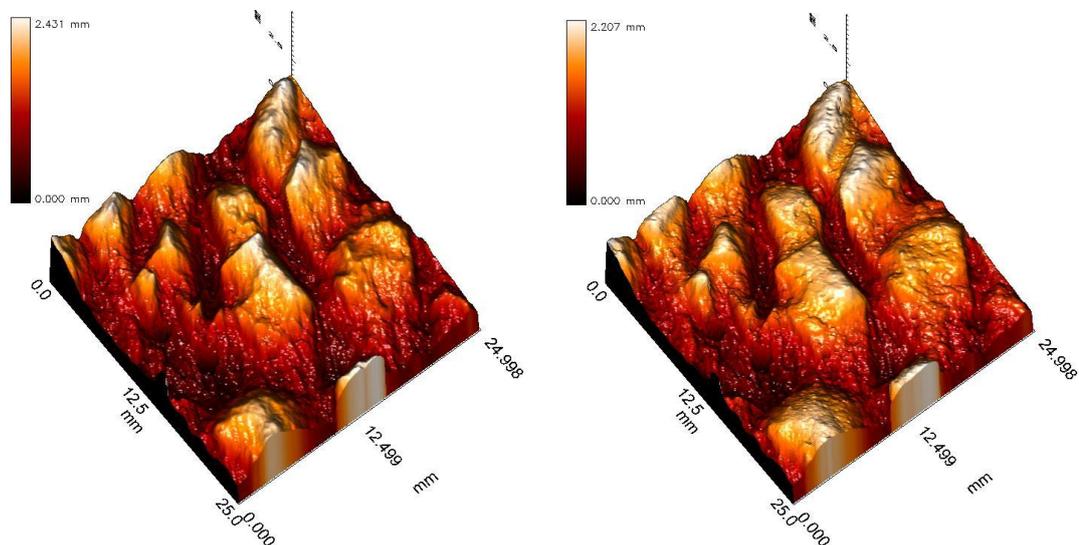


Abbildung 69: Bk.7 vor dem Poliervorgang (0 ÜR) und nach dem Poliervorgang (180 000 ÜR)

#### 5.2.4.2 Oberflächenparameter

Zur Analyse der Probekörperoberfläche werden die Oberflächenparameter verwendet. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von diesen Oberflächenparametern dargestellt. Die Oberflächenparameter werden in drei Gruppen aufgeteilt- Primärparameter, Rauheitsparameter und Welligkeitsparameter. Der FRT Laser ermittelt die

Rauheitsparameter und die Welligkeitsparameter durch Einsatz von Filtern. Der MicroCAD Laser bestimmt nur die Primärparameter.

### 5.2.4.2.1 Primärparameter von FRT Laser

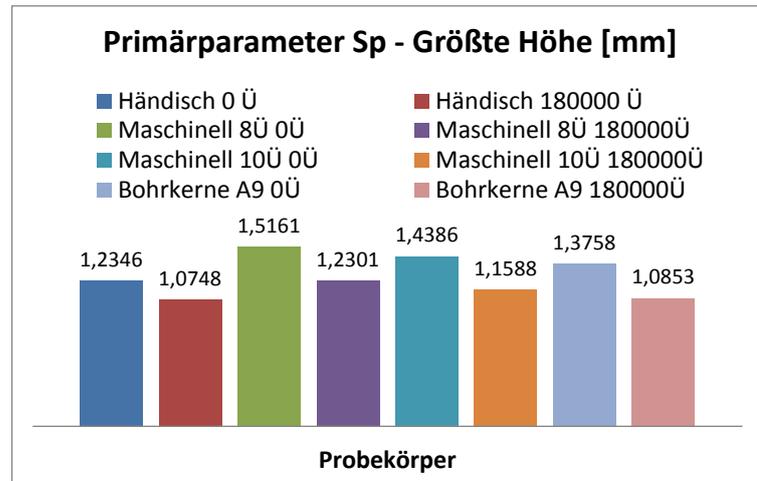


Abbildung 70: Primärparameter Sp

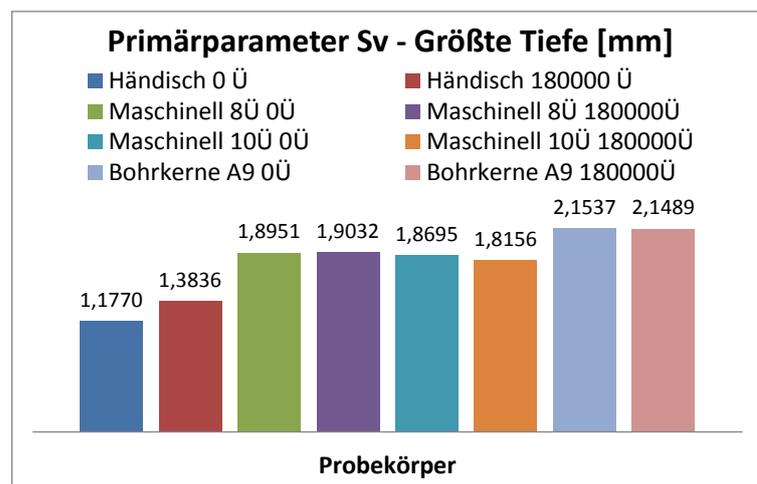


Abbildung 71: Primärparameter Sv

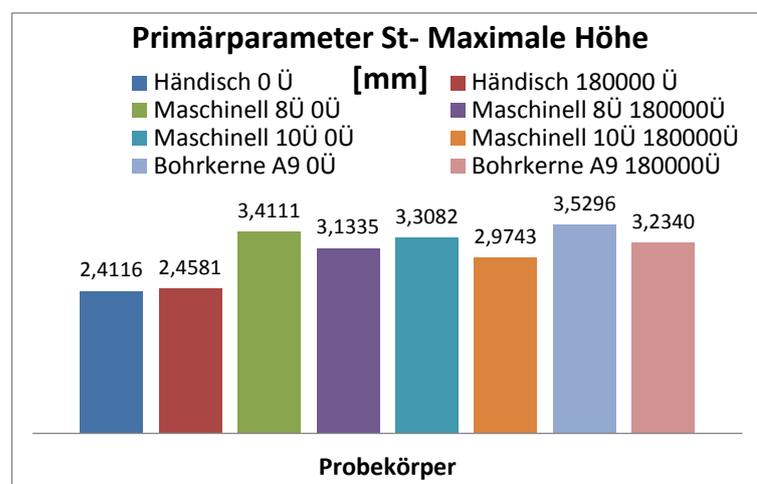


Abbildung 72: Primärparameter St

### 5.2.4.2.2 Rauheitsparameter

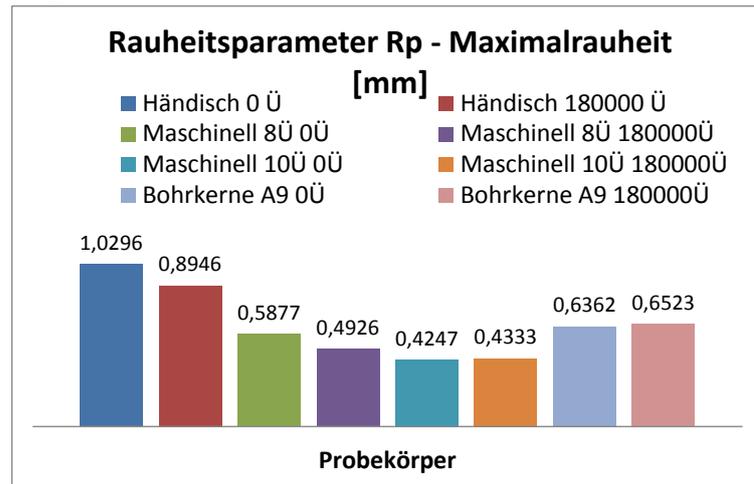


Abbildung 73: Rauheitsparameter Rp

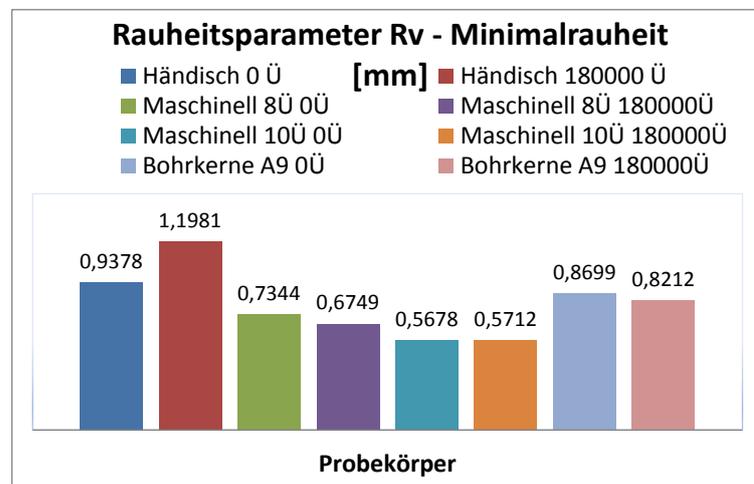


Abbildung 74: Rauheitsparameter Rv

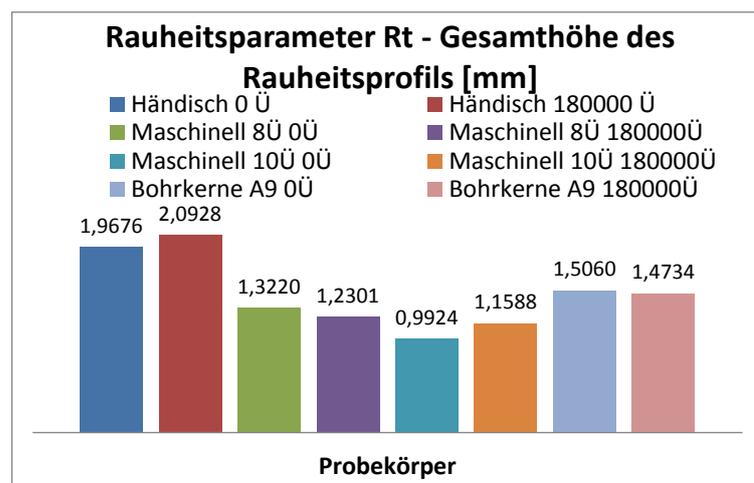


Abbildung 75: Rauheitsparameter Rt

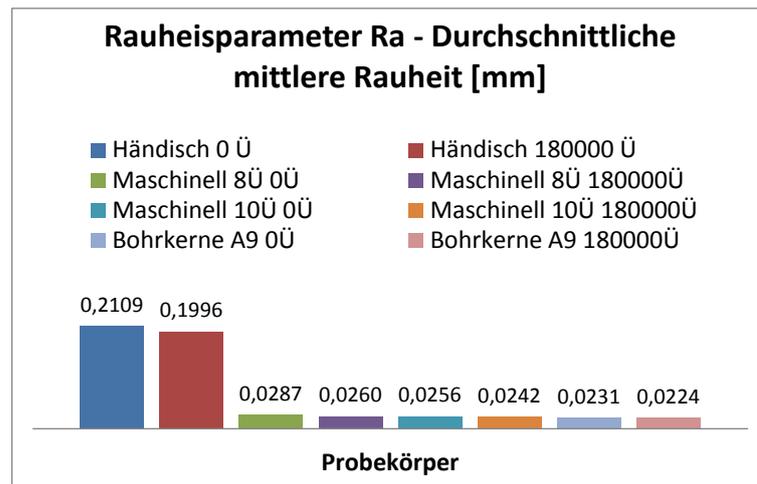


Abbildung 76: Rauheitsparameter Ra

### 5.2.4.2.3 Welligkeitsparameter

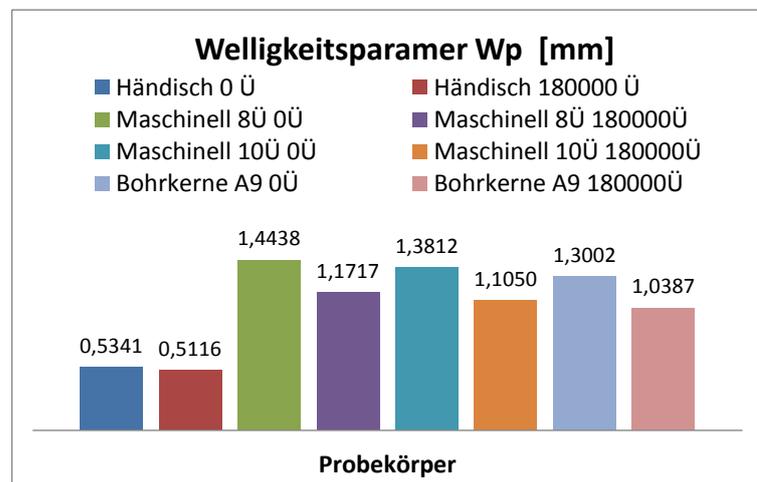


Abbildung 77: Welligkeitsparameter Wp

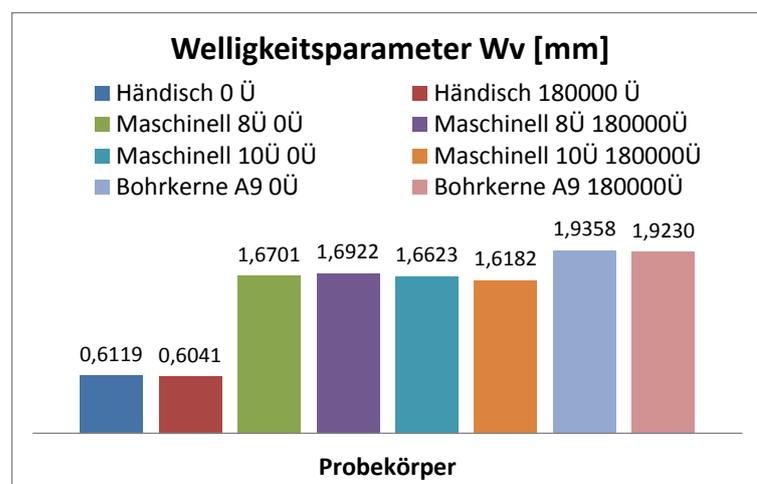


Abbildung 78: Welligkeitsparameter Wv

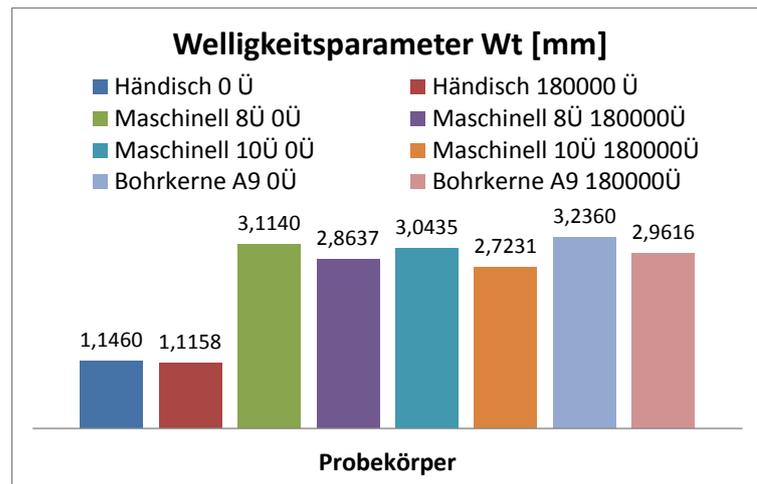


Abbildung 79: Welligkeitsparameter Wt

#### 5.2.4.2.4 Primärparameter von MicroCAD Laser

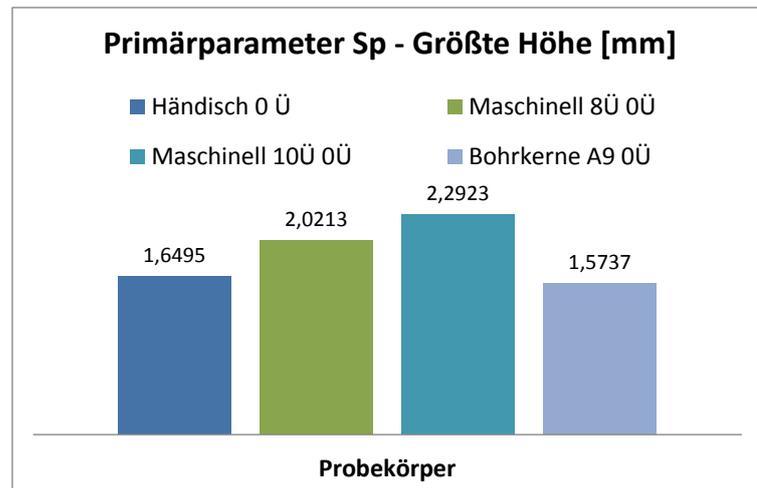


Abbildung 80: Primärparameter Sp - graphische Darstellung

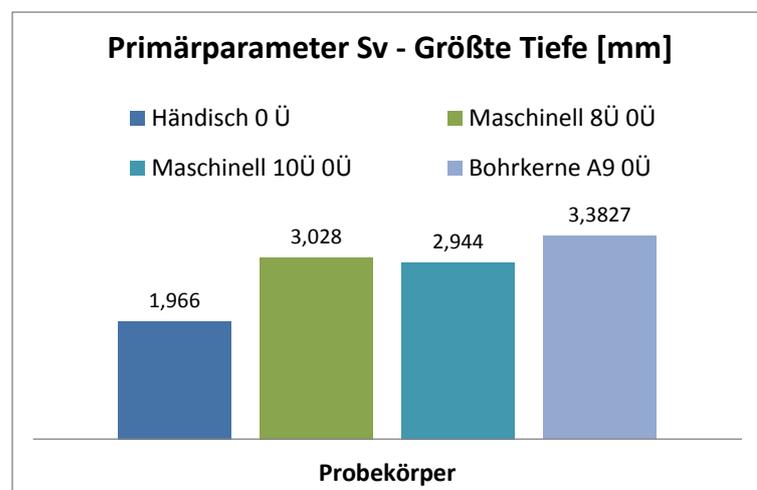


Abbildung 81: Primärparameter Sv - graphische Darstellung

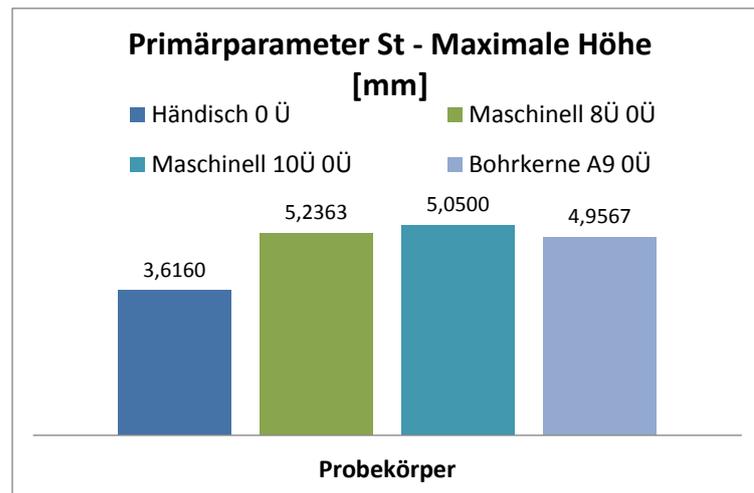


Abbildung 82: Primärparameter Sv - graphische Darstellung

#### 5.2.4.2.5 Auswertung der Oberflächenparameter

Um Oberflächenparameter zu analysieren, werden die Parameter mittels statistisches Verfahren „t-Test“ ausgewertet.

Tabelle 16: Ergebnisse des T-Tests von dem FRT Laser

Ergebnisse T-Test:	Sp	Sv	St	Rp	Rv	Rt	Ra	Wp	Wv	Wt
Pl. maschinell 10 Ü/Bohrkerne (0 ÜR)	55.7	42.1	44.0	14.0	14.6	12.4	33.2	48.0	35.5	36.1
Pl. 10 maschinell Ü/Bohrkerne (180 000 ÜR)	53.7	26.5	28.6	6.4	11.3	8.8	42.6	55.5	21.9	19.9
Pl. maschinell 8 Ü/Bohrkerne (0 ÜR)	32.6	46.9	65.2	66.5	51.3	54.1	2.5	33.1	36.5	50.4
Pl. maschinell 8 Ü/Bohrkerne (180 000 ÜR)	24.4	44.2	68.4	12.1	34.9	23.5	2.3	27.1	40.1	60.9
Pl. händisch/Bohrkerne (0 ÜR)	32.2	9.2	3.8	12.1	34.9	23.5	0.0	0.9	2.7	0.3
Pl. händisch/Bohrkerne (180000 ÜR)	94.3	11.6	7.5	9.8	24.6	12.7	0.1	2.8	1.6	0.2

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

Die Ergebnisse des T-Tests von dem FRT Laser zeigen, dass die größte Wiederholbarkeit von diesen zehn Oberflächenparameter zwischen den Bohrkernen und den maschinell (8 ÜR) ausgebürsteten Platten ist.

Tabelle 17: Ergebnisse des T-Tests von dem MicroCAD Laser

Ergebnisse T-Test:	Sp	Sv	St
Pl. maschinell 10 Ü/Bohrkerne (0 ÜR)	1.4	62.7	77.7
Pl. maschinell 8 Ü/Bohrkerne (0 ÜR)	3.0	67.6	91.4
Pl. händisch/Bohrkerne (0 ÜR)	54.0	26.5	29.0

Die Primärparameter von dem MicroCAD Laser bestätigen auch die größte Ähnlichkeit zwischen Bohrkernen und maschinell (8 ÜR) ausgebürsteten Platten.

#### 5.2.4.2.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für die Ziele dieser Diplomarbeit wurden die Griffigkeitseigenschaften von dem Waschbeton GK 8 ermittelt. 6 PK aus diesem Waschbeton wurden in Laborbedingungen hergestellt und geprüft. 12 Bohrkernen wurden aus dem Autobahn A9 entnommen. 3 davon wurden ausgewählt und geprüft.

Jede Probe wurde mit dem Polierverfahren nach Wehner/Schulze einer Polierbeanspruchung von 0 bis 180 000 Überrollungen (ÜR) unterzogen. So wurde die Griffigkeitentwicklung stufenweise verfolgt. Die Polierwirkung wurde zusätzlich mit einem Wasser/Quarzmehl-Mischgut verstärkt. Nach jeder Polierbeanspruchung wird die Reibungsbeiwert bestimmt. Bei der Griffigkeitsprüfung wurde die Polierresistenz von Waschbeton GK 8 bei Variation von verschiedenen Arten des Ausbürsten untersucht und beurteilt. Für eine Griffigkeitsbeurteilung werden am Ende die Ergebnisse von alle geprüften Probekörpergruppen analysiert und ausgewertet. Die erhaltenen PWS-Werte charakterisieren sich mit einer guten Wiederholbarkeit. Der Verlauf der Reibungsbeiwerte von 0 bis 180 000 Überrollungen charakterisiert sich mit einer gleichmäßiger Senkung. Bei jeder nächsten Belastungsstufe wird der Reibungsbeiwert niedriger. Nach 180 000 Überrollungen senkt der Reibungsbeiwert von Waschbeton fast nicht ab.

Zur Analyse der Oberflächentextur von Waschbetonplatten wurden zwei Laser (FRT Laser und MicroCAD Laser) verwendet. Jede Probe wurde vor dem Poliervorgang mit MicroCAD Laser analysiert. Mit Hilfe dieses Laser wurde die Profilspitzenanzahl jeder Probe bestimmt. Die Oberfläche jeder Probe wurde an vier Stellen mit der Hilfe des Geräts FRT MicroProf erfasst. Infolgedessen werden Bilder der Oberfläche nach Belastungsstufen 0 ÜR und 180000 ÜR vorhanden sein. Die Oberflächenparameter wurden von beiden untersucht und beurteilt. Um verschiedene Arten des Ausbürsten zu vergleichen, wurden die Untersuchungen mittels dem statistischen Verfahrens „T-Test“ ausgewertet.

Auf Grund der erhaltenen Ergebnisse kann schlussgefolgert werden, dass die Art des Ausbürsten von Waschbetonprobekörpern einen Einfluss auf das Griffigkeitsniveau und auf die Oberflächeneigenschaften hat. Die durchgeführten Prüfungen zeigen, dass die mit der Ausbürstvorrichtung ausgebürsteten Probekörper näher zu den Bohrkernen als die händisch ausgebürsteten Probekörper sind.

## I. Literaturverzeichnis

- [1] N. P. Possler, Oberflächenrauheit von Baustoffen, 2009.
- [2] B.Rasch, M.Friese, W.Hofmann und E.Naumann, Quantitative Methoden-Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler, Berlin: Springer, 2010.
- [3] M. Kühlmeyer, Statische Auswertungsmethoden für Ingenieure, Springer .
- [4] Prüfung der Kombinationsmittel zur Herstellung von Waschbetonoberflächen im Rahmen der TL NBM-StB, Ausgabe: 06-2012.
- [5] D.-I. A. Pfeiler, *Erhöhung der Griffigkeit von Asphaltstrassen –Der Einfluss der Polierresistenz feiner Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltdeckschichten*, 2004.
- [6] D.-I. L. Kirchmaier, *Einfluss feiner Gesteinkörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten im Straßenbau-Dissertation*.
- [7] D. Zhelyazkova, Beilage zur Entwicklung eines Griffigkeitsprognoseverfahrens für Straßenoberflächen, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Deutschland, 2014.
- [8] Technische Universität- Wien- Labor des Forschungsbereich für Strassenwesen, Bestimmung des Polierwiderstandes von Sanden mit dem Prüfgerät nach Wehner/Schulze (PWS), Ausgabe 2.
- [9] M. Donchev, Untersuchungen zum Einfluss des Sandes und des Sandstrahlens auf die Griffigkeit auf dem Asphaltbeton, 2007.
- [10] Bestimmung der Griffigkeitsentwicklung von Oberflächen mit dem Prüfverfahren Wehner/Schulze (PWS), Ausgabe 2009.
- [11] Prüfbericht über die Erstprüfung von Oberbeton gemäß RVS 08.17.02, Ausgabe 2011.
- [12] Handbuch Optisches 3D-Messgerät, 08.08.2014.
- [13] Bedienungsanleitung FRT Mark III.
- [14] Technische Universität- Wien- Labor des Forschungsbereich für Strassenwesen, Herstellung von Waschbetonprobekörpern im Labor, 2014.
- [15] Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen –Messung der Makrotexturtiefe

der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe, Ausgabe 2010.

[16] Prüfung von Frischbeton –Luftgehalt D ruckverfahren, Ausgabe 2009.

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zwangsmischer .....	10
Abbildung 2: Rütteltisch .....	11
Abbildung 3: Luftgehaltsprüfer .....	12
Abbildung 4: Diamant-Kernbohrmaschine.....	13
Abbildung 5: Laborwaage.....	13
Abbildung 6: Schalung .....	14
Abbildung 7: Glättkelle.....	14
Abbildung 8: Sprühgerät .....	15
Abbildung 9: Hilfsmittels .....	15
Abbildung 10: Sieblinie für GK 8 [4] .....	17
Abbildung 11: Fließmittel und Luftporenbildner .....	20
Abbildung 12: Verzögerer .....	21
Abbildung 13: Mischen des Betons .....	23
Abbildung 14: Bestimmung des Luftporengehaltes .....	24
Abbildung 15: Einschalung, Glättung und Besprühung des Probekörpers .....	24
Abbildung 16: Ausbürsten der Platten händisch.....	25
Abbildung 17: Ausbürstvorrichtung .....	26
Abbildung 18: Einstellung des Anpressdruckes.....	26
Abbildung 19: Bohren des Probekörpers .....	27
Abbildung 20: Bestimmung der Rautiefe .....	28
Abbildung 21: Graphische Darstellung der Primärparameter [1] .....	29
Abbildung 22: Graphische Darstellung der Rauheitsparameter [1].....	30
Abbildung 23: Graphische Darstellung der Durchschnittlichen Rauheit Ra [1] .....	30
Abbildung 24: FRT MicroProf 300 mit XY Kreuztisch .....	31
Abbildung 25: Chromatisches Messprinzip .....	32
Abbildung 26: Messsystemkonfiguration von dem MikroCAD Laser.....	33
Abbildung 27: Prinzipdarstellung des optischen 3D-Sensors.....	34
Abbildung 28: Fragestellung des t-Tests [2].....	35
Abbildung 29: Stichprobenkennwertverteilung von Mittelwerten mit zwei zufällig entstandenen Stichprobenmittelwerten, sowie dem gemeinsamen Populationsmittelwert $\mu$ [2].....	35
Abbildung 30: Konstruktion einer Stichprobenkennwertverteilung von Mittelwertdifferenzen unter der Nullhypothese [2] .....	36
Abbildung 31: Die Wahrscheinlichkeit eines t-Wertes in einer t-Verteilung [2].....	36
Abbildung 32: Simulation der Verkehrsbeanspruchung [Donchev, 2007].....	39
Abbildung 33: Prinzip der Griffigkeitsmessung [Donchev, 2007] .....	40
Abbildung 34: Gleitbeiwert/Geschwindigkeit-Diagramm .....	40
Abbildung 35: Polier-Diagramm .....	41
Abbildung 36: Kontroll-Diagramm.....	41

Abbildung 37: Wehner/Schulze Prüfanlage .....	42
Abbildung 38: Polierkopf.....	42
Abbildung 39: Detailansicht einer Polierrolle [Kirchmaier 2011].....	43
Abbildung 40: Getauschte Rollengummis .....	44
Abbildung 41: Messkopf.....	44
Abbildung 42: Detailansicht eines Prügungummis [Kirchmaier 2011].....	45
Abbildung 43: Anordnung der Prüfgummis auf der Prüfoberfläche [Kirchmaier und Blab, 2010b].....	45
Abbildung 44: Getauschte Prüfgummis .....	46
Abbildung 45: Prüfgummis mit Blasenbildung.....	46
Abbildung 46: Kalibrierplatte .....	47
Abbildung 47: Kalibrierung der verwendeten Prüfgummis .....	48
Abbildung 48: Bestandteile der Probenform .....	48
Abbildung 49: Poliervorgang unter konstanter Zugabe von Quarzmehl/Wasser- Gemisches .....	49
Abbildung 50: Spülen der Probeoberfläche von Poliermittel .....	49
Abbildung 51: Abremsvorgang.....	50
Abbildung 52: Probekörper bei 0 ÜR und bei 180 000 ÜR.....	54
Abbildung 53: PWS-Werte Bohrkerne.....	55
Abbildung 54: PWS-Werte Bohrkerne - logarithmisch.....	55
Abbildung 55: PWS-Werte Waschbetonkörper - 10 ÜR maschinell .....	56
Abbildung 56: PWS-Werte Waschbetonkörper - 10 ÜR maschinell - logarithmisch.....	56
Abbildung 57: PWS-Werte Waschbetonkörper - 8 ÜR maschinell.....	57
Abbildung 58: PWS-Werte Waschbetonkörper - 8 ÜR maschinell - logarithmisch.....	57
Abbildung 59: PWS-Werte Waschbetonkörper - händisch.....	58
Abbildung 60: PWS-Werte Waschbetonkörper – händisch - logarithmisch .....	58
Abbildung 61: Vergleich Ausbürstvorrichtung/Bk. A9.....	59
Abbildung 62: Vergleich Ausbürstvorrichtung/Bk. A9 - logarithmisch.....	59
Abbildung 63: Vergleich Ausbürstvorrichtung/Händisch/Bk. A9 .....	60
Abbildung 64: Vergleich Ausbürstvorrichtung/Händisch/Bk. A9 - logarithmisch .....	60
Abbildung 65: Topographieerfassung der Oberfläche mittels optischen Geräts .....	62
Abbildung 66: Pl.9 vor dem Poliervorgang (0 ÜR) und nach dem Poliervorgang (180 000 ÜR) .....	63
Abbildung 67: Pl.11 vor dem Poliervorgang (0 ÜR) und nach dem Poliervorgang (180 000 ÜR) .....	63
Abbildung 68: Pl.14 vor dem Poliervorgang (0 ÜR) und nach dem Poliervorgang (180000 ÜR) .....	64
Abbildung 69: Bk.7 vor dem Poliervorgang (0 ÜR) und nach dem Poliervorgang (180 000 ÜR) .....	64
Abbildung 70: Primärparameter Sp .....	65
Abbildung 71: Primärparameter Sv.....	65
Abbildung 72: Primärparameter St .....	65
Abbildung 73: Rauheitsparameter Rp.....	66
Abbildung 74: Rauheitsparameter Rv .....	66
Abbildung 75: Rauheitsparameter Rt.....	66
Abbildung 76: Rauheitsparameter Ra .....	67
Abbildung 77: Welligkeitsparameter Wp.....	67
Abbildung 78: Welligkeitsparameter Wv .....	67
Abbildung 79: Welligkeitsparameter Wt.....	68
Abbildung 80: Primärparameter Sp - graphische Darstellung .....	68
Abbildung 81: Primärparameter Sv - graphische Darstellung.....	68
Abbildung 82: Primärparameter Sv - graphische Darstellung.....	69

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten des Sprühgerätes .....	15
Tabelle 2: Sieblinie für GK 8 .....	17
Tabelle 3: CEM II/B-S 42,5 N .....	18
Tabelle 4: Hauptkomponenten .....	18
Tabelle 5: Hauptzementarten .....	19
Tabelle 6: Zementarten und deren Zusammensetzung .....	19
Tabelle 7: Arten der der Verzögerung der Oberflächenleimschicht .....	21
Tabelle 8: Mischungsansatz .....	22
Tabelle 9: Mischregime .....	23
Tabelle 10: Anforderungen an Waschbetonoberflächen.....	27
Tabelle 11: Bohrkernen A9.....	51
Tabelle 12: Gewähltes Programm für die Griffigkeitsuntersuchungen an den Waschbetonplatten ...	52
Tabelle 13: Sandfleckenversuch.....	53
Tabelle 14: Anzahl der Spitzen .....	54
Tabelle 15: T-Test .....	61
Tabelle 16: Ergebnisse des T-Tests von dem FRT Laser .....	69
Tabelle 17: Ergebnisse des T-Tests von dem MicroCAD Laser .....	69
Tabelle 18: Reibungsbeiwerte (händisch).....	75
Tabelle 19: Reibungsbeiwerte (maschinell 10 ÜR).....	75
Tabelle 20: Reibungsbeiwerte (maschinell 8 ÜR).....	75
Tabelle 21: Reibungsbeiwerte (Bohrkernen A9) .....	75
Tabelle 22: Oberflächenparameter (FRT Laser) .....	76
Tabelle 23: Oberflächenparameter (MicroCAD Laser).....	76

**IV. Anhang A**

Tabelle 18: Reibungsbeiwerte (händisch)

Probekörper	Reibungsbeiwert								Bemerkungen
	№	500	1500	3000	6000	12000	30000	90000	
Pl. 7	0,435	0,420	0,418	0,416	0,403	0,379	0,336	0,308	F70L
Pl. 8	0,431	0,415	0,413	0,412	0,400	0,376	0,329	0,298	
Mittelwert	0,433	0,418	0,416	0,414	0,401	0,378	0,333	0,303	-
95% Konfidenz	0,438	0,422	0,421	0,431	0,447	0,445	0,406	0,377	
95% Konfidenz	0,428	0,413	0,411	0,397	0,356	0,310	0,259	0,229	

Tabelle 19: Reibungsbeiwerte (maschinell 10 ÜR)

Probekörper	Reibungsbeiwert								Bemerkungen
	№	500	1500	3000	6000	12000	30000	90000	
Pl.10	0,419	0,410	0,400	0,392	0,377	0,355	0,316	0,288	F78C
Pl.11	0,421	0,409	0,401	0,393	0,378	0,347	0,305	0,278	
Pl.12	0,432	0,417	0,411	0,402	0,385	0,358	0,320	0,295	
Mittelwert	0,424	0,412	0,404	0,396	0,380	0,353	0,314	0,287	-
95% Konfidenz	0,438	0,420	0,416	0,407	0,389	0,364	0,329	0,304	
95% Konfidenz	0,410	0,404	0,392	0,385	0,370	0,343	0,299	0,270	

Tabelle 20: Reibungsbeiwerte (maschinell 8 ÜR)

Probekörper	Reibungsbeiwert								Bemerkungen
	№	500	1500	3000	6000	12000	30000	90000	
Pl.13	0,444	0,441	0,426	0,415	0,397	0,360	0,315	0,284	F78C
Pl.14	0,464	0,449	0,436	0,422	0,402	0,367	0,318	0,289	
Pl.15	0,459	0,447	0,436	0,425	0,403	0,368	0,319	0,287	
Mittelwert	0,456	0,446	0,433	0,421	0,401	0,365	0,317	0,287	-
95% Konfidenz	0,476	0,454	0,444	0,430	0,407	0,373	0,322	0,292	
95% Konfidenz	0,435	0,438	0,422	0,411	0,394	0,357	0,313	0,282	

Tabelle 21: Reibungsbeiwerte (Bohrkernen A9)

Probekörper	Reibungsbeiwert								Bemerkungen
	№	500	1500	3000	6000	12000	30000	90000	
Bk.2	0,436	0,427	0,417	0,408	0,389	0,354	0,308	0,278	F78C
Bk.11	0,400	0,399	0,396	0,391	0,375	0,352	0,310	0,282	
Bk.7	0,376	0,378	0,377	0,378	0,366	0,341	0,309	0,285	
Mittelwert	0,404	0,401	0,397	0,392	0,377	0,349	0,309	0,282	-
95% Konfidenz	0,463	0,449	0,436	0,422	0,400	0,362	0,312	0,289	
95% Konfidenz	0,345	0,353	0,357	0,363	0,354	0,336	0,306	0,275	

## V. Anhang B

Tabelle 22: Oberflächenparameter (FRT Laser)

Ausbürsten:	Platte	Überrollungen	Sp:	Sv:	St:	Ra:	Rp:	Rv:	Rt:	Wp:	Wv:	Wt:	
			mm										
Händisch ausbürsten	7	0	1,2138	1,2683	2,4820	0,2255	1,0783	0,9355	2,0140	0,5483	0,7128	1,2613	
	8	0	1,2555	1,0858	2,3413	0,1963	0,9810	0,9400	1,9213	0,5200	0,5110	1,0308	
	7	180000	1,0538	1,1995	2,2533	0,2150	0,9543	0,9070	1,8613	0,5285	0,7025	1,2313	
	8	180000	1,0958	1,5678	2,6630	0,1843	0,8350	1,4893	2,3243	0,4948	0,5058	1,0003	
Maschinell ausbürsten	10	0	1,4655	1,7178	3,1833	0,0223	0,4070	0,4985	0,9055	1,4198	1,5275	2,9475	
	11	0	1,3695	1,8720	3,2418	0,0265	0,3270	0,5845	0,9115	1,3100	1,6400	2,9500	
	12	0	1,4808	2,0188	3,4995	0,0280	0,5400	0,6203	1,1603	1,4138	1,8193	3,2330	
	13	0	1,6808	1,7260	3,4065	0,0295	0,5943	0,5663	1,1605	1,6050	1,5673	3,1725	
	14	0	1,4730	1,8640	3,3370	0,0290	0,5200	0,7440	1,2638	1,4143	1,6165	3,0305	
	15	0	1,3945	2,0953	3,4898	0,0275	0,6488	0,8930	1,5418	1,3123	1,8265	3,1390	
	10	180000	1,0975	1,7090	2,8065	0,0208	0,3510	0,4813	0,8323	1,0758	1,5228	2,5983	
	11	180000	1,2000	1,8010	3,0005	0,0250	0,4298	0,5865	1,0168	1,0955	1,5890	2,6843	
	12	180000	1,1790	1,9368	3,1158	0,0268	0,5190	0,6458	1,1648	1,1438	1,7428	2,8868	
	13	180000	1,2583	1,6483	2,9073	0,0263	0,4213	0,5553	0,9765	1,2160	1,4765	2,6920	
	14	180000	1,2380	1,9085	3,1465	0,0263	0,5005	0,6475	1,1485	1,1705	1,6328	2,8033	
	15	180000	1,1940	2,1528	3,3468	0,0255	0,5560	0,8220	1,3785	1,1285	1,9673	3,0958	
	Bohrkerne	7	0	1,4244	1,6646	3,0890	0,0220	0,4634	0,5438	1,0072	1,3944	1,5540	2,9486
		11	0	1,5048	2,0823	3,5873	0,0213	0,6465	1,0573	1,7035	1,4013	1,8535	3,2548
		2	0	1,1983	2,7143	3,9127	0,0260	0,7987	1,0087	1,8073	1,1050	2,4000	3,5047
7		180000	1,1578	1,6940	2,8518	0,0215	0,5458	0,6433	1,1888	1,1340	1,5693	2,7028	
11		180000	1,2188	2,2023	3,4210	0,0213	0,6235	0,7870	1,4105	1,1455	1,9418	3,0875	
2		180000	0,8793	2,5503	3,4293	0,0243	0,7877	1,0333	1,8210	0,8367	2,2580	3,0947	

Tabelle 23: Oberflächenparameter (MicroCAD Laser)

Ausbürsten:	Platte	Überrollungen	Sp:	Sv:	St:
			mm	mm	mm
Händisch ausbürsten	7	0	3,4520	1,7870	1,6650
	8	0	3,7800	1,5120	2,2670
Maschinell ausbürsten	10	0	4,3900	2,0100	2,3800
	11	0	5,9270	2,5900	3,3370
	12	0	5,3920	2,2770	3,1150
	13	0	5,1280	2,1820	2,9450
	14	0	4,8200	1,8770	2,9420
	15	0	5,2020	2,0050	3,1970
Bohrkerne	7	0	6,5250	1,6070	4,9180
	11	0	3,8550	1,5120	2,3420
	2	0	4,4900	1,6020	2,8880