



## **DIPLOMARBEIT**

# **OBERFLÄCHENRAUHEIT VON BAUSTOFFEN**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs unter Leitung von

Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Elmar Tschegg  
Labor für Materialwissenschaften  
E138 – Institut für Festkörperphysik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
von

Hans Peter POSSLER  
Matr. Nr. 0325388  
Hardeggasse 63/5/20, 1220 Wien

Wien am 20.03.2009

## **DANKSAGUNG:**

Ich möchte an dieser Stelle all jenen, die in der einen oder anderen Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, den ihnen gebührenden Dank aussprechen.

**Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Elmar Tschegg** für die Ermöglichung und Betreuung dieser Arbeit. Vielen Dank für all die motivierenden Vorlesungen und für das Vermitteln, dass moderne Wissenschaft Zusammenarbeit bedeutet.

**Univ.Prof. Dr. Stefanie Tschegg** für das zur Verfügung stellen von Gerät, das für das Stereoskopische Verfahren notwendig ist, sowie für das Erweitern meines wissenschaftlichen Horizontes in Wissensgebiete, die über die reine technische Physik hinausgehen.

**Dipl.-Ing. Michael Jamek** für das geduldige Beantworten vieler meiner Fragen, sowie viele guter Ratschläge und interessante Gespräche.

**Ing. Andreas Billan** für das Lesen meiner Arbeit und das Verbessern vieler meiner Formulierungen und Erklärungen.

**Julia Possler** für das Lesen meiner Arbeit und für das Verbessern meiner Beistrichsetzung.

**Allen Kollegen im Labor für Materialwissenschaften**, welche ich im Laufe meiner Diplomarbeit kennen lernen durfte.

**Meinen Eltern** für ihre langjährige Unterstützung.

**Meinen Großeltern** für ihre Motivation in schweren Stunden und viele schöne Gespräche.

**Meinem Sportverein** für viele schöne Erfolge abseits des Studiums.

**Meinen Freunden** für all die schönen Stunden an und fernab von der technischen Universität.

**Allen Leuten**, die hier zu erwähnen ich vergessen habe.

## **ABSTRAKT:**

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Untersuchung der Oberflächenrauheit an verschiedenen Baustoffen. Hierzu werden Abbildungen der verschiedenen Oberflächen nach dem Prinzip der Photogrammetrie, mit dem so genannten „Stereoskopischen Verfahren“, erstellt.

Bei der Stereoskopie wird eine Oberfläche bei gleichem Abstand, aus zwei wohl definierten Winkeln, im Bezug zu einer fixen Koordinatenachse fotografiert. Anhand der Verschiebung der Bildpunkte, die aus dem Vergleich der beiden Bilder hervorgeht, kann deren relative Höhe zueinander berechnet werden und somit die Erzeugung eines Abbildes der Oberfläche in drei Dimensionen erfolgen. Mit Hilfe des Oberflächenprofils des Abbildes ist es möglich, die zur Oberfläche zugehörigen Rauigkeitsparameter zu bestimmen.

Zur Durchführung des Stereoskopischen Verfahrens wurde ein tragbares Gerät konstruiert und gebaut, das sowohl im Labor, als auch im Freien einsetzbar ist. Die Erzeugung der dreidimensionalen Oberflächenabbilder, sowie die Berechnung der Oberflächenparameter, erfolgt mit einem PC bzw. Notebook (Software MeX Version 4.2 der Firma Alicona).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Rauigkeit von Betonbruchflächen mit verschiedenem Größtkorn, von abgefrästen Asphaltfahrbahnen und von Betonstraßen untersucht. Außerdem konnte die Rauigkeit von kalkbeschichteten Kalksteinen bestimmt werden.

# INHALTSVERZEICHNIS:

1.	Einleitung.....	05
2.	Rauhigkeit und Oberflächeneigenschaften.....	07
2.1	Darstellung einer rauhen Oberfläche.....	07
2.2	Definition der Rauigkeitsparameter.....	11
2.2.1	Die Linienanalyse.....	11
2.2.2	Die Flächenanalyse.....	16
2.2.3	Die Volumenanalyse.....	17
2.3	Rauhigkeit und Welligkeit im Überblick.....	20
2.3.1	Rauhigkeit von Fahrbahnoberflächen.....	20
2.3.2	Griffigkeit.....	22
2.3.3	Textur.....	23
3.	Messverfahren zur Bestimmung der Oberflächengestaltung.....	26
3.1	Sandfleckverfahren.....	26
3.2	Laserlichtschnitttechnik – Triangulationsverfahren.....	28
3.3	Streulichtverfahren mit TRACEiT.....	29
3.4	Rauhigkeitsmessung mit dem Tastschnittverfahren.....	30
4.	Stereoskopisches Verfahren.....	32
4.1	Kurze theoretische Einführung zur Methodik des Stereoskopischen Verfahrens..	32
4.2	Entwicklung und Konstruktion der Messeinrichtung.....	37
4.3	Beleuchtung der Probenoberfläche.....	39
4.4	Auswahl der Kamera.....	40
4.5	Software.....	40
5.	Genauigkeit des Stereoskopischen Verfahrens.....	43
6.	Ergebnisse.....	46
6.1	Betonbruchflächen .....	46
6.2	Abgefräster Asphalt.....	50
6.3	Betonstraßen.....	56
6.4	Kalkbeschichteter Kalkstein.....	60
7.	Zusammenfassung.....	66
8.	Zukunftsperspektiven.....	66
9.	Literatur.....	69
	Anhang.....	73

# 1. EINLEITUNG:

Schon seit geraumer Zeit kommt der Beschreibung und Kenntnis der Oberflächenbeschaffenheit an verschiedenen Baustoffen große Bedeutung zu, und dies wird sich auch in absehbarer Zukunft nicht ändern. Bei einer Vielzahl verschiedener Anwendungen im Bauwesen stellt die genaue Kenntnis der Baustoffoberfläche die Grundvoraussetzung dar, um die Qualität, ordnungsgemäße Funktion und oft auch Sicherheitsaspekte im Bauwesen zu garantieren, oder beispielsweise eine Weiterverarbeitung der Oberfläche zu ermöglichen.

Besonders die Bestimmung der Oberflächenrauigkeit ist im Bauwesen ein Prozess, welcher nicht außer Acht gelassen werden darf. So ist, nur um einige Beispiele zu nennen, eine Rauigkeitsprüfung bei Materialverbunden von Baustoffen, wie zwischen Alt- und Neubeton, zwischen Mörtel und Ziegel, oder beim Anbringen von Farbanstrichen, oft von wesentlicher Bedeutung, um eine optimale Haftung zwischen Baustoffkomponenten zu bewirken.

Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Diplomarbeit verschiedene Baustoffoberflächen wie zum Beispiel in Österreich häufig befahrene, neue, abgefräste und schadhafte Fahrbahnoberflächen, sowie Waschbetonoberflächen, Betonbruchflächen mit verschiedenem Größtkorn und mit Kalk beschichtete Kalksteinoberflächen im speziellen Hinblick auf die Rauigkeit untersucht.

Vom Standpunkt des Straßenbauwesens aus betrachtet, lassen sich die Eigenschaften einer modernen Fahrbahnoberfläche, insbesondere die Griffigkeit [BLAB R., KIRCHMAIER L., 2007], schon vor dem Einbau durch geeignete Zusammenstellung des Baustoffes, wie zum Beispiel durch die Wahl eines hohen Grobkornanteils der Mineralstoffe, beeinflussen. Um für die gesamte Gebrauchsdauer eines Straßenbelages eine ausreichende Griffigkeit zu gewährleisten ist jedoch die Erhaltung einer entsprechenden Mikro- und Makrorauheit des Baustoffes notwendig (siehe Kapitel 2.3).

Auch bei der Wartung und Sanierung von Straßenoberflächen ist eine genaue Oberflächenkenntnis erforderlich. So ist es im Straßenbauwesen zum Beispiel üblich, abgefahrene oder schadhafte Fahrbahnoberflächen abzufräsen. Bevor auf der abgefrästen Fahrbahnoberfläche eine neue Fahrbahnschicht aufgetragen wird, ist eine Messung der Oberflächenrauigkeit an der abgefrästen alten Schicht sinnvoll, um später einen guten Verbund zwischen alter und neuer Straßenschicht, sicherzustellen.

Ähnliche Gegebenheiten findet man auch in anderen Bereichen des Bauwesens, wo es zum Beispiel Risse im Baustoff gegeben hat, und nachher die Bruchflächen mit geeigneten Bindemitteln wieder zusammengefügt werden sollen. Hier ist ebenso eine genaue Kenntnis der Rauigkeit der späteren Verbundfläche, für die Qualität des Verbundes entscheidend.

Zur Bestimmung der Rauheit an Baustoffoberflächen wurde im Laufe der Zeit eine Vielzahl an Messmethoden entwickelt, unter welchen sich sowohl Feld- als auch Labormessmethoden befinden. In Kapitel 3 der Diplomarbeit werden diese Untersuchungsmethoden genauer erklärt. Es gibt einerseits in der Praxis bewährte Verfahren wie die Sandfleckmethode (siehe Kapitel 3.1), andererseits Methoden deren Ziel darin besteht ein Oberflächenprofil zu gewinnen, wie beispielsweise die Laser-Licht-Schnitt-Technik (siehe Kapitel 3.2), das Streulichtverfahren (siehe Kapitel 3.3) und das Tastschnittverfahren (siehe Kapitel 3.4).

Oftmals wird bei Oberflächenuntersuchungen eine Vor-Ort-Messung oder auch ein zerstörungsfreier Messvorgang (wenn z.B. keine Möglichkeit zur Probenentnahme besteht) verlangt. Somit eignen sich nicht alle Messmethoden in gleichem Maße für die zahlreichen Anwendungsgebiete der Baustoffoberflächenuntersuchung.

Bei der Methode der Stereoskopie wird aus zwei in wohl definiertem Winkel verkippten Bildern einer Oberfläche ein stereoskopisches Abbild dieser Oberfläche erzeugt, welches sehr große Ähnlichkeit zur realen dreidimensionalen Baustoffoberfläche besitzt. Aus diesem stereoskopischen Bild werden dann Oberflächenparameter im speziellen Hinblick auf die Rauigkeit der Oberfläche ermittelt. Die Größe der untersuchten Baustoffoberfläche kann hierbei  $1-50\text{cm}^2$  betragen.

Der große Vorteil der Stereoskopie liegt darin, dass das in der Diplomarbeit entwickelte Untersuchungsgerät einfach zu transportieren ist und die Messung vor Ort und zerstörungsfrei durchgeführt werden kann. Mit Hilfe eines transportablen Computers (handelsübliches Notebook) und geeigneter Software (siehe Kapitel 4.5) können sogar bereits vor Ort erste Auswertungen der Daten vorgenommen werden.

Sind die verkippten Bilder der Oberfläche einmal aufgenommen, so kann deren Informationsgehalt über die jeweiligen Baustoffoberflächen langfristig auf einer Festplatte in digitaler Form gelagert, und auch zu späteren Zeitpunkten im Hinblick auf andere Gesichtspunkte analysiert werden.

## 2. RAUHIGKEIT UND OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN

Jeder Festkörper wird von seiner Umgebung durch seine wahre Oberfläche abgegrenzt. Hierbei gilt zu bedenken, dass sogar der mit größter Sorgfalt und Präzision hergestellte Festkörper von seiner geometrisch idealen Oberfläche abweicht. Das heißt, dass seine Soll-Oberfläche niemals mit hundertprozentiger Genauigkeit erreicht werden kann. Aus diesem Grund ist die Beschreibung der Oberflächengestaltung von Baustoffen mittels eigener Oberflächenparameter besonders wichtig. Abweichungen von der Soll-Oberfläche sind teilweise erwünscht, wie zum Beispiel das zur Verfügung stellen von Rauigkeit auf einer Fahrbahnoberfläche, und teilweise unerwünscht, wie beispielsweise beim Anstreichen oder Lackieren von Baustoffen.

Die Größenordnung der Oberflächenstrukturen des Bauwesens und zahlreichen anderen technischen Anwendungen (z.B. Papierindustrie, Münzprägung, usw.) reicht von wenigen  $\mu\text{m}$  bis in den Bereich von mehreren Metern. Aus diesem Grund werden in der Oberflächenmesstechnik, wie im nächsten Kapitel angeführt, Oberflächen in sich überlagernde, unterschiedlich große Gestaltabweichungen von der idealen Oberfläche gegliedert. Diese führen anschließend zu den Oberflächenparametern (siehe Kapitel 2.2).

### 2.1 Darstellung einer rauhen Oberfläche:

Wie bereits vorhin angemerkt wurde, stellt die Oberfläche eines Festkörpers die Grenze zwischen zwei Medien, wie zum Beispiel einem Baustoff, bzw. einem Werkstück und der Luft, dar.

Da die Herstellung einer völlig glatten Oberfläche technisch nicht realisierbar und in vielen Fällen nicht von Nöten ist, kann jede Oberfläche durch sich überlagernde Gestaltabweichungen von ihrer glatten „Idealform“ dargestellt werden. Anschaulich betrachtet ist eine Oberfläche immer eine „Hügellandschaft“, mit unterschiedlich großen Ausprägungen.

In Abbildung 2.1 sind Gestaltabweichungen von 1. bis 4. Ordnung dargestellt. Gestaltabweichungen 1. Ordnung bezeichnet man als Formabweichung, jene 2. Ordnung als Welligkeit, und jene 3. und 4. Ordnung fallen in den Bereich der Rauhigkeit.

Um die erwähnten Gestaltabweichungen getrennt von einander beschreiben zu können, wurden verschiedene Oberflächenparameter definiert und genormt (siehe Kapitel 2.2). Fast alle genormten Oberflächenparameter beruhen in ihrer Definition auf einem zweidimensionalen Profilschnitt, wie er in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt ist.

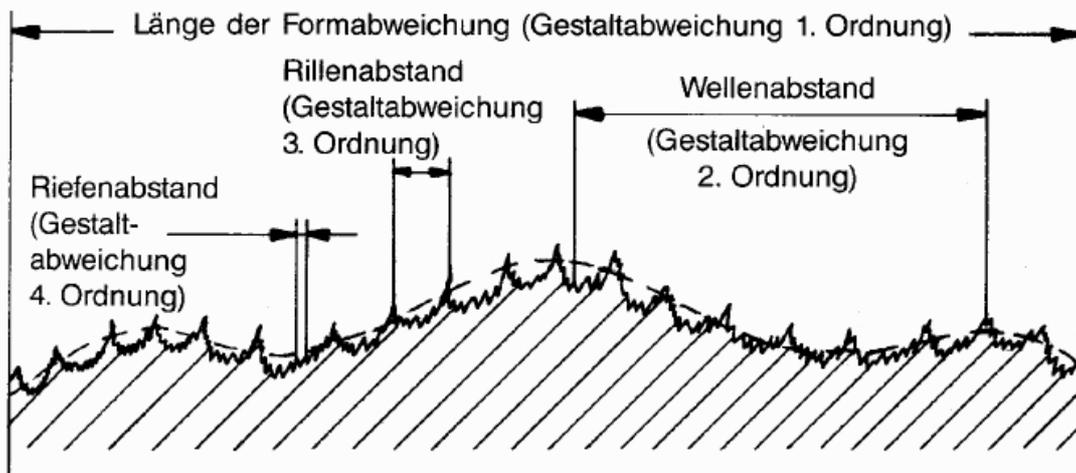


Abb. 2.1: Darstellung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung [MEINKE H., 2004]

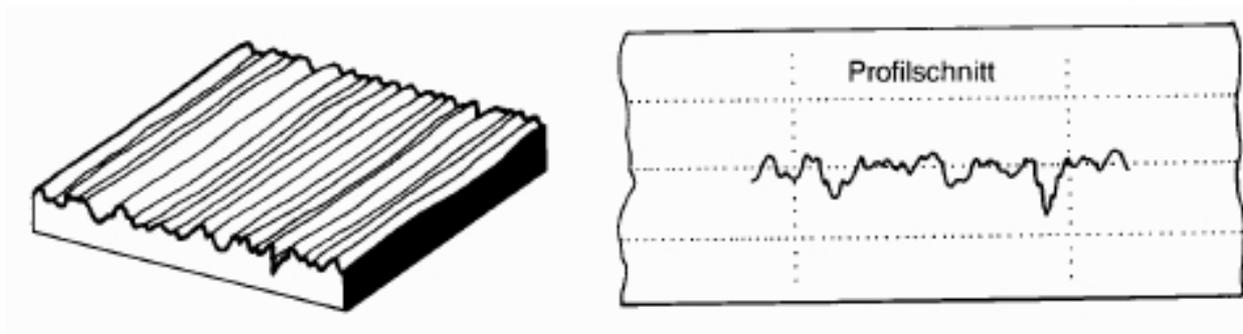


Abb. 2.2: Schematische Darstellung einer dreidimensionalen Baustoffoberfläche (links) und eines aus ihr angefertigten zweidimensionalen Profilschnittes (rechts). [MEINKE H., 2004]

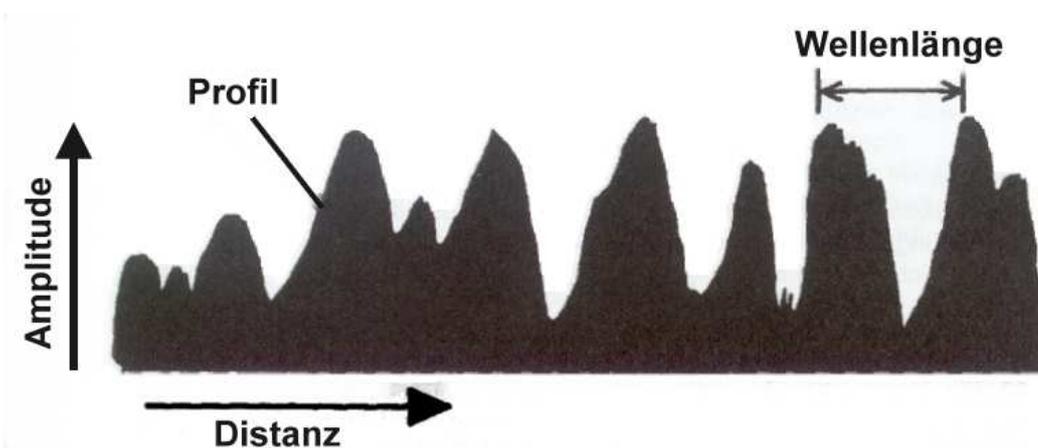


Abb. 2.3: Das Wellenlängenspektrum einer Baustoffoberfläche mit den zugehörigen Bezeichnungen. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist sind die im Profil enthaltenen Wellenlängen großteils unterschiedlich lang, und nicht alle gleichen der eingezeichneten Wellenlänge.

Gestaltabweichungen können in der Physik zum Beispiel durch Wellen approximiert dargestellt werden. Aus den zweidimensionalen Profilschnitten (siehe Abb. 2.2) die in unbearbeiteter Form als „Primärprofil“ bezeichnet werden erfolgt die Berechnung einer Reihe charakteristischer Oberflächenparameter. In der europäischen Norm [EN-ISO-4287] sind diese Parameter angeführt und beschrieben.

Analog zur Wellenlehre der Physik lassen sich in der Oberflächenmesstechnik die Begriffe Wellenlänge, Wellenlängenbereiche und Wellenlängenspektren übernehmen. In Abbildung 2.3 wird das Wellenlängenspektrum am Oberflächenprofil einer Baustoffoberfläche mit den zugehörigen Bezeichnungen, wie Wellenlänge und Amplitude, dargestellt.

Das Primärprofil stellt das unveränderte Wellenlängenspektrum der untersuchten Oberfläche dar und enthält das gesamte erfasste Wellenlängenspektrum. Aus diesem können durch den Einsatz von so genannten „Filtern“ bestimmte Wellenlängenbereiche herausgefiltert werden. Filter sind Vorrichtungen die zur Extraktion bestimmter Wellenlängenbereiche dienen, und kommen auch in anderen Bereichen der Physik, beispielsweise in der Optik, oder in der Elektrotechnik zum Einsatz. Ein gefiltertes Profil erhält man, wenn aus dem Primärprofil ein gewisser Wellenlängenbereich mit Hilfe eines Filters entnommen wird.

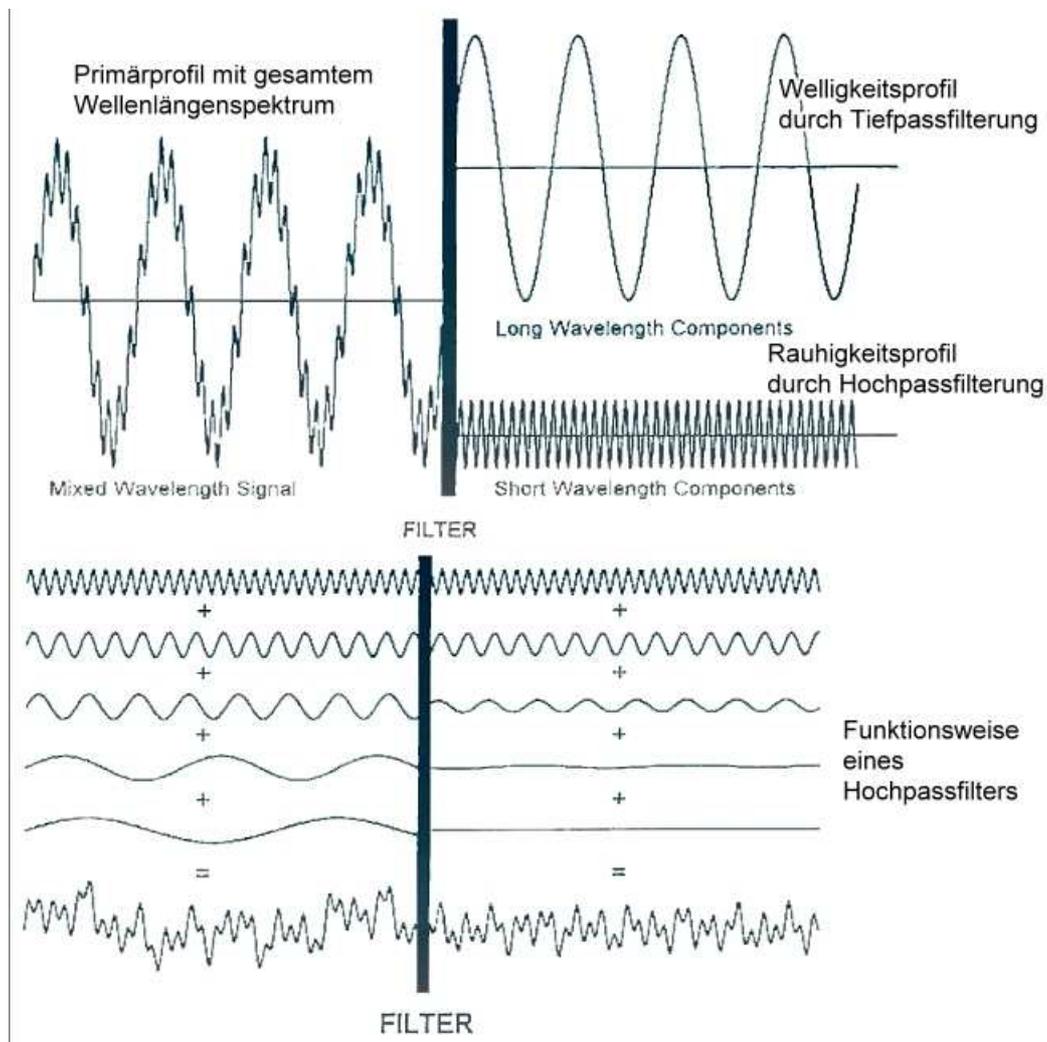


Abb. 2.4: In dieser Abbildung wird die Funktionsweise verschiedener Filter schematisch dargestellt. [ALICONA MeX Software 2005]

Die Erstellung eines gefilterten Profils ist in der Abbildung 2.4 schematisch dargestellt. Der obere linke Teil des Bildes zeigt das Primärprofil mit dem gesamten Wellenspektrum. Aus diesem werden zwei weitere Profile erzeugt. Das Erste mit langsam verlaufenden, großen Höhenänderungen, und das Zweite mit schnell verlaufenden geringen Höhenänderungen. Die beiden durch den Filtervorgang entstehenden, neuen Profile, sind im rechten oberen Teil der Abbildung 2.4 dargestellt. In der Technik werden die beiden Filteroperationen als „Tiefpassfilter“ und „Hochpassfilter“ bezeichnet, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Um ein „Rauigkeitsprofil“ zu erhalten, wird ein „Hochpassfilter“ verwendet. Der „Hochpassfilter“ lässt die kurzwelligen Anteile des Wellenlängenspektrums passieren, und blockiert die langwelligen Anteile. Der Hochpassfilter blockiert somit alle Wellenlängenanteile des Wellenlängenspektrums, die länger als eine bestimmte Grenzwellenlänge  $\lambda_c$  (Cutoff-Wellenlänge) sind. Was nach Anwendung des Hochpassfilters vom Primärprofil noch bleibt, sind die kurzwelligen Anteile des Wellenlängenspektrums, somit die schnell verlaufenden Höhenänderungen an der Baustoffoberfläche. Die Rauigkeitsparameter werden dann aus dem Rauigkeitsprofil bestimmt bzw. berechnet.

Die hochfrequenten (kurzwelligen) Komponenten, die mit dem Hochpassfilter extrahiert werden, entsprechen jenen, die man als rau empfindet, und werden dementsprechend Rauigkeit genannt. Rauigkeit und Welligkeit sind hierbei relative Begriffe (ähnlich wie „hoch“, „tief“, „lang“, „kurz“).

Zusammenfassung:

Hochpassfilter: Dieser lässt kurzwellige (hochfrequente) Komponenten passieren und extrahiert aus dem Primärprofil somit ein Rauheitsprofil.

Das Gegenstück zum „Hochpassfilter“ stellt der „Tiefpassfilter“ dar.

Tiefpassfilter: Dieser lässt langwellige (niederfrequente) Komponenten passieren und extrahiert aus dem Primärprofil somit ein Welligkeitsprofil.

In der vorliegenden Diplomarbeit werden die soeben besprochenen Profile mit Hilfe der Software MeX 4.2 der Firma Alicona an verschiedenen Baustoffen untersucht. Die Software MeX 4.2 wird im Kapitel 4.5 ausführlich besprochen.

Bei der Analyse der Baustoffoberflächen, die mit Hilfe der Software MeX 4.2 vorgenommen wird, kommt ein Hochpassfilter zum Gewinnen des Rauigkeitsprofils zum Einsatz. Die ermittelten Oberflächenparameter zum Primärprofil und Rauigkeitsprofil werden Primärprofilparameter und Rauigkeitsprofilparameter genannt.

Nachdem von der gewünschten Baustoffoberfläche mit der Software ein digitales Abbild erstellt wurde, wird das ihr zugehörige Primärprofil und die Berechnung der Primärprofilparameter von der Software MeX 4.2 automatisch vorgenommen.

Zur späteren Berechnung der Rauigkeitsprofilparameter kommt, wie oben angeführt, ein Hochpassfilter zur Erzeugung des Rauigkeitsprofils zum Einsatz. Hierbei wird die Grenzwellenlänge  $\lambda_c$  passend zum Wellenlängenspektrum des Primärprofils automatisch von der Software vorgeschlagen. Sollte der Wunsch bestehen, eine ganz bestimmte Grenzwellenlänge zu verwenden, kann dieser  $\lambda_c$  - Wert auch manuell eingegeben werden.

Wenn in der Software Mex 4.2 der gewünschte Profiltyp dargestellt wird, können die zugehörigen Oberflächenparameter gemäß der europäischen Norm [EN-ISO-4287], welche zur Charakterisierung von Oberflächen dient, bestimmt werden.

Zwecks übersichtlicherer Darstellung, werden die gemäß der europäischen Norm [EN-ISO-4287] berechneten Oberflächenprofilparameter im nachfolgenden Kapitel 2.2 angeführt und ausführlich erklärt.

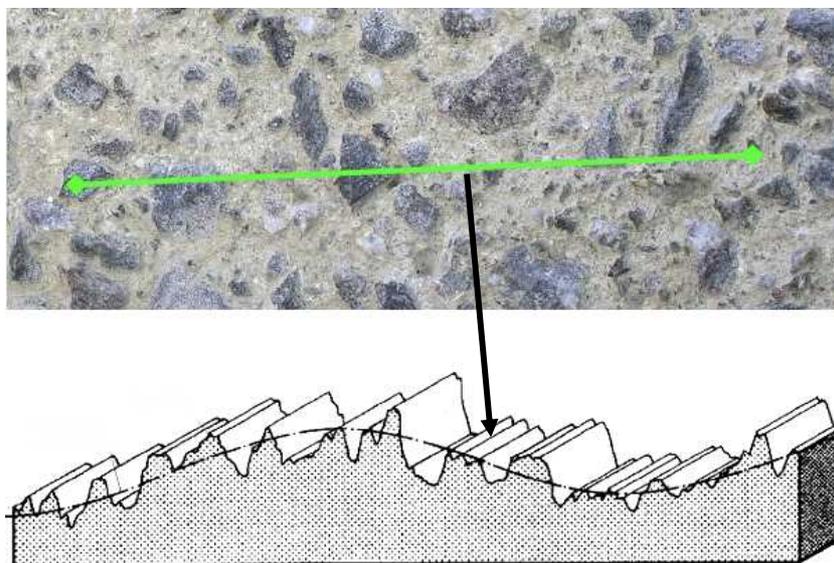
## 2.2. Definition der Rauigkeitsparameter:

In Kapitel 2.1 wurde die Gewinnung eines bestimmten Oberflächenprofiltyps, wie z.B. das Rauheitsprofil, aus dem Primärprofil ausführlich diskutiert und dargestellt. Nun werden die anhand des Primär- und Rauheitsprofils berechneten Oberflächenparameter definiert und erklärt.

Im Allgemeinen ist anzumerken, dass die Software MeX 4.2 (siehe Kapitel 4.5) drei Möglichkeiten zur Untersuchung der stereoskopischen Bilder anbietet. Das sind die Linienanalyse, die Flächenanalyse und die Volumenanalyse, die nun detailliert erklärt werden.

### 2.2.1 Die Linienanalyse

Die Linienanalyse stellt einen einfachen Profilschnitt entlang einer Linie dar, die vom Softwarenutzer beliebig auf der Oberfläche des Baustoffes gelegt werden kann. Entlang dieser Linie wird, anschaulich dargestellt, der Baustoff von der Software „durchgeschnitten“. Danach wird das Profil (wenn es nicht gefiltert wird ist es das jeweilige Primärprofil der Baustoffoberfläche) entlang des Schnittes betrachtet und die Primärprofilparameter untersucht. Die nun folgende Abbildung 2.5 soll dieses Prinzip graphisch verdeutlichen.



*Abb. 2.5: Vom Anwender wird eine Linie markiert. Entlang dieser wird bei der Linienanalyse die Baustoffoberfläche „durchgeschnitten“. Im unteren Teil des Bildes erkennt man das resultierende zweidimensionale Bild des Primärprofils der Oberfläche, aus dem später die Primärprofilparameter gewonnen werden.*

## Primärprofilparameter:

Diese werden direkt aus dem erhaltenen Primärprofil (siehe Kapitel 2.1), also ohne den Einsatz von Filtern, bestimmt. [EN-ISO-4287]

Aus der Abbildung 2.6 können die verschiedenen Größen der Höhen der Primärprofilparameter bestimmt werden:

In horizontaler Richtung:

- L: Länge der Linie, die aus 5 Einzelstrecken „l“ besteht (Für die Bestimmung die Parameter wird meistens die Länge L eingesetzt, nur in seltenen Fällen werden eine oder mehrere Einzelstrecken verwendet)
- l bzw.  $\lambda_c$ : Die Grenzwellenlänge des Profils.  $\lambda_c$  ist jene Wellenlänge, oberhalb derer, wie hier im Falle eines Rauheitsprofils, alle im Profil vorhandenen Wellenlängen unterdrückt werden. In Abb. 2.6 wird  $\lambda_c$  mit l bezeichnet ( $l = \lambda_c$ ).

In vertikaler Richtung:

- Sp: Die größte Höhe der ausgewählten Fläche
- Sv: Die größte Tiefe der ausgewählten Fläche
- St: Die maximale Höhe der ausgewählten Fläche (=Sp+Sv)
- Sml: Mittellinie (Bezugslinie) des Primärprofils. Linie die durch Einpassen der kleinsten Abweichungsquadrate der Nennform in das Primärprofil festgelegt wird. [EN-ISO-4287]

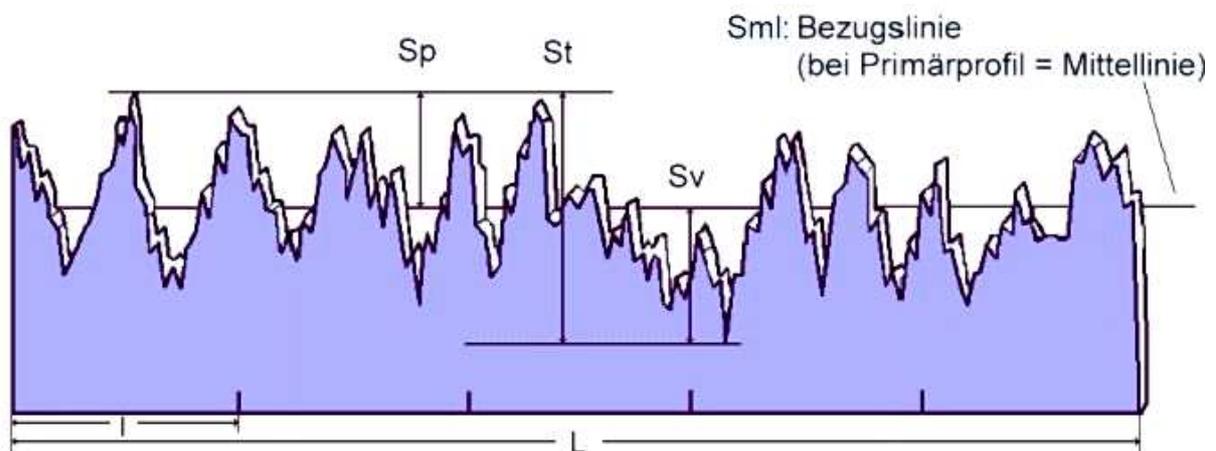


Abb. 2.6: Graphische Darstellung der Primärprofilparameter. Beim Profilschnitt in der Abbildung handelt es sich daher um ein Primärprofil.

In Abb. 2.6 gilt zu beachten, dass die Linie Sml, die durch Einpassen der kleinsten Abweichungsquadrate der Nennform des Primärprofils festgelegt wird, nur aus Gründen der besseren Darstellbarkeit eine Gerade bildet! In der Regel ist Sml eine wellige Linie und keine Gerade (siehe Abb. 2.8, oberer Bildausschnitt).

Im Anschluss an die Primärprofilparameter werden nun die Rauheitsparameter dargestellt, die nach Anwendung eines Hochpassfilters auf das Primärprofil bestimmt werden können.

### Rauheitsprofilparameter:

Um die Rauheitsprofilparameter zu erhalten muss zunächst die Anwendung eines Rauheitsfilters (Hochpassfilter) erfolgen. (siehe Abb. 2.8, bzw. siehe Kapitel 2.1)

Das Rauheitsprofil kann auch als Profil gesehen werden, das entsteht wenn alle Wellenlängen die länger als  $\lambda_c$  sind aus dem Primärprofil entfernt werden und genau die Linie der Wellenlänge  $\lambda_c$  zu einer Geraden „flachgedrückt“ wird (siehe Abb. 2.8, unterer Bildausschnitt). Die Proportion der Abstände von der Profilspitzen und Täler der Oberfläche zu der nun geraden Linie müssen dabei gleich bleiben (in der Technik wird das „phasenrichtiges Filtern“ genannt).

Anhand des Rauheitsprofils können nun die Rauheitsprofilparameter (siehe Abb. 2.9) bestimmt werden (analog zu den Primärprofilparametern).

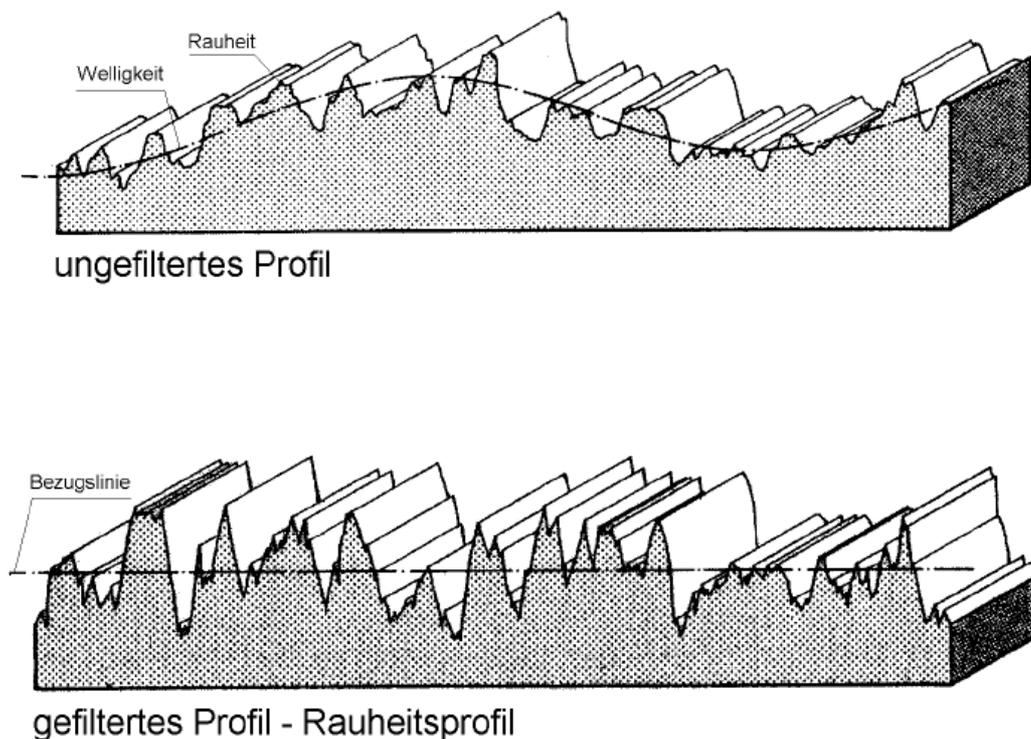


Abb. 2.8: Vergleich von ungefiltertem Primärprofil, und dem mittels Hochpassfilter erzeugtem Rauheitsprofil.

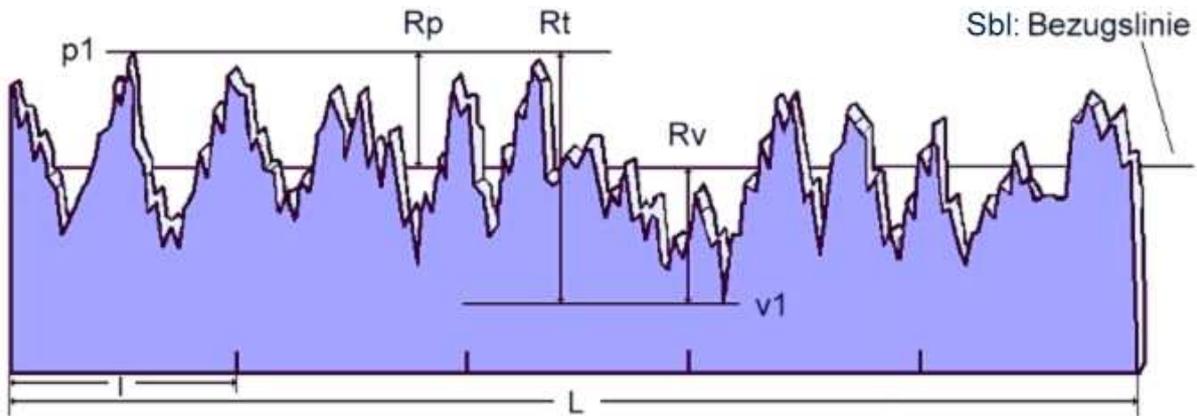


Abb. 2.9: Graphische Darstellung der Parameter  $R_p$ ,  $R_v$  und  $R_t$ . Beim Oberflächenprofil handelt es sich nun um ein mit Hochpassfilter erzeugtes Rauheitsprofil

Die Rauheitsprofilparameter werden in Abb. 2.9 dargestellt, und im folgenden beschrieben:

In horizontaler Richtung:

- $L$ : Länge der Linie, die aus 5 Teillängen „ $l$ “ besteht. Die Teillängen „ $l$ “ entsprechen der Länge  $\lambda_c$  ( $l = \lambda_c$ ).
- $l$  bzw.  $\lambda_c$ : Die Grenzwellenlänge des Profils.  $\lambda_c$  ist jene Wellenlänge, oberhalb derer, wie hier im Falle eines Rauheitsprofils, alle im Profil vorhandenen Wellenlängen unterdrückt werden. In Abb. 2.9 wird  $\lambda_c$  mit  $l$  bezeichnet. ( $l = \lambda_c$ ).

In vertikaler Richtung:

- $R_a$ : Die Durchschnittliche Rauheit, bzw. der Arithmetische Durchschnitt
- $R_p$ : Die Maximalrauheit
- $R_v$ : Die Minimalrauheit
- $R_t$ : Die Gesamthöhe des Profils ( $=R_p+R_v$ )
- $R_z$ : Mittelwert über die Gesamthöhe des Profils über jeweils fünf Grenzwellenlängen  $l$  ( $l = \lambda_c$ ).
- $S_{bl}$ : Bezugslinie des Rauheitsprofils. Linie die den langwelligeren Profiltanteilen entspricht und durch das Profilfilter  $\lambda_c$  unterdrückt wird. („flachgedrückte“ Linie) [EN-ISO-4287]

Bei den in der vorliegenden Diplomarbeit durchgeführten Oberflächenuntersuchungen wurden die eben definierten Parameter  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  und  $R_t$  bestimmt, die auch bei anderen Rauheitsuntersuchungsmethoden (siehe Kapitel 3) häufig eingesetzt werden.

Eine weitere sehr interessante Größe stellt der Parameter  $R_z$  dar, der einen gemittelten  $R_t$ -Wert angibt. Die Gesamte Messstrecke auf der Probenoberfläche wird in viele Einzelmessstrecken der Länge  $l$  unterteilt, die im Rauheitsprofil gemäß [EN-ISO-4287] der Grenzwellenlänge  $\lambda_c$  des Profilfilters entsprechen. ( $l = \lambda_c$ ) und der  $R_z$  Wert stellt den Mittelwert aus den  $R_t$  Werten der Einzelmessstrecken dar.

$R_p$ , die so genannte Maximalrauigkeit ist die Höhe der größten Profilspitze im Rauigkeitsprofil, während  $R_v$ , die so genannte Minimalrauigkeit, die Tiefe des tiefsten Profiltales, über die gesamte Messstrecke  $L$  angibt.

Wenn man parallel zur Bezugslinie des Rauigkeitsprofils durch die höchste Spitze und den niedrigsten Punkt Linien zieht und diese mit den Namen  $p_1$  und  $v_1$  bezeichnet, so ist deren Normalabstand die so genannte Gesamthöhe des Profils  $R_t$ .

Nochmals zusammengefasst, sofern man  $r(x)$  als Ordinatenwert bezüglich der Bezugslinie des Rauigkeitsprofils bezeichnet, bedeutet dies:

$$R_p = [\max[r(x)]] \quad , 0 < x < L \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

$$R_v = [\min[r(x)]] \quad , 0 < x < L \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

$$R_t = R_p + R_v \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

$$R_z = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N R_{pm} + R_{vm} \quad , N \dots \text{Anzahl der Einzelmessstrecken „l“ (bzw. } \lambda c)$$

(Gleichung 2.4)

Ein weiterer Rauheitsparameter von großer Bedeutung ist die so genannte Durchschnittliche Rauheit  $R_a$ . Die Durchschnittliche Rauheit ist die Fläche zwischen dem Rauheitsprofil und seiner Zentrallinie. Graphisch ist  $R_a$  wie in Abb. 2.10 darzustellen.

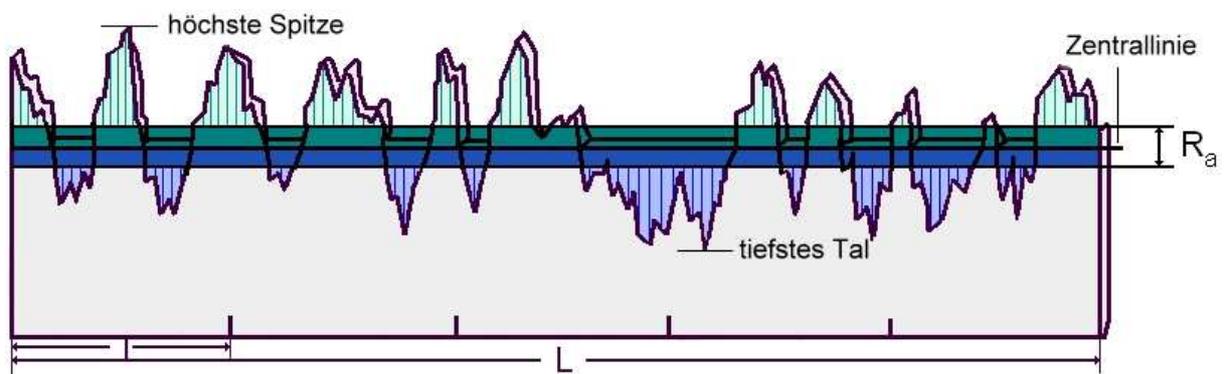


Abb. 2.10: Graphische Darstellung der Durchschnittlichen Rauheit  $R_a$ . [GRÄF V., 2008]

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 der Zentrallinie wird oberhalb dieser in grün und schraffiert dargestellt, und unterhalb dieser in blau und schraffiert. Der grüne und blaue Flächeninhalt werden anschließend als Rechteck mit einer Seitenlänge  $L$  (Messstrecke) 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  $R_a$ .

$$R_a = g + b \quad (\text{Gleichung 2.5})$$

Mathematisch kann man den Ra auch als Integral vom Absolutwert der Rauigkeitsprofilhöhe über die Länge L ausdrücken:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |r(x)| dx \quad (\text{Gleichung 2.6})$$

Für die digitale Auswertung der Daten wird das Integral durch eine Trapezregel approximiert.

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |r_n| \quad (\text{Gleichung 2.7})$$

Zur Durchschnittlichen Rauheit ist zu bemerken, dass sie den am häufigsten verwendete Parameter in der Oberflächengüte-Messung darstellt.

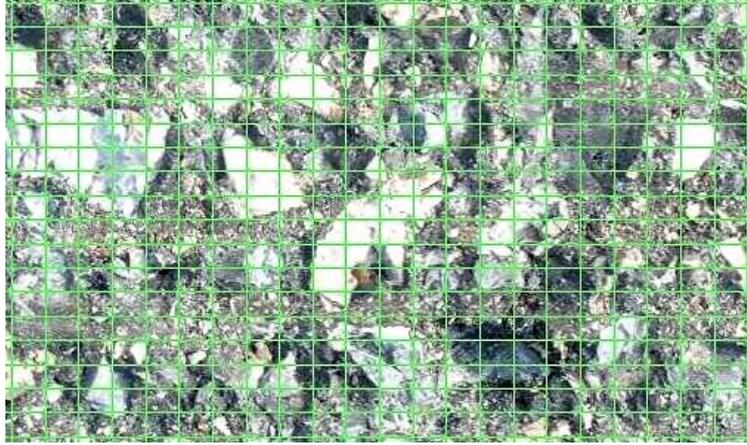
(Papier Industrie, Sandbestrahlung von Kunststoff, Keramik und Metalloberflächen, Implantattechnik in der Medizin, Ultrapräzisionsbearbeitung in der technischen Optik, Fine Machining im Maschinenbau, Straßenbauwesen, u.v.m.)

Da nun der Großteil der Oberflächenparameter, die aus Primärprofil und Rauigkeitsprofil bestimmt werden können, angeführt wurde, wird nun die so genannte Flächenanalyse diskutiert.

### 2.2.2 Die Flächenanalyse:

Die Flächenanalyse stellt eine weitere Möglichkeit dar, die von der Software MeX 4.2 angeboten wird, um eine Oberfläche zu untersuchen. Sie ist eine erweiterte Form der Linienanalyse. Anstelle einer Linie, wird hier vom Programm ein Gitternetz von Linien (die Anzahl der Gitterlinien kann manuell ausgewählt werden, somit sind feinere Gitter mit mehr Linien, bzw. gröbere Gitter einstellbar) auf die Oberfläche gelegt, und entlang der Gitterlinien die Probe wieder „durchgeschnitten“.

Mit der Flächenanalyse ist es somit möglich statistisch aussagekräftigere Oberflächenparameter zu erhalten, da nicht nur der Profilschnitt einer Linie, sondern entlang vieler horizontaler und vertikaler Linien untersucht werden kann. Das Beispiel eines Gitternetzes mit 40 x 40 Linien wird in Abbildung 2.6 aus der Obenansicht auf die Baustoffoberfläche gezeigt. (Die Linienzahl ist in MeX 4.2 vom Anwender einstellbar)



*Abb. 2.5: Das Rastergitter der Software auf der Probenoberfläche (Obenansicht), die von einem Gewaltbruch an Beton stammt. Erkennbar sind jeweils 40 Linien in horizontaler und vertikaler Richtung, entlang welcher Oberflächenparameter berechnet werden.*

Wie aus Abbildung 2.5 ersichtlich, besteht das mit der Software erstellte Gitter, sowie jedes gewöhnliche Gitter aus Linien die senkrecht zueinander stehen. Aus diesem Grund werden die von der Software gewonnenen Oberflächenprofildaten in horizontale und vertikale Daten unterteilt, und somit die horizontalen und vertikalen Profilschnitte separat behandelt.

Da bei den in der vorliegenden Diplomarbeit untersuchten Baustoffoberflächen keine Vorzugsrichtungen mit spezieller Oberflächengestaltung bzw. keinerlei richtungsabhängige Besonderheiten auftreten, wird bei der Verwendung der Flächenanalyse immer ein Mittelwert über die aus horizontalem und vertikalem Primär- bzw. Rauheitsprofil gewonnenen Oberflächenparameter gebildet.

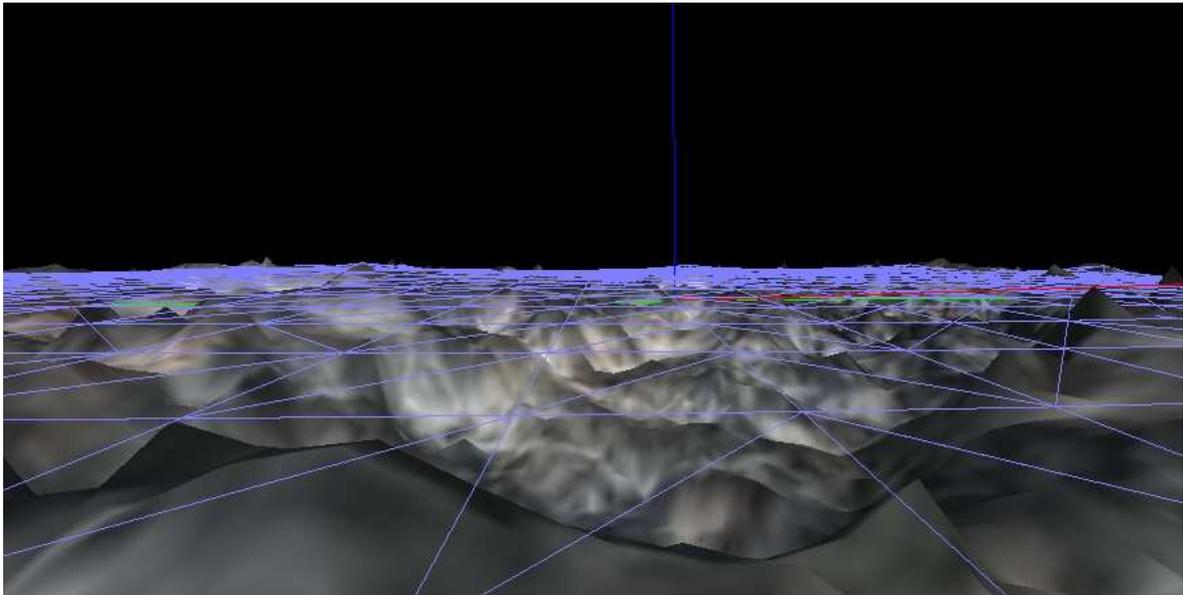
Die Flächenanalyse funktioniert im Prinzip wie die oben angeführte Linienanalyse. Sie ist für die Untersuchung von Oberflächen effizienter, da anstelle vieler hintereinander durchgeführter einzelner Linienanalysen ein großer Teil der Fläche mit einem Gitter aus (Einzel-)Linien analysiert werden kann. Aus den somit gewonnenen Primär- und Rauheitsprofilen werden anschließend die in diesem Kapitel bereits detailliert erklärten Oberflächenparameter gemäß der Europäischen Norm [EN-ISO-4287] bestimmt.

Sämtliche in der Diplomarbeit analysierten Baustoffoberflächen wurden mit der Flächenanalyse untersucht.

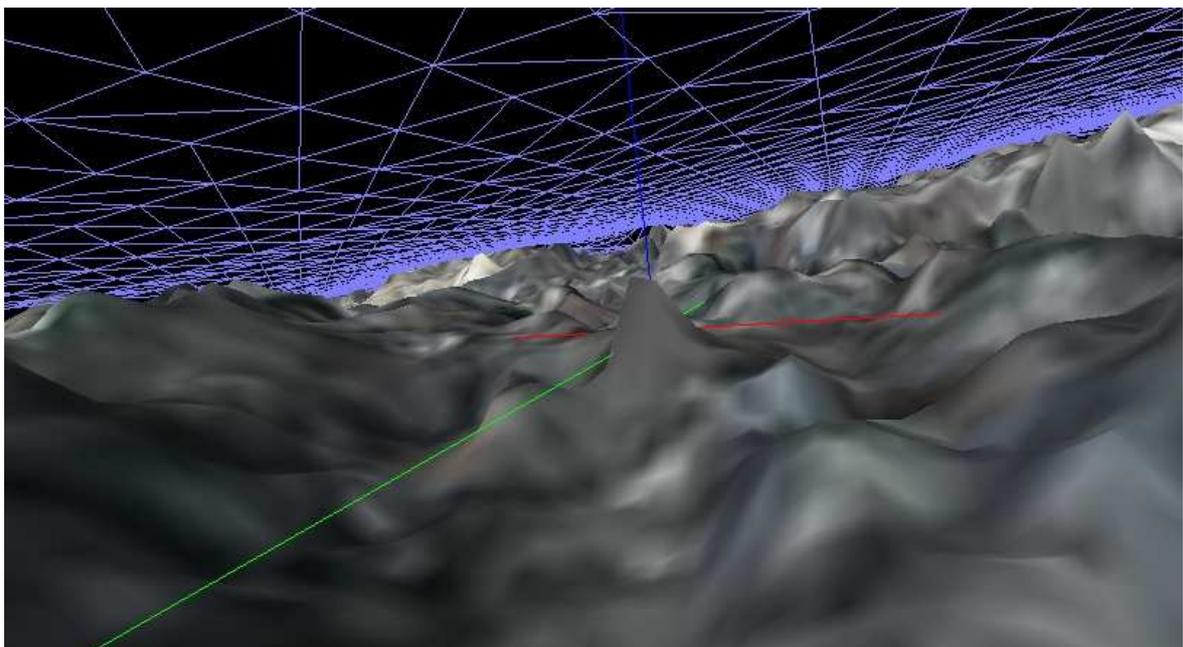
### **2.2.3 Die Volumenanalyse:**

Bei der Volumenanalyse bietet die Software MeX 4.2 die Möglichkeit an, ein simuliertes „Drahtgitternetz“ auf die „Wahre Oberfläche“ (WF) zu legen, und das zwischen der Unterseite des „Drahtgitternetzes“ und der „Wahren Oberfläche“ (WF) eingeschlossene Volumen zu bestimmen. Dadurch kann das so genannte Sandflächenverfahren (bzw. „Sandfleckmethode“) [KAUFMANN N., 1970] (siehe Kapitel 3.1), bei der ein wohl definiertes Volumen (Sand) auf einer Oberfläche bekannter Größe verteilt wird, virtuell am Computer, simuliert werden.

Mit der Software wird zunächst aus der Obenansicht auf die Oberfläche ein Bereich in der Größenordnung von 1 bis 40 cm<sup>2</sup> markiert. Diesen markierten Bereich bezeichnen wir als „Projizierte Fläche“ (PF). Danach simuliert die Software ein „Drahtgitter“ im Bereich der „Projizierten Fläche“, das auf die Profilspitzen („Berge“) gelegt wird und dadurch natürlich die Profiltäler unter sich begräbt. Das Drahtgitter verhält sich ähnlich einem Netz, das über die Probenoberfläche geworfen wird. Zwischen der Gitterfläche und dem Abbild der Probenoberfläche (also der Gesamtheit an „Bergen“ und „Tälern“) befindet somit ein mehr oder weniger großes Volumen, das mit der Markierung eines Bereiches der Baustoffoberfläche von Seitenwänden eingeschlossen wird. Die Abbildungen 2.11 und 2.12 sollen hierzu einen optischen Eindruck vermitteln.



*Abb. 2.11: Zu sehen ist in hellblau das Drahtgitter das auf den Spitzen des Abbildes der Probenoberfläche liegt. Das hellblaue Gitter liegt auf den Spitzen der rauhen Oberfläche.*



*Abb. 2.12: Der Bildausschnitt befindet sich zwischen den Grenzflächen der Drahtgitterfläche und Probenoberfläche, also „im eingeschlossenen Volumen“. Beim Sandfleckverfahren würden sich in dieser Schicht die Sandkörner befinden.*

Da die Größe der „Projizierten Fläche“ automatisch von der Software berechnet wird, ist es problemlos möglich das eingeschlossene Volumen durch die „Projizierte Fläche“ (PF) zu dividieren (siehe Gleichung 2.8), und somit den Rauhtiefewert des Sandfleckverfahrens [KAUFMANN N., 1970], mit größerer Genauigkeit in Bezug auf Volumen und Fläche, als bei der praktischen Ausführung der Sandfleckmethode, zu bestimmen (siehe Kapitel 3.1).

Hierbei gilt aber zu beachten dass die Genauigkeit des simulierten Rauhtiefewertes natürlich von der Genauigkeit des Abbildes der Oberfläche abhängt.

$$RTS = V / PF \quad (\text{Gleichung 2.8})$$

RTS ... Rauhtiefewert – Simulation

*(stellt den zur Sandfleckmethode analogen Rauhtiefewert, am Computer simuliert dar)*

V ... Volumen [mm<sup>3</sup>]

*(bezieht sich auf das zwischen simuliertem „Drahtgitternetz“ und Baustoffoberfläche eingeschlossene Volumen)*

PF ... Projizierte Fläche [mm<sup>2</sup>]

*(Die Größe der Fläche auf der das „Drahtgitternetz“ aufgelegt wird. Graphische Darstellung von PF (siehe Abb. 2.7))*

Ein weiterer Oberflächenparameter, der in der vorliegenden Diplomarbeit bei allen Untersuchungen ermittelt wird, ist das Verhältnis von Wahrer Fläche zu Projizierter Fläche. Dieses entsteht wenn man die Wahre Fläche (WF) durch die Projizierte Fläche (PF) dividiert.

Die Projizierte Fläche stellt, wie vorhin angeführt, jene Fläche dar, die entsteht, wenn man aus der Obenansicht auf eine Fläche einen Bereich markiert. Die Wahre Fläche entspricht jener Fläche die entstehen würde, wenn die Formabweichungen im Oberflächenprofil gedanklich „glatt walzt“ werden.

Die Wahre Fläche ist normalerweise immer größer als die Projizierte Fläche, oder , falls es sich bei der Baustoffoberfläche wirklich um eine mathematisch perfekte Ebene handelt, gleich groß wie die Projizierte Fläche. Dies wird in Abb. 2.13 aus seitlicher Ansicht zweidimensional dargestellt.

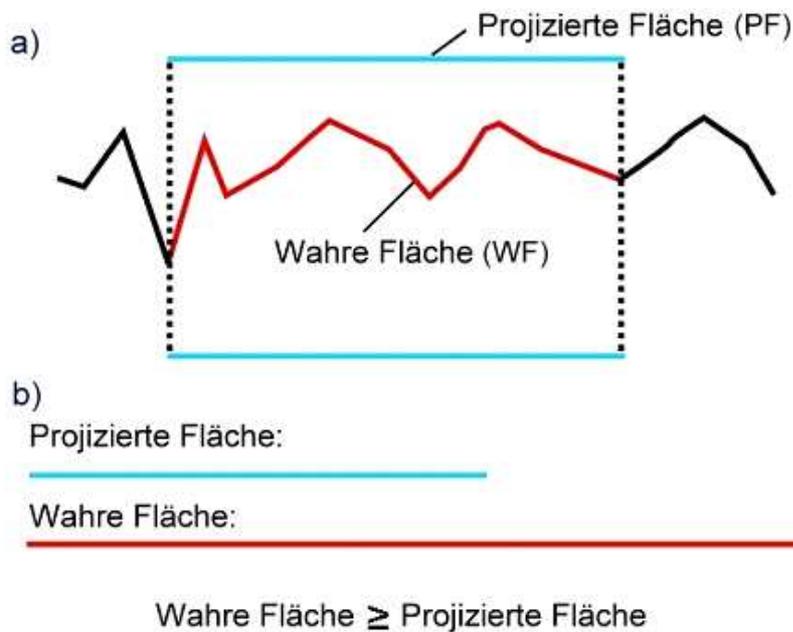


Abb. 2.13: Oberer Teil der Abbildung a): Zweidimensionale Darstellung von Wahrer Fläche und Projizierter Fläche. Wäre die zu Probenoberfläche eine perfekte Ebene, so wären Wahre Fläche und Projizierte Fläche gleich groß, und das Verhältnis Wahre Fläche zu Projizierter Fläche  $WF/PF = 1$ .

Unterer Teil der Abbildung b): Würde man die Wahre Fläche gedanklich zu einer Ebene „glatt walzen“ („strecken“) wäre diese größer, bzw. im Extremfall gleich groß wie die Projizierte Fläche, aber niemals kleiner.

## 2.3 Rauigkeit und Welligkeit im Überblick:

Da sich ein großer Teil der Diplomarbeit mit Oberflächenuntersuchungen an Fahrbahnen auseinandersetzt, ist es sinnvoll einen Überblick über die Fachbegriffe des Bauwesens zu bekommen.

### 2.3.1 Rauigkeit von Fahrbahnoberflächen:

Bei der Vermessung der Oberflächeneigenschaften von Fahrbahnen gehören ihre geometrische Gestalt, sowie die Oberflächeneigenschaften zu den maßgebenden und entscheidenden Charakteristika und verdienen daher besondere Aufmerksamkeit. Zu den wichtigsten in dieser Arbeit behandelten Oberflächeneigenschaften gehören jene, die zur Verkehrssicherheit und zum Fahrkomfort entscheidend beitragen.

Dies sind Oberflächeneigenschaften wie die „Griffigkeit“, der aus sicherheitstechnischen Gründen große Bedeutung zukommt, und die „Ebenheit“, die entscheidend für den vom Fahrbahnutzer gespürten Fahrkomfort ist.

### - Ebenheit:

Unter dem Begriff Ebenheit versteht man die geometrischen Eigenschaften der Straßenoberfläche im Bezug auf die Abweichung von einer gedachten idealisierten Fläche, wobei man die Belagstextur nicht berücksichtigt. Die Ebenheit lässt sich in Längs- und Querebenheit unterteilen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur die Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche bestimmt. Zur Bestimmung der Ebenheit sind Verfahren notwendig die Strecken über mehrere, bzw. mehrere hundert Meter untersuchen. [NEUBAUER, 1995]

### - Längsebenheit:

Die Größe der Längsebenheit kann durch Winkelmessmethode bzw. durch Bestimmung des International-Roughness-Index-Wert (kurz IRI-Wert) bestimmt werden. [NEUBAUER, 1995]

### - Winkelmessmethode:

Der Winkelmesswert  $W$  beschreibt den Winkel, der von zwei gedachten Geraden auf der Straßenoberfläche gebildet wird. Die Geraden werden durch drei Punkte im Straßenlängsprofil im Abstand von je einem Meter gebildet (siehe Abb. 2.14). Die Messung der Ebenheit wird vom Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich das Winkelmessgerät „ISETH“ verwendet. Dieses Gerät führt die Ebenheitsmessung anhand dreier vertikal verschiebbarer Messräder im Abstand von jeweils einem Meter durch.

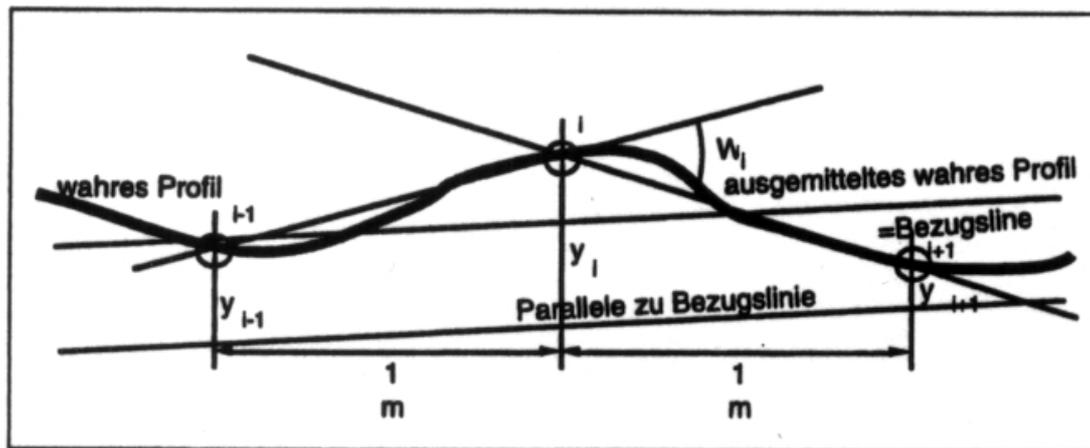


Abb. 2.14: Darstellung der Winkelmessmethode und ihrer Parameter.  
[CAPREZ M., 1995]

### - IRI – Ebenheitswert (International-Roughness-Index):

Der IRI – Ebenheitswert entstand im Jahre 1982 im Rahmen eines Straßenebenheitsversuches in Brasilien. Er beruht auf dem Prinzip der Messung der Vibrationen eines Fahrzeuges, welches mit definierter Geschwindigkeit über die zu vermessende Strecke fährt. Anhand der Schwingungen wird ein Primärprofil der Fahrbahnoberfläche erstellt.  
[NEUBAUER, 1995]

### - Querebenheit:

Die Querebenheit wird bei der Beschreibung von Oberflächeneigenschaften durch die beiden Parameter „größte Muldentiefe gegenüber der Verbindungslinie der höchsten Punkte unter der 4 Meter Latte (T in [mm])“ und der „theoretischen Wassertiefe, als Muldentiefe gegenüber dem Horizont (t in [mm])“ bestimmt (siehe Abb. 2.15).

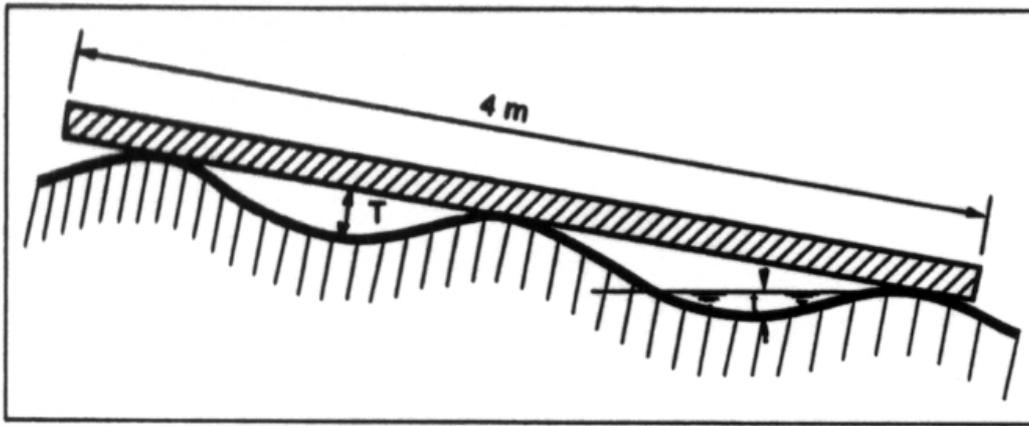


Abb. 2.15: Darstellung der 4m – Latte mit T- und t-Wert.  
[CAPREZ M., 1995]

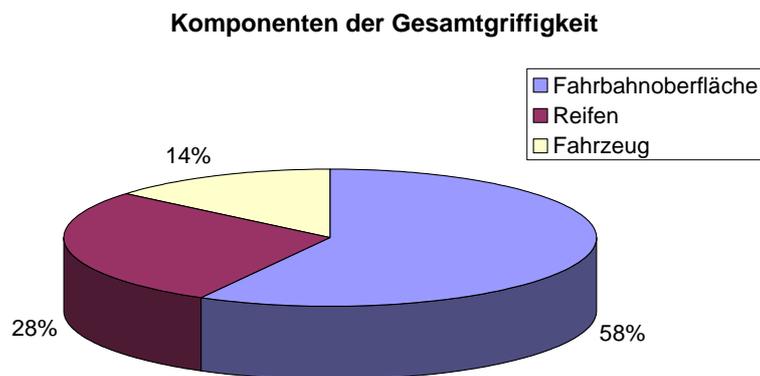
### 2.3.2 Griffigkeit:

Die oben erwähnten Oberflächeneigenschaften wie Längs- und Querebenheit beziehen sich auf die Abweichung von einer idealen, gedachten Fläche, ohne im speziellen auf die Oberflächentextur der Straße einzugehen. Diese Betrachtungsweise ändert sich ab jenem Zeitpunkt, ab dem man der „Griffigkeit“ Beachtung schenkt. Hier wird auch die Textur der Oberfläche, beziehungsweise die Rauheit in die Problematik miteinbezogen. Im Gegensatz zur Ebenheit sind bei der Betrachtung der Textur, somit der Rauheit, Abmessungen im Bereich von einigen  $\mu\text{m}$  bis hin zu wenigen cm erforderlich, was sich mit dem in dieser Arbeit verwendeten stereoskopischen Verfahren ermöglichen ließ.

Die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche hängt wesentlich von den Komponenten Mikro- und Makrotextur der Straßenoberfläche ab. Die so genannte Mega-, Makro-, und Mikrotextur werden in diesem Kapitel etwas später genauer betrachtet. Zunächst folgt eine Auseinandersetzung mit der Bedeutung des Wortes „Griffigkeit“.

Unter dem Begriff der „Griffigkeit“ einer Fahrbahnoberfläche versteht man die Eigenschaft der Oberfläche, bei der Berührung zwischen Fahrzeugreifen und Straßenoberfläche Reibungskräfte aufzubauen, und somit einen Widerstand zu aktivieren. Dieser Widerstand wird vor allem beim Auftreten eines Nässefilms deutlich reduziert. Die Kraftübertragung von Reifen auf Straße wird im Hinblick auf die Straßenoberfläche durch deren Griffigkeit bestimmt.

Zur Griffigkeit, die zwischen Fahrbahnoberfläche und Fahrzeug aufgebaut wird, tragen eine Vielzahl an Komponenten bei, die nachfolgend mit Verweisen auf entsprechende Literatur kurz angesprochen werden. In Abbildung 2.16 werden die wichtigsten Komponenten, die zur Griffigkeit beitragen, nach ihrer Wichtigkeit dargestellt.



*Abb. 2.16: Darstellung der Einzelkomponenten aus denen sich die Gesamtgriffigkeit zusammensetzt. [BLAB R., KIRCHMAIER L., 2007]*

Einzel angeführt sind die wichtigsten Komponenten die Adhäsionsreibung [KUMMER et al., 1967], die Hysteresereibung [KUMMER et al., 1970, 1967], der Kohäsionsreibverlust [GEYER, 1972], der Viskose Reibkraftanteil [GEYER, 1972] und der Schlupf [KALENDER U., 1987].

Weiters tragen zur Griffigkeit auch Einflüsse des Reifens (Gummizusammensetzung, Luftdruck, Profilart, Profiltiefe) [KALENDER U., 1987], [BACHMANN, 1998], [REIMPELL, 1971], Einflüsse eines Zwischenmediums (Wasserfilm, Schmutzfilm, Eis, Schnee, Öl) [KALENDER, 1987], Einflüsse der Jahreszeit [HUSCHEK S., 1995] und Einflüsse des Fahrzeuges bei (Geschwindigkeit, Radlast, Reifenstellung) [PFEILER A., 2004].

### 2.3.3 Textur:

Mit dem Begriff „Textur“ (oft auch Rauigkeit genannt) fällt das Hauptaugenmerk der Untersuchungsmethoden auf die so genannte Feingestalt der Fahrbahnoberfläche.

Bei der Textur handelt es sich um die geometrische Feingestalt der Straßenoberfläche, ausgedrückt durch die Parameter Amplitude und Wellenlänge. Die Textur hängt nicht nur von den Eigenschaften des Materials aus dem die Straßenoberfläche gefertigt wurde ab, sondern wird bereits beim Fertigungsvorgang selbst beeinflusst. (richtige Dosierung von Bindemittel, Witterung, Temperatur, korrekte Funktion der Baugeräte, etc.) [CAPREZ, 1995]

Ausgehend von der Textur werden andere wichtige Eigenschaften von der Straßenoberfläche beeinflusst. Dies sind Eigenschaften wie die Griffigkeit, das Reifenrollgeräusch und die Sprühhahnenbildung.

Wie in Abb. 2.15 gezeigt wird, stellt die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche, somit die Textur die für die Gesamtgriffigkeit hauptverantwortliche Komponente dar, weshalb sich die vorliegende Arbeit, speziell auf die Beschreibung der Textur bzw. Oberflächenrauheit konzentrierte.

Wie in Abb. 2.16 gezeigt wird, unterteilt man die Gesamttextur nach der Wellenlänge des Oberflächenprofils in Mega-, Makro-, und Mikrotextrur.

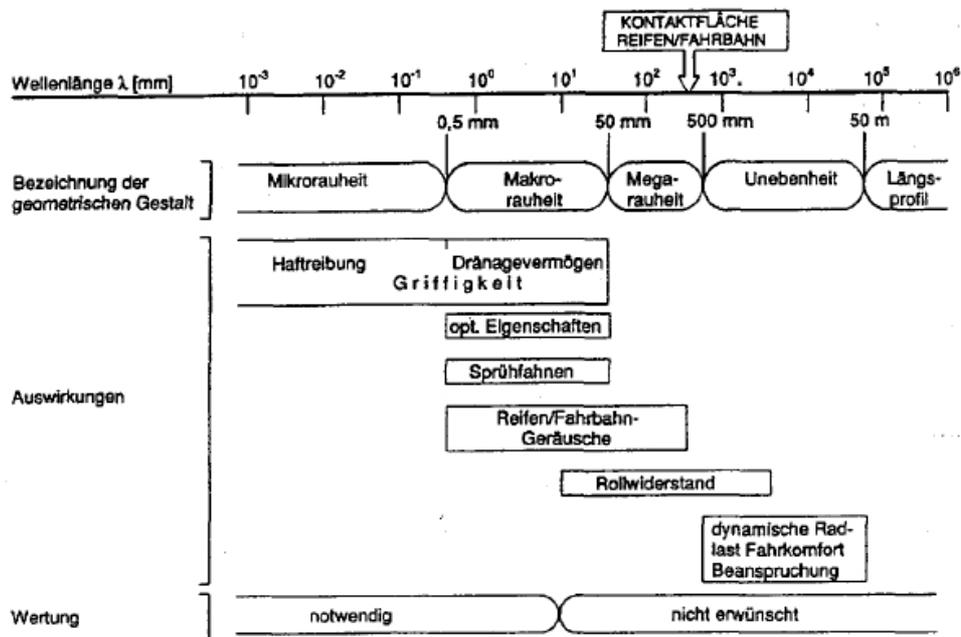


Abb. 2.16: Wellenlängenspektrum der Fahrbahnoberfläche und Auswirkungen auf Gebrauchseigenschaften. [HUSCHEK S., 1996b]

### 1) Megatextur:

Die Megatextur wird durch Rauigkeitselemente mit horizontaler Ausdehnung in der Größenordnung von 50mm bis 500mm beschrieben. Sie ist vor allem im Hinblick auf die Längsunebenheit von essentieller Bedeutung. Die Megatextur ist unter anderem für das Reifenrollgeräusch, den Rollwiderstand und die Bildung von Sprühfahnen durch Wasseransammlung in Längsunebenheiten verantwortlich.

### 2) Makrotextur:

Die Makrotextur definiert sich durch Rauigkeitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung in der Größenordnung 0,5mm bis 50mm. Sie ist für das Drainagevermögen der Straßenoberfläche verantwortlich. Ausgeprägte Makrotexturen zeichnen sich durch eine grobporige Oberfläche aus, welche die Aufgabe besitzt, vor allem bei großen Geschwindigkeiten das Reifenprofil beim Abführen des Wassers aus der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche zu unterstützen. Sie ist hauptsächlich von der Korngrößenverteilung und dem Größtkorn, sowie der gewählten Deckenart abhängig.

### 3) Mikrotextur:

Die Mikrotextur wird durch Rauigkeitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung unter 0,5mm definiert. Sie ist stark von der Kornoberfläche des verwendeten Gesteins abhängig und hat die Aufgabe einen möglicherweise vorhandenen Wasserfilm in der Reifenaufstandsfläche zu durchdringen und dadurch trockenen Kontakt zu den Profilstollen des Reifens herzustellen.

Wie aus obigen Bereichen ersichtlich ist, reichen die Oberflächenstrukturen vom Bereich weniger  $\mu\text{m}$  bis in den Bereich mehrerer Meter. In dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf der Untersuchung der Bereiche Mikrorauheit und Makrorauheit und jener Bereich wo die beiden aneinander Grenzen. Bereiche wie die Megarauheit bzw. Bereiche der Ebenheit werden in dieser Arbeit nicht untersucht.

In Kapitel 6 wird die Oberflächenbeschaffenheit im Bezug auf die Rauigkeit von Betonstraßen, abgefrästen Asphaltfahrbahnoberflächen, Gewaltbruchoberflächen und kalkbeschichteten Kalkproben untersucht.

Bevor die Funktionsweise der Stereoskopie (siehe Kapitel 4) erklärt wird, wird eine Reihe alternativer Oberflächenuntersuchungsverfahren, die in der Praxis oft Anwendung finden, betrachtet (siehe Kapitel 3).

### 3. MESSVERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER OBERFLÄCHENGESTALTUNG:

Zur Bestimmung der Oberflächengestalt wurden im Laufe der Jahre viele verschiedene Messverfahren entwickelt, um unter möglichst praxisnahen Bedingungen zu messen. Eine genaue Behandlung aller zum Einsatz kommenden Messmethoden würde allerdings den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen, weshalb sich dieses Kapitel auf einige in der Literatur besonders häufig anzutreffende Verfahren konzentriert.

Man unterscheidet hierbei Verfahren zur direkten Bestimmung der Rauheit von Baustoffoberflächen, wie zum Beispiel die Sandfleckmethode, die Laserlichtschnitttechnik, das Streulichtverfahren und das Tastschnittverfahren.

Alternativ zu obigen Methoden gibt es vor allem im Straßenbauwesen kombinierte Messmethoden zur Bestimmung des Reibungsbeiwertes. Hierzu zählen das SRT-Pendel, das Skiddometer und der Stuttgarter-Reibungsmesser (SRM) [MAURER P., 2007], wo fahrzeugspezifische Aspekte wie Reifenprofil, Geschwindigkeit, usw. in den Messvorgang mit einfließen. Letztendlich wird bei diesen Methoden nicht die Rauigkeit der Oberfläche, sondern die vorhandene Griffigkeit gemessen.

Im Folgenden wird auf einige der gängigsten Methoden zur direkten Bestimmung der Oberflächenrauheit eingegangen.

#### 3.1 Sandfleckverfahren:

Das Sandfleckverfahren ist weltweit bereits seit vielen Jahren im Einsatz, um die so genannte „Rauhtiefe“ einer Oberflächentextur zu messen, und diese anhand der Größe des Rauhtiefewertes zu charakterisieren. [KAUFMANN N., 1970]

Beim Sandfleckverfahren wird ein bestimmtes Volumen aus Sand, beziehungsweise aus sehr kleinen Glaskugeln, auf die zu vermessende Oberfläche gestreut und anschließend mit einer stempelförmigen Holzscheibe möglichst kreisförmig verteilt (siehe Abb. 3.1).

Die Oberfläche, auf der die Sandfleckmethode durchgeführt wird, muss natürlich sauber sein und ist gegebenenfalls von gröberer Verschmutzung mit einer Drahtbürste zu reinigen.

Der Sandverteilungsvorgang mit dem Holzkörper endet, sobald durch die kreisförmige Bewegung kein Sand mehr nach außen verteilt werden kann.

Von diesem möglichst kreisförmigen Fleck wird ein Durchmesser bestimmt, und dann das Volumen des verteilten Materials durch die Fläche dividiert, um die oben erwähnte Rauhtiefe, meist in [mm] zu erhalten.

$$R = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2} \quad (\text{Gleichung 3.1})$$

*R ... Rauhtiefe*

*V ... Volumen*

*d ... Durchmesser des kreisförmigen Fleckes*

In der Praxis kommt es bei der Bewertung eines gleichmäßigen Oberflächenbelages zur Vermessung von 5-10 Stellen. Das verteilte Volumen beträgt meist  $10\text{cm}^3$ .

Der Hintergrundgedanke bei dieser Methode ist denkbar einfach. Ist die untersuchte Oberfläche eher fein strukturiert, kann der Sand nicht tief in die Unebenheiten eindringen und kann auf der Oberfläche weit verteilt werden. Hierdurch ergibt sich ein großer mittlerer Durchmesser des Kreises und ein geringer Wert für die Rauhtiefe.

Handelt es sich bei der untersuchten Oberfläche hingegen um eine sehr grobe Fläche, so dringt der Sand tief in deren Unebenheiten ein, und der mittlere Durchmesser des Kreises ist geringer, während der Wert der Rauhtiefe groß sein wird.

Wie in der vorliegenden Arbeit ein wenig später beschrieben wird, ermöglicht der Einsatz des Stereoskopischen Verfahrens mit der „Volumenanalyse“ (siehe Kapitel 2.2) eine Computersimulation der Sandfleckmethode, bei der über einen beliebig großen Ausschnitt der erfassten Fläche ein wohl definiertes Volumen aufgebracht wird.

Die Beurteilung des Rauhtiefewertes (nicht der Wert selbst) kann sich je nach Bauart der Fahrbahnoberfläche und dem verwendeten Material unterscheiden, was einen schnellen internationalen Vergleich erschwert. Auf Grund dieser Problematik gibt es eine Vielzahl nationaler und internationaler Normen zur Beurteilung der bei unterschiedlichen Fahrbahntypen bestimmten Rauhtiefewerte.



*Abb. 3.1: Praktische Ausführung der Sandfleckmethode. [ÖNORM-EN-13036-1]*

*Als Beispiel wird hier vom Road Research Laboratory die Bewertung englischen Walzasphaltes angeführt. [MORRIS, 1968]*

<i>Bewertungsmaßstab:</i>	
<i>Rauhtiefe</i>	<i>Bewertung</i>
<i>3,5mm</i>	<i>ausgezeichnet</i>
<i>2,2mm</i>	<i>sehr gut</i>
<i>1,5mm</i>	<i>gut</i>
<i>1,1mm</i>	<i>ziemlich gut</i>
<i>0,9mm</i>	<i>befriedigend</i>
<i>0,7mm</i>	<i>unbefriedigend</i>

### 3.2 Laserlichtschnitttechnik – Triangulationsverfahren:

Die Laserlichtschnitttechnik ist eine Methode der Oberflächenmesstechnik, bei der ähnlich zur Stereoskopiemethode (siehe Kapitel 4) ein Oberflächenprofil (siehe Kapitel 2) gewonnen wird, und anschließend daraus Oberflächenparameter (siehe Kapitel 2.2) bestimmt werden können.

Bei der Lasermessung wird ein Infrarot Lasermesskopf, der an einer linearen Vorschubseinheit befestigt ist, bewegt. Alternativ kann auch der Probentisch auf dem die Probe befestigt wird bewegt werden (siehe Abb. 3.2). Der Messkopf besteht aus einer Laserdiode, die einen Laserstrahl durch eine Linse auf die zu vermessenden Oberfläche wirft. Auf der Oberfläche entstehen somit Lichtpunkte. Die Kamera registriert die Verformung einer im  $45^\circ$ -Winkel auf die Probenoberfläche projizierten Laserlinie (siehe Abb. 3.2 und 3.3). Die Abweichung der Laserlinie (Abb. 3.3 Bildausschnitt A) von der Nulllage liefert das Oberflächenprofil. Das vom Oberflächenprofil diffus zurück gestreute Licht wird von einer geeigneten Optik aufgenommen.

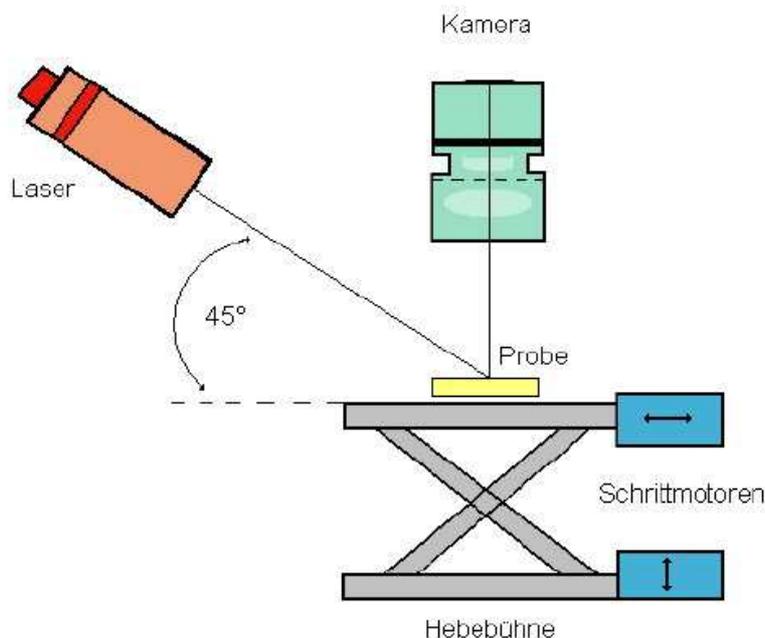
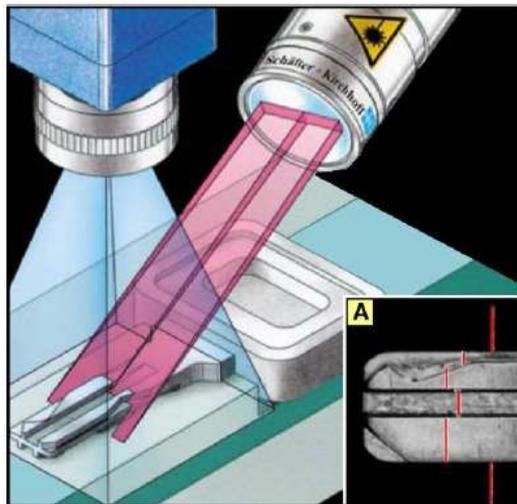


Abb. 3.2: Schematische Darstellung des Laserlichtschnitt- / Triangulationsverfahrens.  
[GRÄF V., 2008]

Bei Höhenveränderungen auf der Oberfläche kommt es zu Veränderungen in der Abbildung der Laserlichtlinie auf dem Fotodetektor. (siehe Abb. 3.3)



*Abb. 3.3: Funktionsweise der Laserlichtschnitttechnik. In Bildausschnitt A erkennt man dass die Laserlichtlinie auf verschiedenen Höhen der Oberfläche unterschiedlich abgebildet wird. [GRÄF V., 2008]*

Die Verschiebung der Linie im Kamerabild wird mit den Methoden der Photogrammetrie von der Software in 3-D-Koordinaten umgerechnet. Da keine Farbinformation für die dreidimensionale Auswertung notwendig ist, und wegen der höheren räumlichen Auflösung bei gleicher Pixelzahl, benutzt man Schwarzweißkameras.

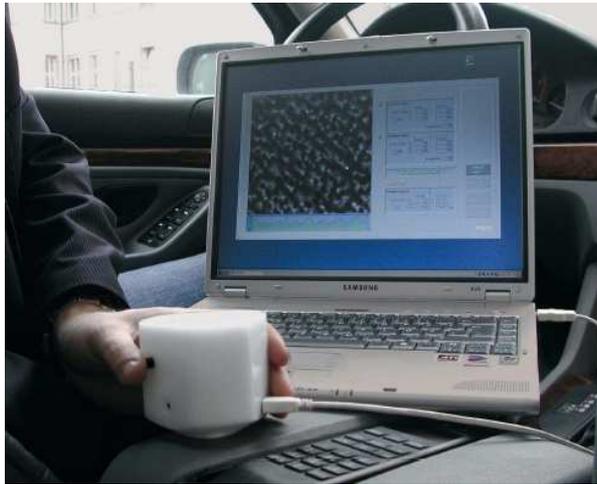
Wie bei der Methode der Stereoskopie kann also über eine Dreiecksungleichung die Veränderung der Abbildung auf der Flächendiode (siehe Abb. 3.3, A) zur Höhenveränderung umgerechnet werden. Die Auflösungsgenauigkeit beträgt bei dieser Methode bis zu  $\sim 0,008\text{mm}$ .

### **3.3 Streulichtverfahren mit TRACEiT®:**

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit, stellt das Gerät TRACEiT® der Firma Innowep (Würzburg), dar, welches sich die Methode des abbildenden Streulichtverfahrens zu Nutze macht. [TRACEiT, Innowep G.m.b.H.]

Im Gerätekopf, der auf der zu vermessenden Oberfläche aufgebracht wird, befinden sich im Winkel von  $7^\circ$  seitlich aufgebrachte Lichtquellen, die auf der Oberfläche für eine Licht-Schattenbildung sorgen.

Je grober die Oberflächenstruktur ist, desto kontrastreicher ist das unter den Beleuchtungsverhältnissen von einer lichtempfindlichen CCD Kamera (Charged Couple Device) aufgenommene Bild. Ist die Oberfläche nahezu glatt, bzw. sehr fein, so wird das Bild hingegen kontrastärmer.



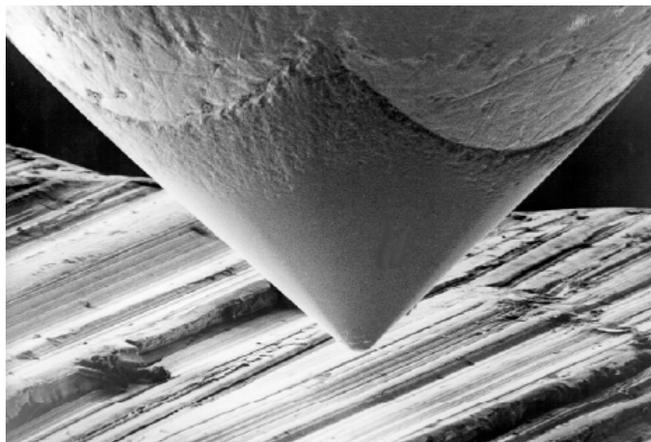
*Abb. 3.4: Das Messsystem TRACEiT® der Firma Innowep.  
[INNOWEP, 2008]*

Mit TRACEiT® können Oberflächen einer Größe von etwa 1,2cm x 0,9cm untersucht werden.

Das Messsystem eignet sich am Besten für „glatte“ Oberflächen und kommt häufig bei der Qualitätskontrolle in der Papier-, Kunststoff-, Automobil- und Textilindustrie zum Einsatz.

### **3.5 Rauigkeitsmessung mit dem Tastschnittverfahren (Perthometer):**

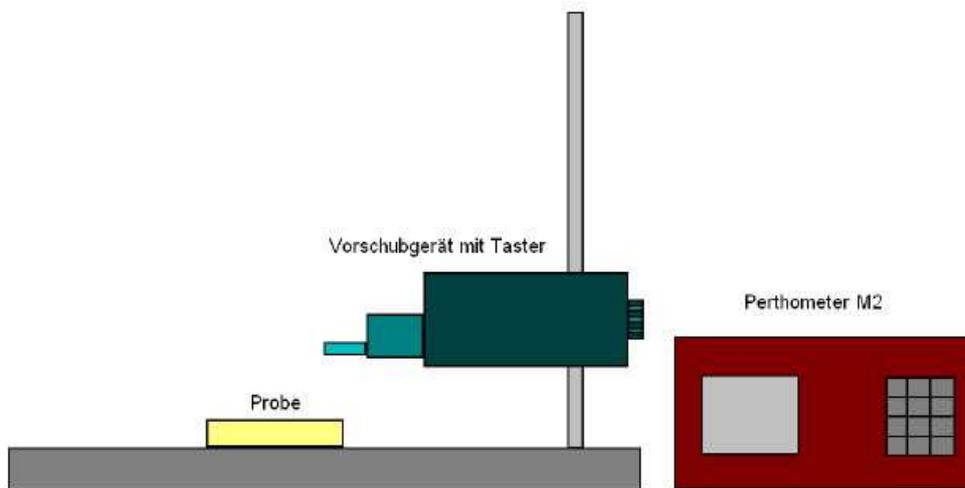
Beim so genannten „Tastschnittverfahren“ wird ein Messkegel mit einer abgerundeten Tastspitze (siehe Abb. 3.5), die an einem winkelbeweglichen Tastarm befestigt ist, über die zu überprüfende Oberfläche gezogen. [DIN-EN-ISO-3274: 4/1998]



*Abb. 3.5: Die abgerundete Tastspitze, welche beim Tastschnittverfahren zum Einsatz kommt.  
[Carl Mahr Holding GmbH, 2003]*

Hierbei werden vertikale Abweichungen, d.h. horizontal zur Zugrichtung und Oberfläche erfasst, und somit ein Oberflächenprofil aufgezeichnet, anhand dessen mittels Rauheitsfilter die gewünschten Rauheitsparameter berechnet werden können.

Der Versuchsaufbau bei der Oberflächenuntersuchung mittels Tastschnittverfahren wird in Abb. 3.6 dargestellt.



*Abb. 3.6: Der Versuchsaufbau bei Oberflächenuntersuchungen mit dem Tastschnittverfahren.  
[GRÄF V., 2008]*

Das Tastschnittverfahren kommt häufig bei der Qualitätsüberprüfung in der Mikrochipindustrie zum Einsatz. Bei modernen, derzeit erhältlichen, Tastschnittgeräten beträgt der kleinste darstellbare Messwert bis zu 0,001mm.

## 4. STEREOSKOPISCHES VERFAHREN

### 4.1 Kurze theoretische Einführung zur Methodik des Stereoskopischen Verfahrens:

Zur Messung und Analyse der Oberflächenparameter von Baustoffen, wie zum Beispiel Fahrbahnoberflächen, sowie Bruchflächen und abgefräste Straßenoberflächen, bedient man sich in dieser Arbeit dem Prinzip der Stereoskopie.

Das „Stereoskopische Abbildungsverfahren“ basiert ursprünglich auf dem Prinzip der Photogrammetrie, welches früher zur Erfassung der Topographie von Bruchoberflächen verwendet wurde. Bei der Photogrammetrie werden dreidimensionale Informationen von Objekten berechnet, welche aus einem, zwei, oder noch mehr Betrachtungswinkeln aufgenommen wurden. Dieselbe Methodik wird bereits seit einiger Zeit bei der Luftbildvermessung im Hinblick auf die Erfassung und Aktualisierung von Geo-Daten aus Luft- und Satellitenbildern, in der Architektur und bei der Vermessung von Planeten unseres Sonnensystems verwendet. [MANHART C., 2007], [MARSCHALL H.U., 2000]

Das Ziel der Stereoskopie besteht darin, ein möglichst genaues und realitätsnahes dreidimensionales Abbild der zu vermessenden Oberfläche zu erzeugen, und anschließend mit Hilfe eines Computers verschiedene Oberflächenparameter zu bestimmen und auszuwerten.

Wie im ersten Teil des Wortes „Stereoskopie“ schon verraten wird, beruht die Methode der Stereoskopie auf der Erstellung zweier Bilder, welche, bezüglich einer Koordinatenachse, um einen wohl definierten Winkel verkippt sind.

Wenn man die beiden verkippten Bilder vergleicht, so stellt man fest, dass die verschiedenen Bildpunkte bezüglich der Kippachse verschoben sind, sich also nicht auf beiden Bildern an der gleichen Stelle befinden. Unter der Voraussetzung, dass ein Computerprogramm mit integriertem Komparator auf beiden Bildern den gleichen Oberflächenpunkt wieder erkennt, kann mit dem so genannten Piazzesi-Algorithmus aus dem Verschiebungsabstand der identen Punkte die relative Höhe aller auf beiden Bildern auftretenden Oberflächenpunkte berechnet werden (siehe Kapitel 4.5 „Software“). [Alicona MeX 4.2 Software, 2005]

Bei der Piazzesi-Methode wird die Probenoberfläche auf der ein Punkt  $P(z, \eta, \xi)$  liegt um den Winkel  $\Delta\Phi$  um eine der Koordinatenachsen gekippt. Dies ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Bei der Darstellung in den unteren Abbildungen 4.1 und 4.2 handelt es sich hierbei um die  $x$  – Achse. [MARINELLO F. et al., 2008]

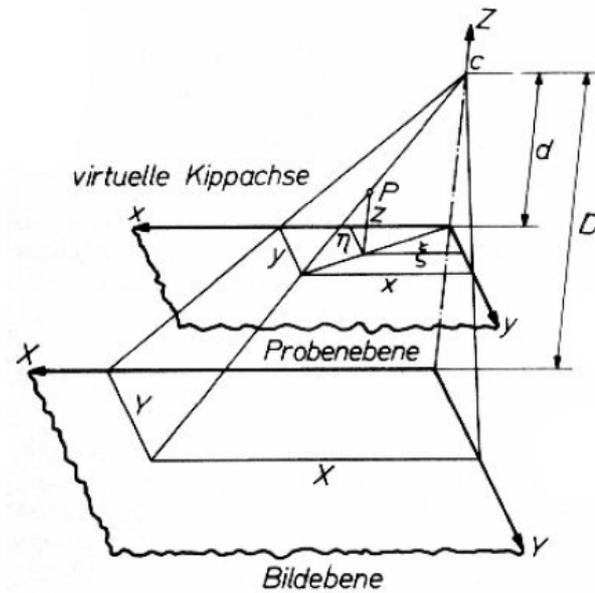


Abb. 4.1: Darstellung der Projektion des Punktes P auf der Probenoberfläche nach der Piazzesi Methode. [KOLEDNIK O., 1981]

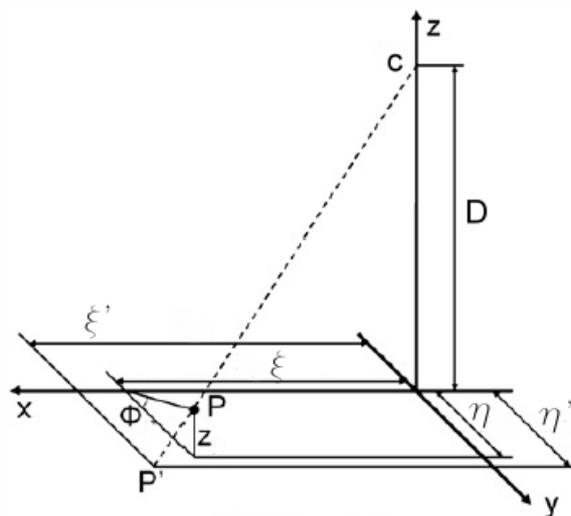


Abb. 4.2: Piazzesi Methode mit Verkippung um die x-Achse. Überarbeitete Abbildung von [MARINELLO F. et al., 2008]

Wie in den Abbildungen 4.1 und 4.2 ersichtlich ist, gibt es ein Koordinatensystem  $x, y$  in dem die Probenebene liegt, und ein Koordinatensystem  $X, Y$  in welchem die Bildebene liegt. Die Berechnungen der Koordinaten des Punktes  $P(z, \eta, \xi)$  erfolgt nach den Gleichungen 4.1, 4.2 und 4.3 [MARINELLO F. et al., 2008]:

$$z = \frac{(y_1 - y_2) \cdot \cos(\Delta\phi) + \frac{2 \cdot y_1 \cdot y_2}{d} \cdot \sin(\Delta\phi)}{\frac{1 + y_1 \cdot y_2}{d^2} \cdot \sin(2\Delta\phi) + \frac{y_1 - y_2}{d} \cdot \cos(2\Delta\phi)} \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

$$\xi = \frac{2 \cdot d - 2 \cdot z \cdot \cos(\Delta\phi)}{\frac{d}{x_1} + \frac{d}{x_2}} \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

$$\eta = \frac{(y_1 - y_2) \cdot (z \cdot \cos(\Delta\phi) - d)}{(y_1 - y_2) \cdot \sin(\Delta\phi) - 2 \cdot d \cdot \cos(\Delta\phi)} \quad (\text{Gleichung 4.3})$$

$x_1, y_1$  ... Koordinaten des Punktes P im ungekippten Zustand

$x_2, y_2$  ... Koordinaten des Punktes P im gekippten Zustand

$d$  ... Objektabstand

$D$  ... Brennweite

Weil nur die Koordinaten in der Bildebene gemessen werden können, müssen die Koordinaten in obigen Gleichungen in die Probenebene umgerechnet werden:

$$x_1 = \frac{X_1}{M}, \quad y_1 = \frac{Y_1}{M}, \quad M \dots \text{Vergrößerung} \quad (\text{Gleichung 4.4})$$

Die Gleichungen 4.1 bis 4.4, welche zur Berechnung der Koordinaten des Punktes P( $z, \eta, \xi$ ) dienen, können durch die Annahme vereinfacht werden, dass die Verschiebung  $Y_1 - Y_2$ , die auch „Parallaxe“ genannt wird, klein gegenüber dem Objektabstand  $d$  ist. In diesem Fall spricht man von Parallelprojektion, für welche die folgenden Näherungsgleichungen verwendbar sind.

$$z = \frac{(Y_1 - Y_2) \cdot \cos(\Delta\phi)}{M \cdot \sin(2\Delta\phi)} \quad (\text{Gleichung 4.5})$$

$$\xi \approx \frac{X_1}{M} \approx \frac{X_2}{M} \quad (\text{Gleichung 4.6})$$

Die Erstellung der stereoskopischen dreidimensionalen Bilder erfolgen mit der Software MeX 4.2 der Firma Alicona.

Hierbei kommt eine vereinfachte Form des Piazzesi-Algorithmus gemäß Gleichung 4.5 zum Einsatz.

Die Vermessung der Parallaxe  $\Delta x$  erfolgte an vom Komparator bestimmten identen Punkten in den Kippbildern.

Die Parallaxe des Punktes B wird aus der Differenz der Strecken A'B'-A''B'' berechnet. Der Kippwinkel der Stereobilder beträgt in diesem Beispiel  $2\alpha$ . Die Abbildung 4.3 soll diesen Sachverhalt verdeutlichen. [ERVIN E., 1987]

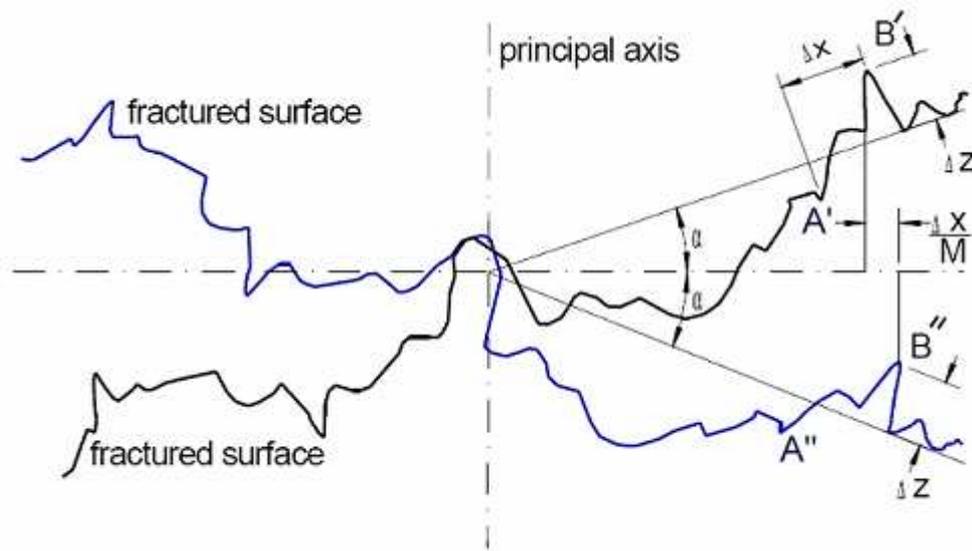


Abb. 4.3: Prinzip der Berechnung der relativen Höhenunterschiede. [ERVIN E., 1987]

Mit Hilfe der folgenden Gleichung lässt sich somit die relative Höhe eines Bildpunktes berechnen. [MANHART C., 2007]

$$\Delta z = \frac{\Delta x}{2 \cdot M \cdot \sin \alpha} \quad (\text{Gleichung 4.7})$$

$\Delta z$  ... relative Höhe

$\Delta x$  ... Verschiebung des Bildpunktes

M ... Vergrößerung der Optik

$\alpha$  ... halber Verkippungswinkel zwischen beiden Bildern

Wie bereits schon etwas früher bemerkt wurde, konzentriert sich diese Arbeit bei der Auswertung der mittels stereoskopischen Verfahrens erfassten Daten, vorwiegend auf die Bewertung der Oberflächenrauigkeit.

Sind die zwei verkippten Bilder, die zur Erstellung des dreidimensionalen Oberflächenabbildes benötigt werden, erst einmal erstellt, können diese langfristig und mit geringem Speicherplatzbedarf digital gelagert werden, und lassen problemlos auch spätere Analysen zu.

Es wäre im Bereich des Straßenbau- und Straßenerhaltungswesens auch möglich, die schon einmal vermessene Stelle einige Zeit später noch einmal zu fotografieren, um möglicherweise Änderungen von Makro- und Mikrotextrur im Laufe der Jahre zu dokumentieren, ohne dass Bohrkern entnommen werden müssen. Außerdem kommt es bei der Messung zu keinerlei mechanischer Beanspruchung oder Zerstörung der Oberfläche.

Ein weiterer großer Vorteil der Oberflächenparametererfassung mittels Stereoskopie ist die Tatsache, dass jeder Punkt des dreidimensionalen Bildes analysiert werden kann, und man nicht auf die Lage und Anzahl einzelner Messköpfe angewiesen ist.

Dank des dreidimensionalen Abbildes der Oberfläche kann von der Person welche die Untersuchung durchführt auch ein optischer Eindruck von der Oberfläche gewonnen werden. Das Erkennen von statistischen Ausreißern (z.B. große Schottersteine auf einer glatten Fahrbahnoberfläche, welche die Rauhigkeit und Höhenunterschiede lokal erhöhen) wird somit erleichtert und ermöglicht eine bessere Interpretation der Untersuchungsergebnisse.

Zum Einsatz des Stereoskopischen Verfahrens ist sicherlich auch zu bemerken, dass es sich dabei um kein reines Labor- beziehungsweise Feldmessverfahren handeln muss. Der erste Schritt der Messung, der in der Praxis die Erstellung der verkippten Bilder bedeutet, kann mit dem in dieser Arbeit verwendeten Messgerät vor Ort (Feldmessverfahren), zerstörungsfrei, und ohne erheblichen Zeitaufwand vorgenommen werden. Allerdings funktioniert auch die Analyse von entnommenen Bohrkernen im Labor einwandfrei und fungiert somit als reine Labormessmethode.

Auch erste Datenauswertungen sind, zur Überprüfung ob sich die Feldbedingungen (Sonnenlicht, etc.) für die Erstellung der dreidimensionalen Abbilder eignen, sind durch die Verwendung eines Notebooks schnell und vor Ort durchführbar.

Bei den Oberflächenuntersuchungen in dieser Arbeit wurden nur stationäre Messungen vorgenommen. Allerdings ist eine Weiterentwicklung zu einem dynamischen Verfahren, wo das Stativ (siehe Kapitel 4.2) von einem bewegten Fahrzeug aus Bilder erstellt, in Zukunft sicherlich nicht auszuschließen.

Nicht nur im Bezug auf die Rauhigkeit von Straßenoberflächen (siehe Kapitel 6.3) ist die Methode der Stereoskopie anwendbar. Auch die Erfassung und Beurteilung von Bruchflächen (siehe Kapitel 6.1) oder abgefrästen Oberflächen von Baustoffen (siehe Kapitel 6.2) spielen in der Technik eine wichtige Rolle.

Beim Einsatz von Klebstoffen auf Bruchflächen kann eine genaue Kenntnis der Rauhigkeit, sowie der Korngröße des verwendeten Materials für den langfristigen Verbund der Bruchstelle entscheidend sein.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit werden mit Hilfe des Stereoskopischen Verfahrens Bruchoberflächen von Beton mit verschiedenem Größtkorn untersucht (siehe Kapitel 6.2), sowie eine abgefräste alte Asphaltfläche einer Straße, kurz bevor eine neue Fahrbahnoberfläche aufgetragen wird.

Auch aus wirtschaftlicher Sicht ist das Stereoskopische Messverfahren interessant, da das Messgerät im Vergleich zu anderen Oberflächenrauheitsmessverfahren keine laufenden Betriebs- und Wartungskosten erzeugt.

## 4.2 Entwicklung und Bau der Messeinrichtung:

Wie im vorigen Abschnitt bereits angesprochen wird, beruht das Prinzip des Stereoskopischen Verfahrens auf der Erstellung zweier Bilder, die bezüglich einer fixen optischen Achse um einen definierten Winkel verkippt sind. Die Verkipfung hat hierbei euzentrisch zu erfolgen, was bedeutet dass die Kippachse in der Mitte der zu vermessenden Oberfläche liegen muss.

Die Realisierung der verkippten Bilder kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Auf der einen Seite besteht die Möglichkeit, die Probe auf einem beweglichen Probenteller zu befestigen und mit einem fixen Kamerastativ die beiden Bilder durch Verkipfung des Probentellers aufzunehmen.

Dies hat den Vorteil, dass in den meisten Fällen die gleichen Kameraeinstellungen (Vergrößerung, Fokus, Belichtung) weitgehend unverändert bleiben können. Allerdings hat diese Methode jedoch auch den Nachteil, dass es sich um eine reine Labormessmethode handelt, und im Falle der Untersuchung von Oberflächen, wie zum Beispiel Straßenoberflächen Bohrkern mit speziellen Abmessungen entnommen werden müssen, um in dieser Art des Messaufbaues untersucht werden zu können.

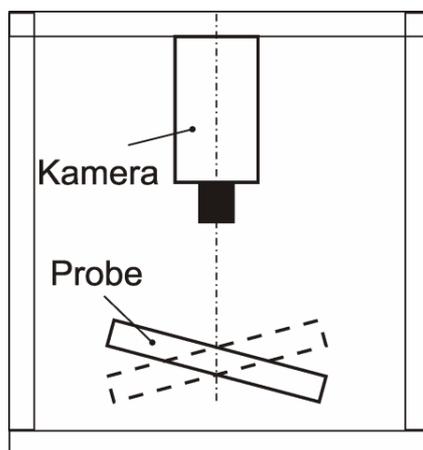


Abb. 4.4: Messaufbau zur Stereoskopie mit verkippbarem Probenteller.  
[MANHART, HARTMUTH, 2006]

Ein derartiger Versuchsaufbau, wie er in Abbildung 4.4 dargestellt ist, wird zum Beispiel im Christian Doppler Labor für Eigenschaftsoptimierte Baustoffe am Institut für Gesteinshüttenkunde an der Montanuniversität Leoben verwendet. Dort wurden die Bruchflächen grobkeramischer Oberflächen mittels stereoskopischen Verfahrens untersucht.  
[MANHART, HARTMUTH, 2006]

Weiters besteht auch die Möglichkeit die Probe auf einem unbewegbaren Probenteller zu montieren, die Kamera auf einem schwenkbaren Stativ zu befestigen, und auf diese Weise verkippte Bilder zu erzeugen.

Das hat den großen Vorteil dass einerseits ebenfalls Labormessungen an kleinen Proben (z.B. an Bohrkernen) durchgeführt werden können. Allerdings ist es mit dieser Form des Messaufbaus auch möglich, direkt auf einer Oberfläche selbst zu messen (wie z.B. auf Fahrbahnen). Somit müssen nicht gezwungenermaßen Bohrkern entnommen werden, und eine Beschädigung der Oberfläche, aus der normalerweise die Probe entnommen werden müsste, wird vermieden.

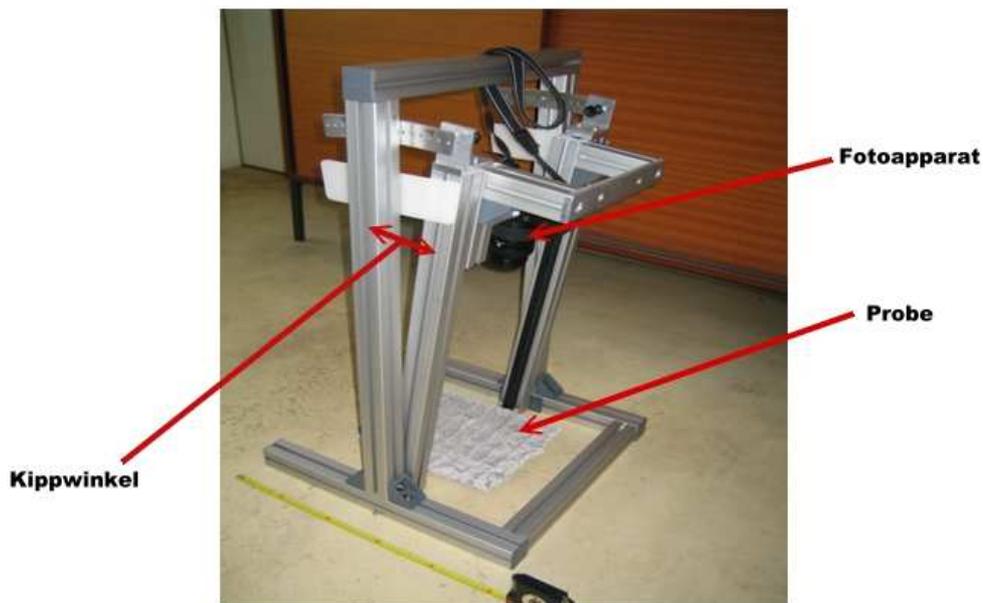


Abb. 4.5: Stativ mit schwenkbarer Kamera. Hier „ruht“ die zu vermessende Oberfläche.

Für die Messungen in dieser Arbeit entschied man sich für letztere Variante der Erzeugung der verkippten Bilder, da diese sowohl Feldmessungen, als auch reine Labormessungen ermöglicht.

#### **Rahmen – Stativ:**

Zur Erstellung der verkippten Bilder wurde ein Aluminiumrahmen (siehe Abb. 4.5) entworfen und gebaut, der die Aufnahme von Bildern aus verkippten Winkeln mit einem Gesamtwinkel von bis zu  $14^\circ$  ( $+7^\circ$  bis  $-7^\circ$ ) zulässt, und je nach Größe der verwendeten Kamera (bzw. Größe des Objektivs) Abstände zwischen Linseneingang und Probenoberfläche von  $\sim 16\text{cm}$  bis hin zu  $\sim 60\text{cm}$  ermöglicht.

Die Abmessungen des Rahmens betragen  $50 \times 50 \times 82\text{cm}$ , sein Gewicht beträgt etwa  $10\text{kg}$ , so dass er problemlos auch in kleineren PKWs transportiert, beziehungsweise über kurze Distanzen von einer Person getragen werden kann. Einen Eindruck über Aussehen und Funktionsweise des Rahmens sollen die Abbildungen 4.5 und 4.6 vermitteln.



Abb. 4.6: Der Rahmen aus der Seitenperspektive. In den drei Ausschnitten wird das Verkippen des Innenrahmens von links nach rechts dargestellt.

### 4.3 Beleuchtung des Objektes:

Ein wichtiges Kriterium für das Funktionieren des Stereoskopischen Verfahrens ist die richtige Ausleuchtung der Probenoberfläche, von welcher ein dreidimensionales Abbild zur späteren Datenauswertung erzeugt wird.

Eine gute Ausleuchtung der Oberfläche ist von großer Wichtigkeit, da die Qualität der späteren stereoskopischen Bilder stark von der Bildqualität der erstellten Fotos abhängt. Idealerweise verwendet man möglichst diffuses Licht, wie zum Beispiel Tageslicht. Überbelichtung, die an weissen bzw. sehr hellen Oberflächen leicht entstehen kann, sollte hingegen vermieden werden, da kontrastreiche Bilder sich am besten zum Stereoskopischen Verfahren eignen. [MANHART, HARTMUTH, 2006]

Bei Laborbedingungen, wo oft nicht genug Tageslicht zur Beleuchtung der Probenoberfläche zur Verfügung steht, wird eine künstliche Lichtquelle eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde eine modifizierte Lupenleuchte verwendet, aus deren kreisförmiger Öffnung die Lupe entfernt wurde, damit mit der Kamera durch die Kreisöffnung fotografiert werden konnte. Mit dieser Methode wurde in fast allen Fällen ein erfolgreiches Ergebnis erzielt. Die Lupenleuchte ist in Abb. 4.7 abgebildet.



*Abb. 4.7: Die verwendete Lupenleuchte. Aus der kreisförmigen Öffnung in der Mitte wurde das Lupenglas entfernt.*

## 4.4 Auswahl der Kamera:

Zur Aufnahme der verkippten Bilder wurden handelsübliche Digitalkameras verschiedener Hersteller getestet.

Für bestmögliche Ergebnisse sind weniger der Hersteller und das Modell der Kamera entscheidend, sondern einfach die Fähigkeit der Kamera eine Oberfläche möglichst scharf und vergrößert abzubilden.

Bei den Untersuchungen der unterschiedlichen Baustoffoberflächen ist es zunächst wichtig einen Kompromiss aus Detailreichtum und Größe der zu vermessenden Fläche zu finden. Aufnahmen aus großer Nähe, beziehungsweise mit starker Vergrößerung erhöhen bis zu einem gewissen Grad den Detailreichtum (z.B. die Auflösung der Mikrotextur), bewirken aber, dass immer kleinere Flächen untersucht werden, sodass man viele kleine Flächen vermessen muss, um aussagekräftige Mittelwerte für die Oberflächenparameter bekommen zu können.

In Bezug auf die Auflösung der Digitalfotos stellte man fest, dass bei Strukturen deren Rauigkeit mit freiem Auge noch deutlich erkennbar ist (z.B. Fahrbahnoberflächen, bzw. abgefräste Fahrbahnoberflächen) eine Auflösung von 1024 x 768 Bildpunkten einen guten Kompromiss aus Detailreichtum und Größe der zu vermessenden Oberfläche ( $\sim 10 - 50 \text{ cm}^2$ ) liefert.

Versuche mit verschiedenen Kameratypen zeigten, dass die Erstellung der Fotos mit kleinen, handlichen, im normalen Elektronikhandel erhältlichen Digitalkameras am besten funktioniert, und dass sich vor allem die gängigen Vorschau-Displays als äußerst nützlich erweisen.

Aus obigen Erfahrungen wird für die Erstellung der Bilder eine Kamera des Modells NIKON COOLPIX 4600 verwendet, die bei allen Baustoffoberflächen sehr gute Bilder liefert.

Zum Abschluss ist noch zu bemerken, dass die Aufnahmen bei der Stereoskopie ohne Blitzlicht, mit Autofokus und Selbstauslöser (zum verhindern von Verwackelungen) durchgeführt werden sollten.

## 4.5 Software:

Zur Erstellung der dreidimensionalen Abbilder der fotografierten Oberflächen und gleichzeitigen Berechnung der Oberflächenparameter wird die Software Mex Version 4.2 der Firma Alicona verwendet.

Die Berechnung der Oberflächenparameter wird von der Software gemäß der Norm [EN-ISO-4287], einer internationalen Norm zur Charakterisierung von Oberflächen, durchgeführt. (siehe Kapitel 2.2.)

Der erste Schritt bei der Erstellung der dreidimensionalen Oberflächenbilder ist die Bestimmung der Vergrößerung der Kamera. Hierzu wird beim anfertigen der Bilder die Probenoberfläche mit identen Kameraeinstellungen (Abstand, Vergrößerung), einmal mit Maßstab auf der Probenoberfläche, und einmal ohne Maßstab fotografiert. Anhand der Bilder mit Maßstab kann mit geeigneter Bildbearbeitungssoftware (Ulead Photo Impact, bzw. Adobe Photoshop) bestimmt werden, welche metrische Größe (wahre Abmessung) ein Pixel auf der Aufnahme hat.

Dadurch kann die Software mithilfe des sogenannten „Piazzesi-Algorithmus“ (siehe Kapitel 4.1) aus der Verschiebung der Bildpunkte in der Bildebene die relativen Höhenänderungen der Bildpunkte berechnen.

Das Programm benötigt vor der Erstellung des Oberflächenabbildes die Angabe des so genannten „Arbeitsabstandes“, einer in der Mikroskopie vorkommenden Größe, die den Abstand zwischen Objekt und äußerer Objektivbegrenzung bei scharf gestelltem Bild bezeichnet. Dieser beträgt je nach Art der Baustoffoberfläche zwischen 160 und 400 mm.

Der dritte Eingabewert der für die Erzeugung der Bilder benötigt wird, ist der Kippwinkel der Bilder, welcher bei den Untersuchungen in dieser Arbeit immer  $10^\circ$  ( $+5^\circ$ ,  $-5^\circ$ ) beträgt.

Damit von der Software möglichst genaue Abbilder der Oberfläche erstellt werden, muss die Oberfläche gewisse Voraussetzungen erfüllen.

So ist es wünschenswert, dass die Oberfläche möglichst viel Kontrast besitzt. Ist die Oberfläche sehr homogen und eben, kann der in die Software integrierte Komparator keine bzw. zu wenige korrespondierende Bildpunkte erkennen und somit keine ordnungsgemäße Bildkonstruktion erfolgen. Unter einem Komparator versteht man im allgemeinen eine technische Funktionseinheit welche zwei oder mehr Größen vergleicht und ein daraus gebildetes Ergebnis liefert. Der Begriff Komparator wird in verschiedenen technischen Bereichen verwendet.

Wenn auf den verkippten Bildern Bereiche existieren, in denen der Komparator ordnungsgemäß funktioniert, und Bereiche in denen er keine korrespondierenden Punkte erkennt, so werden jene Bereiche, in denen der Komparator versagt, im fertigen stereoskopischen Abbild ausgeblendet.

Lichtreflexionen, wie beispielsweise auf Metalloberflächen bzw. Kunststoff, führen dazu, dass der Komparator und somit der Rekonstruktionsalgorithmus des Programms versagen.

Dies wurde bei den ersten Versuchen zur Überprüfung der Genauigkeit des Messgerätes bemerkt (siehe Kapitel 5), wo ein Metallgitter mit 1mm Dicke vermessen werden sollte. Nach Behandlung der Probenoberfläche (lackieren mit mattem grauen Lack) trat dieses Problem nicht mehr auf, und das Erstellen der stereoskopischen Bilder funktionierte einwandfrei. Aus diesem Grund sollte beim fotografieren kein gewöhnlicher Metallmaßstab ins Bild gelegt werden, sondern ein Kunststoffmaßstab, der lichtspiegelnde Reflexionen verhindert.

Zu Bedenken ist auch, dass der Rekonstruktionsalgorithmus der Software Schwierigkeiten mit steilwandigen Höhenveränderungen und toten Winkeln hat, bei deren Auftreten eine lineare Interpolation durchgeführt wird. Dies wird zum Erlangen eines besseren Eindrucks in Abbildung 4.8 dargestellt.

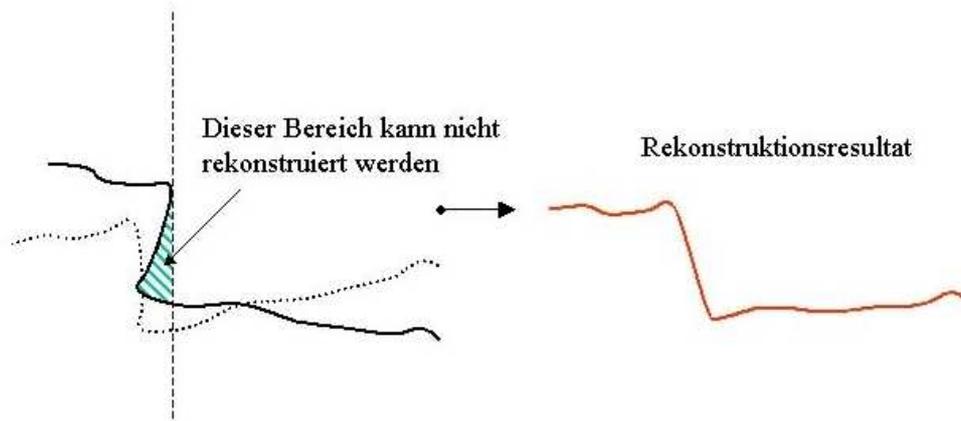


Abb. 4.8: Links sieht man die Oberfläche aus den 2 Kippwinkeln mit einer Steilwand und totem Winkel (schraffiert). Rechts ein typisches Ergebnis der Rekonstruktion durch lineare Interpolation. [Alicona MeX 4.2 Software, 2005]

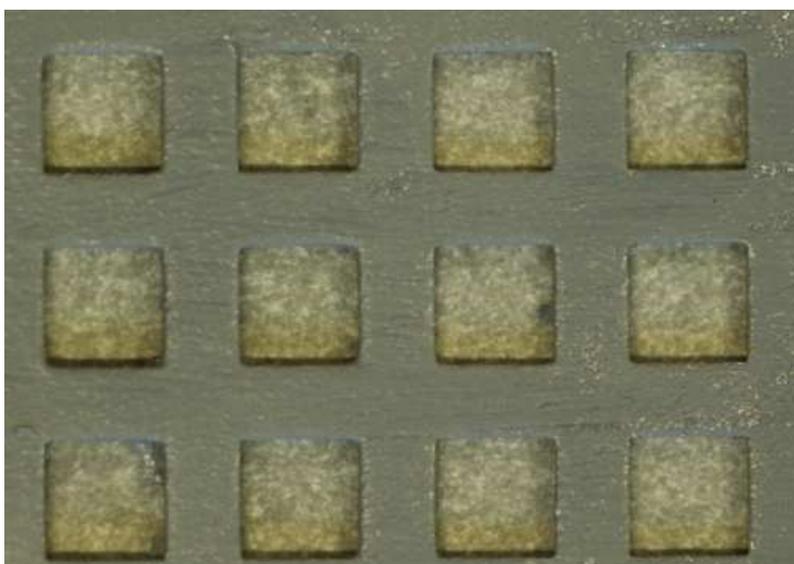
Wenn bei der Erstellung des stereoskopischen Bildes keine Interpolation möglich ist, wird jener Oberflächenbereich, wo die Rekonstruktion nicht möglich ist, vom restlichen korrekt rekonstruierten Bild ausgeblendet.

## 5. GENAUIGKEIT DES STEREOSKOPISCHEN VERFAHRENS

Um die Genauigkeit des Stereoskopischen Verfahrens zu überprüfen, wird eine in den Abmessungen wohl bekannte Oberfläche mit dem Stereoskopischen Verfahren vermessen und somit die Darstellungsgenauigkeit der stereoskopischen Bilder überprüft.

Als wohl bekannte Oberfläche wählte man ein mit mattem grauem Lack lackiertes Metallgitter, das auf grauem Papier mit dunkelgrauem Fleckenmuster aufgelegt wurde. Die Dicke des lackierten Gitters beträgt  $d = 1,1\text{mm}$ . Die quadratischen Gitteraushöhlungen hatten eine Seitenlänge von 5mm. Ein Bild des Gitters aus der Obenansicht ist in Abb. 5.1 dargestellt.

Zur Genauigkeitsüberprüfung wurde das Gitter bei verschiedenen Abständen (20cm und 28cm) zwischen Kameraebene und der Gitteroberfläche fotografiert und die stereoskopischen Bilder ausgewertet. Das fertige Stereoskopische Abbild des Gitters ist in Abbildung 5.2 zu sehen. In Abbildung 5.3 sieht man den Profilschnitt des Primärprofils (siehe Kapitel 2.2) des Gitters.



*Abb. 5.1: Bild aus der Obenansicht auf das mattgrau lackierte Gitter, das zur Überprüfung des Stereoskopischen Verfahrens verwendet wurde. Die quadratischen Aushöhlungen haben eine Seitenlänge von 5mm. Die Dicke des Gitters mit Lackbeschichtung beträgt 1,1mm.*

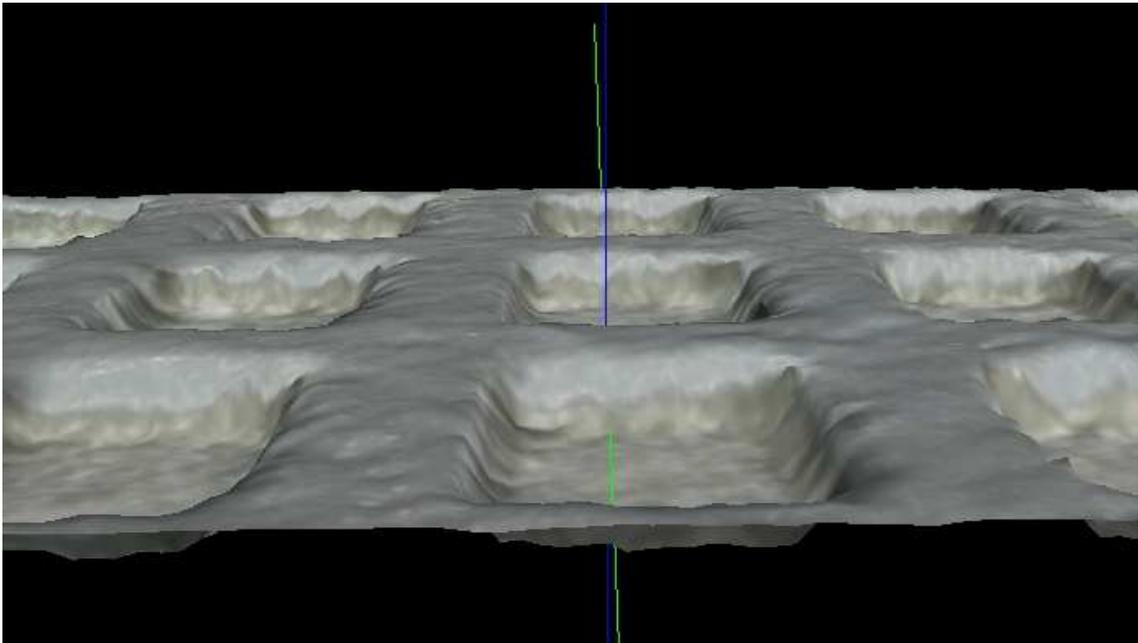


Abb. 5.2: Das angefertigte Stereoskopische Bild. Eine dreidimensionale Darstellung des Gitters im Computerprogramm aus seitlich-oberer Perspektive.

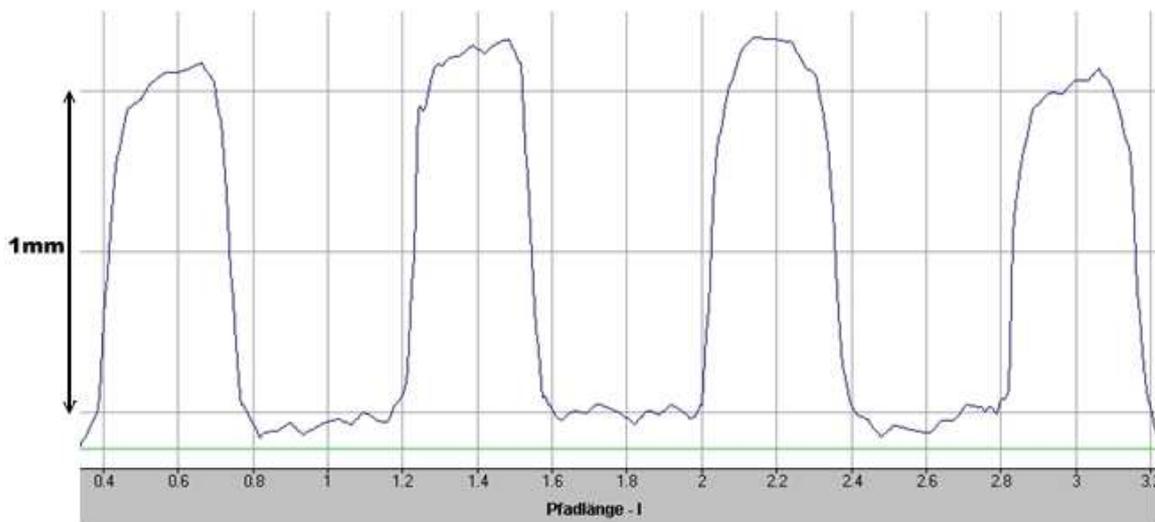


Abb. 5.3: Das Gitter im Profilschnitt. Hier wurde die Genauigkeit der Abmessungen im Stereoskopischen Abbild untersucht.

Zur Auswertung der Daten wurde die Gitterdicke für beide Kameraabstände zwischen Kameraebene und Gitteroberfläche (20cm bzw. 28cm), an jeweils 30 verschiedenen Stellen am Gitterquerschnitt bestimmt, und der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Zusätzlich wurden neben den relativen Höhenunterschieden (hier die Gitterdicke, somit die Höhe des auf dem Papier aufliegenden Gitters) in den stereoskopischen Bildern auch die Abmessungen in der Bildebene (hier die Abmessungen eines Gitterquadrates, somit die Abstände der Gitterverstreungen) kontrolliert und wieder der Mittelwert und die Standardabweichung über jeweils 30 Messungen, für jeden der beiden Kameraabstände berechnet.

$$d_{mw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad , d_i \dots \text{gemessene Dicke des Gitters}$$

an der Messposition  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ,  $n = 30$ )    (Gleichung 5.1)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_{mw})^2} \quad , \sigma \dots \text{Standardabweichung} \quad \text{(Gleichung 5.2)}$$

Bei einem Abstand zwischen Objektivmündung und Gitter von 28cm ergab sich durch die Mittelwertbildung über 30 Gitterdickenmessungen ein Mittelwert von  $d_{mw} = 1,137\text{mm}$  mit einer Standardabweichung von  $\sigma_d = 0,132\text{mm}$ . Für die Seitenlänge eines Gitterquadrates berechnete sich hier der Mittelwert zu  $l_{mw} = 5,021\text{mm}$  mit einer Standardabweichung von  $\sigma_l = 0,068\text{mm}$ .

Bei einem Abstand zwischen Objektivmündung und Gitter von 20cm ergab sich durch die Mittelwertbildung über 30 Gitterdickenmessungen ein Mittelwert von  $d_{mw} = 1,127\text{mm}$  mit einer Standardabweichung von  $\sigma_d = 0,045\text{mm}$ .

Für die Seitenlänge eines Gitterquadrates berechnet sich hier der Mittelwert zu  $l_{mw} = 5,046\text{mm}$  mit einer Standardabweichung von  $\sigma_l = 0,064\text{mm}$ .

Die Erfahrung, die im Umgang mit dem stereoskopischen Verfahren in der vorliegenden Diplomarbeit gemacht wurde, lehrt, dass die Genauigkeit der Stereoskopischen Abbildung von Baustoffoberflächen mit größerer Auflösung der erzeugten Bilder (bis zu 3000 x 4000 Pixel, abhängig von der Leistung der Digitalkamera), und mit kleiner werdendem Arbeitsabstand (Entfernung Oberfläche – Objektiveneingang) steigt, was aber die Rechenzeit (Auswertungszeit) ,abhängig von der Leistung des Computers, beträchtlich erhöht und die Größe der untersuchten Fläche verkleinert.

## 6. ERGEBNISSE:

### 6.1 Betonbruchflächen:

In diesem Kapitel wird die Oberflächenrauheit an Betonbruchflächen untersucht. Im Bauwesen, speziell im Hochbau, werden je nach Anwendung Betonmischungen mit unterschiedlichem Größtkorn eingesetzt. Feine Betonstrukturen wie z.B. Simse und Fensterbänke haben meist eine Korngröße von 16 bzw. 32 mm. Bei Massenbeton der zum Beispiel bei Sperren, Schleusen oder Staumauern zum Einsatz kommt wird hingegen großes Korn (64mm) verwendet.

Im Bauwesen bezeichnet man als „Größtkorn“ das größte im Zuschlag von Beton befindliche Korn. Die Auswahl des Größtkorns beeinflusst die Betoneigenschaften in Bezug auf Verarbeitbarkeit, Festigkeit, , Wasser- und Zementzugabe.

Wenn es im Bauwesen zu Brüchen an Betonkonstruktionen kommt, ist es von großer Wichtigkeit die Oberflächeneigenschaften und Rauheitsparameter der Bruchfläche bestimmen zu können. Spezielle Bindemittel, die zum erneuten Verbund der gebrochenen Teile führen sollen, können nur unter der Bereitstellung eines gewissen Mindestmaßes an Rauigkeit eine langfristige Bindung garantieren. Falls die Bruchfläche nicht rauh genug ist, wird vor dem auftragen des Bindemittels eine Aufrauung der Oberfläche durchgeführt.

Im Bauwesen ist allgemein bekannt, dass das verwendete Größtkorn Einfluss auf die Rissausbreitung im Beton hat. Größeres Korn bewirkt hierbei größeren Risswiderstand, da Risse meist um das im Beton enthaltene Korn herum verlaufen und nur in seltenen Fällen durch das Korn verlaufen. In Abb. 6.1 ist der Rissverlauf um das Korn graphisch dargestellt.

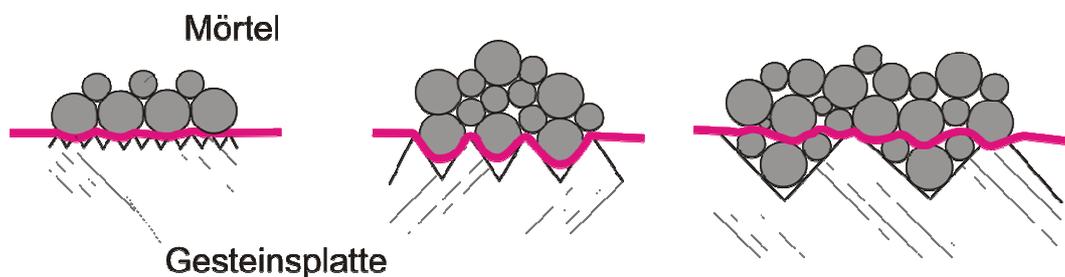


Abb. 6.1: Darstellung der Rissausbreitung in Beton. [TSCHEGG et al., 2007]

Die Untersuchung der Bruchflächen mit Hilfe des stereoskopischen Verfahrens ist auch aus der Sicht der Bruchmodellentwicklung eine hilfreiche Methode um schnell und effizient die wichtigsten Oberflächenparameter, sowie die Größe der Bruchfläche (auch „Interface-Größe“ genannt) zu analysieren.

Für die vorliegende Untersuchung wird Beton der Betonqualität C35/45, mit Rundkorn und Größtkorn von 8, 16, 32 und 64 mm sowie einer Würfeldruckfestigkeit von 43 – 45 N / mm<sup>2</sup> in Mode I Belastung (Rissöffnung) gebrochen und die Bruchflächen mit dem stereoskopischen Verfahren untersucht.

Die berechneten Mittelwerte der Oberflächenparameter (siehe Kapitel 2.2) zu den Untersuchungen an Proben mit verschiedenem Größtkorn werden in diesem Kapitel in tabellarischer Form angeführt und Werte von besonderem Interesse als Diagramme dargestellt.

Die Werte aller Einzelmessungen werden tabellarisch in Tabelle A.1 und A.2 im Anhang der Diplomarbeit angeführt. In Tabelle 6.1 werden die zu den Oberflächenparametern berechneten Mittelwerte für Proben mit gleichem Größtkorn angegeben.

## MESSERGEBNISSE:

### Durchschnittliche Messwerte zu den Proben mit verschiedenem Größtkorn (GK):

<b>GK</b> [mm]	<b>WF/PF</b>	<b>Sp</b> [cm]	<b>Sv</b> [cm]	<b>St</b> [cm]	<b>Ra</b> [cm]	<b>Rp</b> [cm]	<b>Rv</b> [cm]	<b>Rt</b> [cm]	<b>Rz</b> [cm]
<b>8</b>	<b>1,378</b>	<b>0,827</b>	<b>0,907</b>	<b>1,734</b>	<b>0,0226</b>	<b>0,0896</b>	<b>0,098</b>	<b>0,187</b>	<b>0,186</b>
<b>16</b>	<b>1,313</b>	<b>1,084</b>	<b>1,108</b>	<b>2,192</b>	<b>0,0266</b>	<b>0,0978</b>	<b>0,104</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
<b>32</b>	<b>1,308</b>	<b>1,456</b>	<b>1,191</b>	<b>2,648</b>	<b>0,0283</b>	<b>0,1293</b>	<b>0,125</b>	<b>0,254</b>	<b>0,254</b>
<b>64</b>	<b>1,404</b>	<b>1,756</b>	<b>1,719</b>	<b>3,476</b>	<b>0,0278</b>	<b>0,153</b>	<b>0,157</b>	<b>0,31</b>	<b>0,31</b>

Tabelle 6.1

*Zusammenfassung der Oberflächenparameter: (siehe Kapitel 2.2)*

*GK... Größtkorn*

*WF... Wahre Fläche*

*PF ... Projizierte Fläche*

*Sp ... Größte Höhe*

*Sv ... Größte Tiefe*

*St ... Maximale Höhe (=Sp+Sv)*

*Ra... Durchschnittliche mittlere Rauheit*

*Rp... Maximalrauheit*

*Rv... Minimalrauheit*

*Rt ... Gesamthöhe des Rauheitsprofils (=Rp+Rv)*

*Rz ... Mittelwert über Rt über fünf  $\lambda c$*

Bei Betrachtung der Messergebnisse gemäß der Parameterreihenfolge aus Tabelle 6.1, welche aus der Untersuchung der Betonbruchflächen hervorgehen, kann man feststellen, dass der Wert des Verhältnisses von Wahrer Fläche zu Projizierter Fläche (WF/PF) keinen eindeutigen Trend vorweist. Der dimensionslose Wert schwankt zwischen 1,3 und 1,4. Zunächst sinkt der Wert ausgehend von einem Größtkorn von 8mm bis zu einem Größtkorn von 32mm ab, um schließlich bei einem Größtkorn von 64mm seinen Maximalwert von 1,4 zu erreichen.

Aussagekräftiger sind die Parameter Sp, Sv und St ( $St = Sp+Sv$ ), welche die höchste Höhe, die größte Tiefe und die Distanz zwischen diesen beiden Oberflächenpunkten auf der Betonbruchoberfläche beschreiben. Mit zunehmendem Größtkorn des in der Betonmischung verwendeten Kornes steigen die drei obigen Parameter bei den untersuchten Bruchflächen an, woraus man schließen kann, dass beim Bruch im Mode I (Rissöffnung) bei größeren Kornsorten größere Höhenunterschiede auf der Bruchfläche entstehen. Dieses Verhalten wird anhand des Parameters St ( $St = Sp+Sv$ ) in Abb. 6.2 dargestellt.

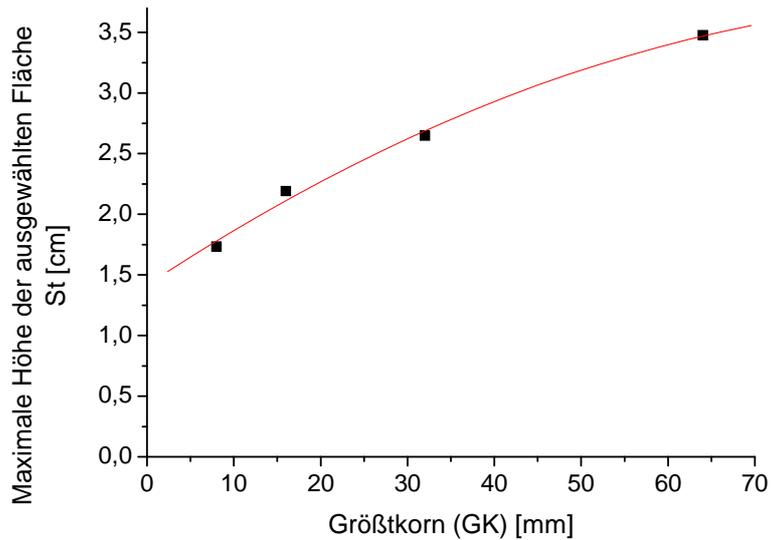


Abb. 6.2: In obiger Abbildung erkennt man die Mittelwerte für den Parameter St, die bei einem Größtkorn von 8, 16, 32 und 64mm gemessen wurden.

Einen interessanten Verlauf zeigte der Wert der durchschnittlichen Rauheit Ra. Ausgehend von einem Größtkorn von 8mm steigt der Wert bis zur Korngröße von 32mm an und sinkt dann bei einer Korngröße von 64mm leicht ab. Der Verlauf von Ra ist in Abb. 6.3 dargestellt.

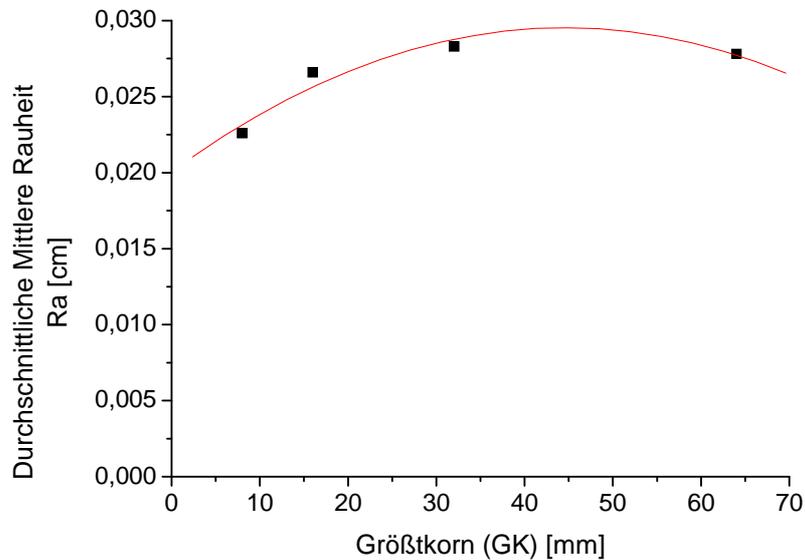


Abb. 6.3: In obiger Abbildung erkennt man die Mittelwerte für den Parameter Ra, die bei einem Größtkorn von 8, 16, 32 und 64mm gemessen wurden.

Das Absinken des Ra-Wertes bei einem Größtkorn von 64mm geschieht höchstwahrscheinlich aus dem Grund, dass mit zunehmender Korngröße vermehrt glatte Stellen in jenen Bereichen entstehen, wo der Riss durch die Körner verläuft.

Einen deutlichen Kurvenverlauf zeigen die Parameter  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_t$  ( $R_t = R_p + R_v$ ) und  $R_z$  welche der Maximalrauheit, der Minimalrauheit, der Gesamthöhe des Rauheitsprofils und der Mittelung über die Gesamthöhe des Rauheitsprofils entsprechen. Diese Rauheitsparameter steigen mit zunehmender Korngröße an. Ein solcher Trend weist auf eine Zunahme der Rauheitsprofile mit steigender Korngröße hin. Die Verläufe der Parameter  $R_p$  und  $R_t$  sind in Abbildung 6.4 und in Abbildung 6.5 graphisch dargestellt.

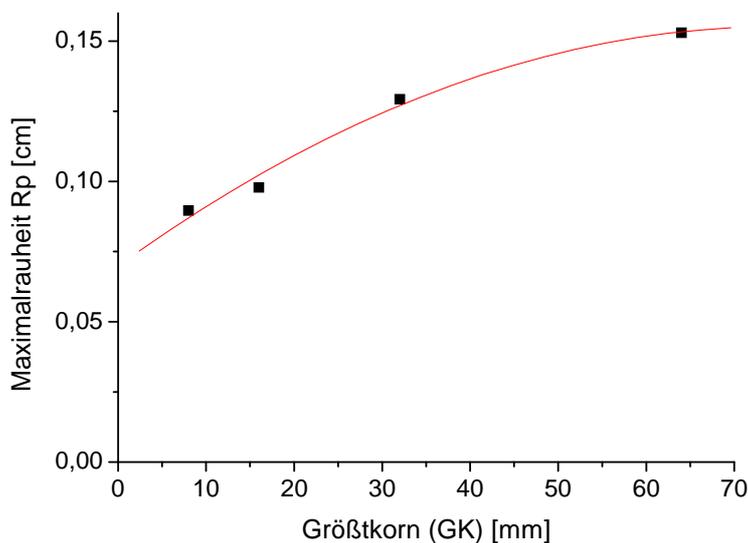


Abb. 6.4: In obiger Abbildung erkennt man die Mittelwerte für den Parameter  $R_p$ , die bei einem Größtkorn von 8, 16, 32 und 64mm gemessen wurden.

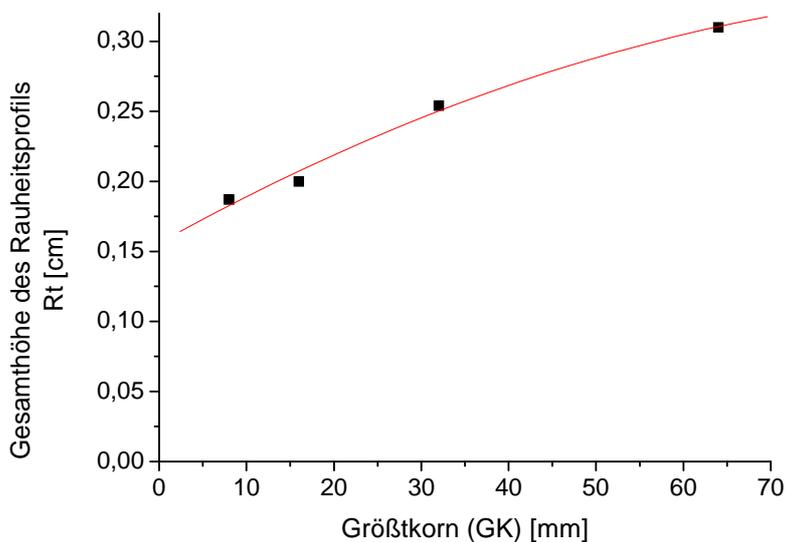


Abb. 6.5: In obiger Abbildung erkennt man die Werte für den Parameter  $R_t$ , der bei einem Größtkorn von 8, 16, 32 und 64mm gemessen wurde.

## 6.2 Abgefräster Asphalt:

Das Abfräsen von schadhafte Fahrbahnoberflächen ist im Straßenbau ein Prozess, der vor dem Auftragen einer neuen Fahrbahnoberflächenschicht stattfinden muss, um einen soliden Verbund zwischen alter und neuer Schicht zu gewährleisten.

Für die Untersuchung wurden auf einem Versuchsgelände der STRABAG südlich von Wien an insgesamt 11 verschiedenen Messstellen stereoskopische Bilder erzeugt. Insgesamt wurden abgefräste Asphaltfahrbahnen sowie eine nicht-abgefräste Asphaltfahrbahn, eine Teerfahrbahn und ein Schotterbeet untersucht.

Zusätzlich zur stereoskopischen Bilderzeugung wurde am Versuchsgelände auch die Sandfleckmethode (siehe Kapitel 3.1) durchgeführt.

Unter den 11 vermessenen Stellen befanden sich 9 abgefräste Oberflächen (Messstellen 1A, 2A, 2B, 3A, 3B, 5A, 6A und 6B), eine Schotteroberfläche (Messstelle 4A), und zwei unterschiedliche nicht-abgefräste Fahrbahnoberflächentypen (Messstelle 7A: Teer und Messstelle 8A: Asphalt). In Abbildung 6.6 (siehe Bild) sind die vier unterschiedlichen Oberflächentypen dargestellt, um einen optischen Eindruck zu erhalten.

Zu allen Messstellen wurden die in Kapitel 2.2 vorgestellten Oberflächenparameter mit der Software MeX 4.2 (siehe Kapitel 4.5) berechnet, die Sandfleckmethode experimentell durchgeführt, sowie mit Hilfe der Software eine Volumenanalyse (siehe Kapitel 2.2) durchgeführt, um die per experimenteller Sandfleckmethode bestimmten Rauhtiefewerte mit den mit der Volumenanalyse berechneten (simulierten) Rauhtiefewerten zu vergleichen.

Die Mittelwerte der Oberflächenparameter (siehe Kapitel 2.2) werden in diesem Kapitel in den Tabellen 6.2 und 6.3 angeführt und die wichtigsten Parameter bei den Messergebnissen als Diagramme dargestellt. Die aus der experimentell durchgeführten Sandfleckmethode ermittelten Rauhtiefe-Werte finden sich in Tabelle 6.4 wieder.

Die Werte aller Einzelmessungen werden in den Tabelle A.3 und A.4 und A.5 im Anhang der Diplomarbeit angeführt. In Tabelle 6.1 werden die zu den Oberflächenparametern berechneten Mittelwerte für Proben mit gleichem Größtkorn angegeben.



*Abb. 6.6: Ein optischer Eindruck zu den vier untersuchten unterschiedlichen Oberflächentypen. Oberes linkes Bild: Messstelle 2B (abgefräster Asphalt), oberes rechtes Bild: Messstelle 4A (Schotter). Unteres linke Bild: Messstelle 7A (Teer), unteres rechtes Bild: Messstelle 8A (Asphalt).*

## MESSERGEBNISSE:

### Mittelwerte an den verschiedenen Messstellen:

Messstelle	WF/PF	Sp [mm]	Sv [mm]	St [mm]	Ra [mm]	Rp [mm]	Rv [mm]	Rt [mm]	Rz [mm]
1A	1,401	8,32	10,105	18,42	0,495	1,67	1,837	3,507	3,512
2A	1,402	12,14	12,085	24,225	0,525	1,747	2,117	3,865	3,865
2B	1,425	9,745	11,69	21,425	0,545	1,8925	2,175	4,067	4,062
3A	1,451	8,905	12,325	21,235	0,557	1,91	2,235	4,145	4,145
3B	1,493	10,785	11,535	22,32	0,535	1,892	2,075	3,967	3,967
4A	1,738	8,765	11,495	20,35	0,587	2,027	2,527	4,555	4,552
5A	1,478	10,355	11,555	21,905	0,572	1,995	2,135	4,13	4,127
6A	1,441	13,355	11,66	25,015	0,512	1,875	2,022	3,897	3,895
6B	1,492	11,59	11,92	23,5	0,567	1,995	2,07	4,065	4,067
7A	1,616	8,715	12,185	20,905	0,442	1,72	2,547	4,267	4,27
8A	1,315	8,14	8,4	16,535	0,26	1,135	1,202	2,337	2,335

Tabelle 6.2

*Zusammenfassung der Oberflächenparameter: (siehe Kapitel 2.2)*

*WF... Wahre Fläche*

*PF ... Projizierte Fläche*

*Sp ... Größte Höhe*

*Sv ... Größte Tiefe*

*St ... Maximale Höhe (=Sp+Sv)*

*Ra... Durchschnittliche mittlere Rauheit*

*Rp... Maximalrauheit*

*Rv... Minimalrauheit*

*Rt ... Gesamthöhe des Rauheitsprofils (=Rp+Rv)*

*Rz ... Mittelwert über Rt über fünf  $\lambda c$*

### Mittels Volumenanalyse der Software berechnete Rauhtiefe-Werte:

Messstelle	Projizierte- Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Rauhtiefe (Volumenanalyse) [mm]
1A	16609,5	21478	1,293
2A	20591,5	29059	1,411
2B	20589	29919,5	1,453
3A	20825	32396	1,555
3B	19625	29819,5	1,519
4A	11624	38296,5	3,294
5A	21075	36600,5	1,736
6A	17508,5	25601	1,462
6B	18035	28765,5	1,594
7A	14963	12914,5	0,863
8A	14032,5	9370,5	0,667

Tabelle 6.3

Mittels Sandfleckmethode experimentell ermittelte Rauhtiefe-Werte:

Messposition	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Durchmesser [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Rauhtiefe SF [mm]
1A	200000	355	98979,803	2,020
2A	200000	375	110446,616	1,810
2B	200000	345	93482,016	2,139
3A	200000	345	93482,016	2,139
3B	200000	345	93482,016	2,139
4A	200000	225	39760,782	5,030
5A	200000	365	104634,670	1,911
6A	200000	345	93482,016	2,139
6B	200000	355	98979,803	2,020
7A	200000	500	196349,540	1,018
8A	200000	600	282743,338	0,707

Tabelle 6.4

Aus der Betrachtung der Messergebnisse in Tabelle 6.2 ist zu erkennen, dass der Parameter WF/PF bei den abgefrästen Messstellen einen Wert von ~1,4 annimmt, während er bei der Schotterfläche den höchsten Wert mit 1,7 liefert, bei einer Teer-Fahrbahnoberfläche 1,6 und bei einer Asphaltoberfläche den Wert 1,3 erreicht. Der Spitzenwert von 1,7 bei der Schotteroberfläche lässt sich damit erklären, dass die bei der Schotteroberfläche auftretende Wahre Fläche (WF) relativ groß ist.

Der Oberflächenparameter  $St$  ( $St = Sp+Sv$ ), der die größte auf der Oberfläche auftretende Höhendifferenz beschreibt, erreicht seinen Maximalwert bei der Messstelle 6A, während er bei der optisch glatt aussehenden Asphaltoberfläche 8A den kleinsten Wert annimmt. Die Werte für  $St$  sind in Abbildung 6.7 graphisch dargestellt.

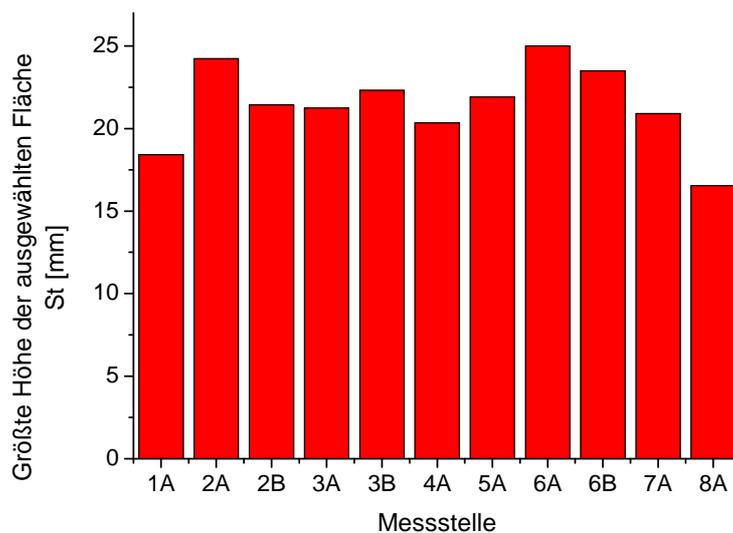


Abb. 6.7: Darstellung der auftretenden Maximalen Höhe  $St$  ( $St = Sp+Sv$ ) an den verschiedenen Messstellen.

Bei Betrachtung der Rauigkeitsparameter  $R_a$  und  $R_t$  ( $R_t = R_p + R_v$ ) zeigt sich, dass bei beiden Parametern die Schotteroberfläche 4A den größten Wert liefert, während die Asphaltoberfläche 8A einen deutlich niedrigeren Werte aufweist als der Rest der abgefrästen Asphaltflächen und dem zweitkleinsten Wert, welchen die Teeroberfläche 7A liefert. Graphisch ist dies in Abb. 6.8 und Abb. 6.9 dargestellt.

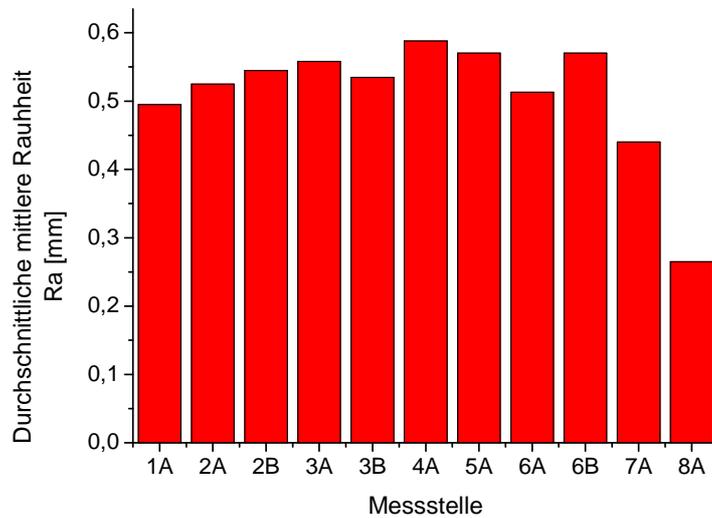


Abb. 6.8: Darstellung der Durchschnittlichen Rauheit  $R_a$ .

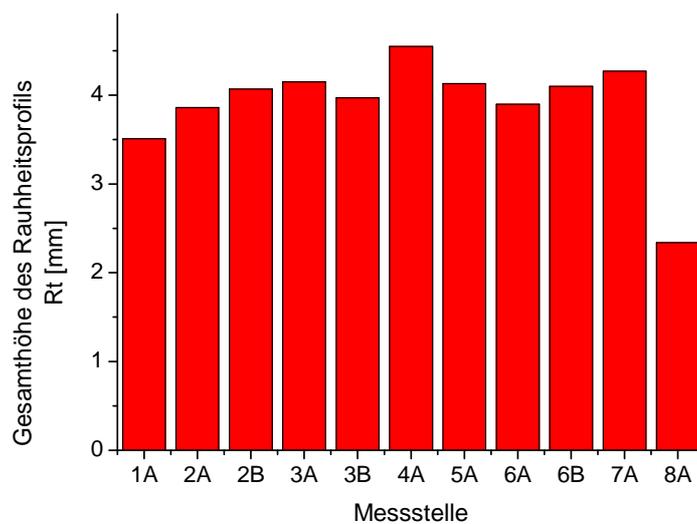


Abb. 6.9: Darstellung der Gesamthöhe des Rauheitsprofils  $R_t$  ( $R_t = R_p + R_v$ )

Im Anschluss an die Oberflächenprofilparameter werden nun die Rauhtiefewerte die per experimentellem Sandfleckverfahren ermittelt wurden mit den Rauhtiefewerten, die anhand der Volumenanalyse der Software berechnet wurden, verglichen. Die entsprechenden Rauhtiefewerte sind in Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4 dargestellt.

Die Betrachtung der Werte die mit der experimentell durchgeführten Sandfleckmethode bestimmt wurden (siehe Tabelle 6.4) liefert als Ergebnis, dass die Schotteroberfläche (Messstelle 4A) mit  $\sim 5$ mm den größten Rauhtiefewert besitzt, während die abgefrästen Asphalt-Messstellen alle einen Rauhtiefewert von  $\sim 2$ mm liefern. Die niedrigsten Rauhtiefewerte haben die Teeroberfläche 7A mit  $\sim 1$ mm und die Asphaltfahrbahn mit 0,7mm.

Einen ähnlichen Verlauf zeigen die per Volumenanalyse ermittelten Rauhtiefewerte. Auch hier hat die Schotterfläche 4A mit ~3,3mm den höchsten Rauhtiefewert, während die abgefrästen Asphaltstellen Werte zwischen 1,3mm bis 1,7mm liefern. Die kleinsten Rauhtiefewerte besitzen wieder die Teeroberfläche 7A mit ~0,8mm und die Asphaltfahrbahn mit ~0,6mm.

Neben den offensichtlichen gleichen Trends bei den verschiedenen Oberflächen, die aus Vergleich der Rauhtiefewerte der Sandfleckmethode mit den Rauhtiefewerten der Volumenanalyse hervorgehen, ist außerdem deutlich erkennbar, dass die experimentell ermittelten Werte alle höher sind als die per Volumenanalyse berechneten Rauhtiefewerte. Dies könnte darauf hindeuten, dass ein Sandvolumen experimentell nie mit einer solchen Genauigkeit verteilt werden kann wie im Falle des Volumens bei der Volumenanalyse mit der Software MeX Version 4.2. In Abb. 6.10 und in Abb. 6.11 sind die Rauhtiefewerte die mit der Sandfleckmethode bzw. mit der Volumenanalyse bestimmt wurden graphisch dargestellt.

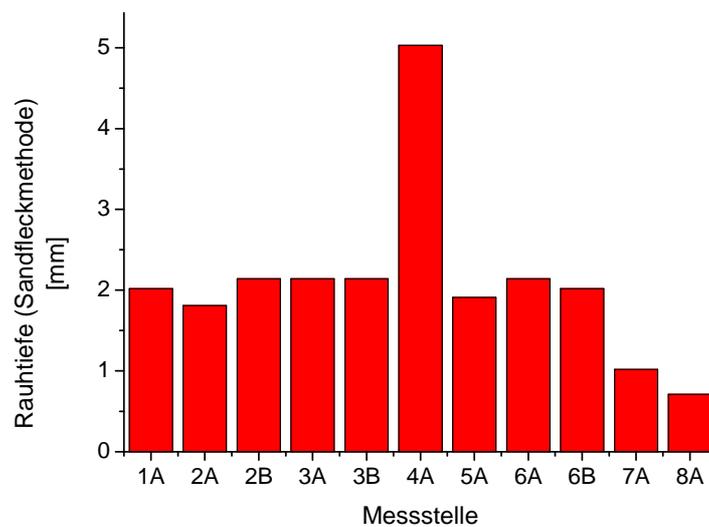


Abb. 6.10: Graphische Darstellung der Rauhtiefe für die verschiedenen Messstellen.

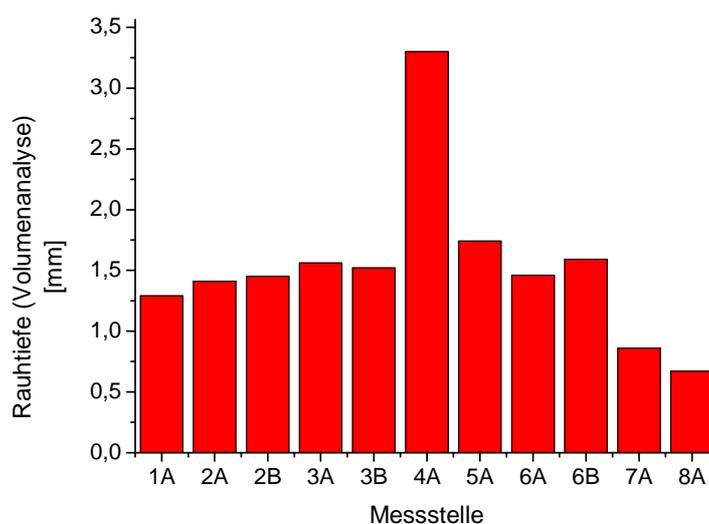


Abb. 6.11: Darstellung der mittels Volumenanalyse ermittelten Rauhtiefe

## 6.3 Betonstraßen:

In diesem Kapitel der Diplomarbeit wird versucht die Qualität von Fahrbahnoberflächen im Bezug auf Rauigkeit zu untersuchen. Hierzu wurden verschiedene Proben (Bohrkerne) von Waschbetonfahrbahnoberflächen mit verschiedenem Größtkorn zwischen 8mm und 11mm, die auf der Westautobahn zwischen Wien und Salzburg entnommen wurden, im Bezug auf die in Kapitel 2.2 vorgestellten Rauigkeitsparameter untersucht. Im Rahmen eines Forschungsprojektes des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie [HAIDER M., 2008], wurde versucht einen Zusammenhang zwischen der Beschaffenheit der Oberflächen-textur von Waschbetonfahrbahnoberflächen und dem gemessenen Rollgeräusch eines Reifens herzustellen. Ein optischer Eindruck von den Fahrbahnoberflächen kann in Abbildung 6.12 gewonnen werden.

Zusätzlich zu den mittels Stereoskopie berechneten Oberflächenparametern werden auch noch Rollgeräusch-Lautstärkewerte (LMA – Wert in [dB]) zu den jeweiligen Autobahnabschnitten als Vergleichsdaten angegeben. Anhand des LMA Wertes und den Oberflächenprofilparametern wurde versucht Zusammenhänge zwischen der Rollgeräusch-Lautstärke und den mittels stereoskopischen Verfahrens gewonnen Daten herzustellen.

Da sich die Bohrkerne der verschiedenen Streckenabschnitte bereits optisch deutlich unterscheiden, waren auch Unterschiede bei den durch Stereoskopie extrahierten Daten zu den verschiedenen Streckenabschnitten zu erwarten.

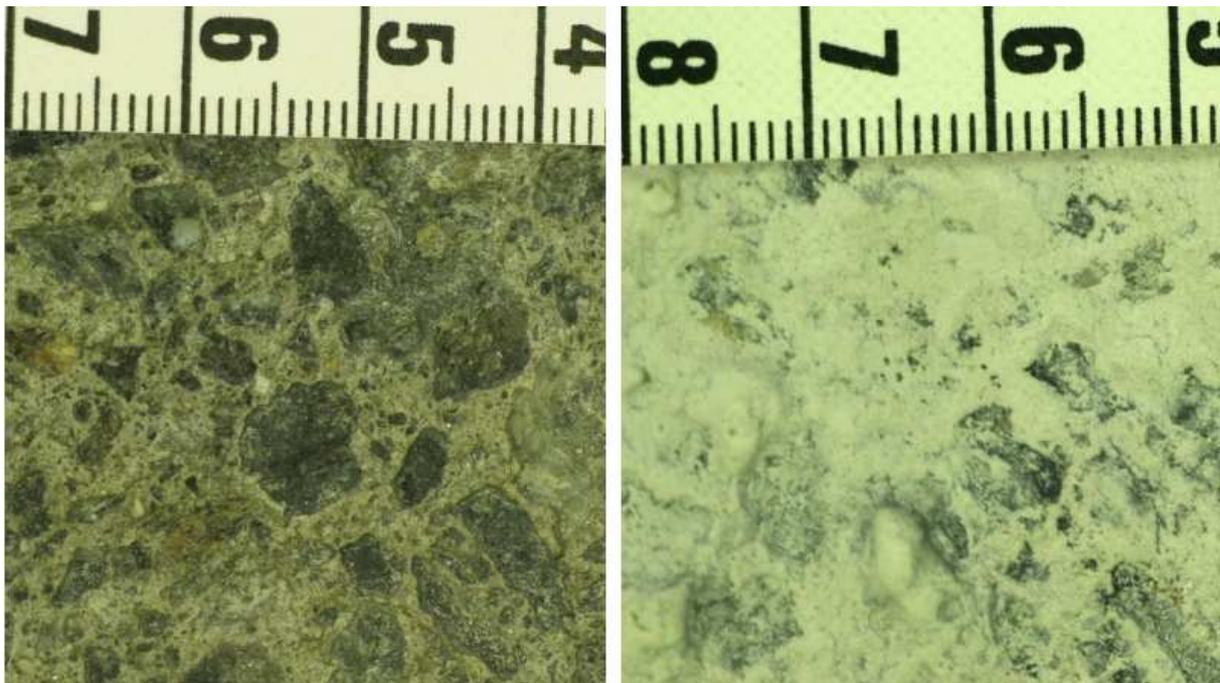


Abb. 6.12: Fotos aus der Obenansicht von Bohrkerne 5 (links), und Bohrkerne 9 (rechts).

## MESSERGEBNISSE:

### Mittelwerte zu den verschiedenen Messstrecken:

In diesem Abschnitt wurden die Bohrkerne entsprechend ihrer Autobahnabschnittszugehörigkeit geordnet, und Durchschnittswerte der Oberflächenprofilparameter bzw. LMA Werte zu den jeweiligen Messstreckenabschnitten berechnet. Die Ergebnisse der Einzelmessungen befinden sich im Anhang A.6, A.7 und A.8.

In Tabelle 6.5 und 6.6 sind die berechneten Mittelwerte der Oberflächenparameter zu den zugehörigen Streckenabschnitten angegeben. In Tabelle 6.5 ist in der zweiten Spalte außerdem der Durchschnittswert der Rollgeräuschlautstärke (LMA [dB]) [HAIDER M., 2008] zu den jeweiligen Streckenabschnitten zu finden.

Messstrecke	LMA [dB]	WF/PF	Sp [mm]	Sv [mm]	St [mm]
Strecke 3	102,635	1,127	3,286	3,420	6,707
Strecke 6	103,5	1,105	3,709	8,264	8,264
Strecke 7	104,277	1,132	4,099	3,935	8,034
Strecke 9	102,365	1,086	3,254	3,629	6,883
Strecke 10	102,957	1,156	3,492	4,357	7,849

Tabelle 6.5

Messstrecke	Ra [mm]	Rp [mm]	Rv [mm]	Rt [mm]	Rz [mm]
Strecke 3	0,131	0,397	0,453	0,850	0,850
Strecke 6	0,108	0,359	0,433	0,793	0,717
Strecke 7	0,126	0,375	0,505	0,880	0,880
Strecke 9	0,094	0,322	0,326	0,649	0,65
Strecke 10	0,160	0,502	0,569	1,071	1,070

Tabelle 6.6

Zusammenfassung der Oberflächenparameter: (siehe Kapitel 2.2)

WF... Wahre Fläche

PF ... Projizierte Fläche

Sp ... Größte Höhe

Sv ... Größte Tiefe

St ... Maximale Höhe (=Sp+Sv)

Ra... Durchschnittliche mittlere Rauheit

Rp... Maximalrauheit

Rv... Minimalrauheit

Rt ... Gesamthöhe des Rauheitsprofils (=Rp+Rv)

Rz ... Mittelwert über Rt über fünf  $\lambda_c$

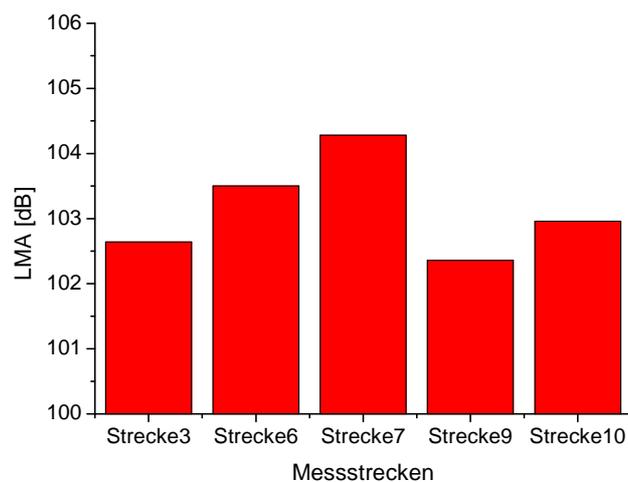
Wie im vorangegangenen Abschnitt 6.2 wurden zusätzlich zu den in Kapitel 2.2 vorgestellten Rauheitsparametern auch per Volumenanalyse Rauhtiefewerte nach dem Prinzip der Sandfleckmethode bestimmt. Die Mittelwerte der Rauhtiefewerte sind in Tabelle 6.7 aufgelistet. Eine experimentelle Durchführung der Sandfleckmethode gemäß Kapitel 3.1, wäre auf Grund des kleinen Bohrerndurchmessers (13cm) nicht realisierbar gewesen.

Messstrecke	Rauhtiefe (Volumenanalyse) [mm]
Strecke 3	0,362
Strecke 6	0,294
Strecke 7	0,357
Strecke 9	0,270
Strecke 10	0,455

*Tabelle 6.7*

Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels bemerkt wird, existieren bezüglich der Oberflächenparameter deutlich erkennbare Unterschiede zwischen den verschiedenen Streckenabschnitten.

Ein Vergleich der Oberflächenparameter mit den zusätzlich zur Verfügung gestellten LMA – Werten liefert einen Hinweis darauf, dass allein aus der Lautstärke des Rollgeräusches keine Rückschlüsse auf die restlichen Oberflächenparameter gezogen werden können. Die Messstrecken 3, 7 und 10 haben die höchsten Rauhtiefe Werte, lassen aber keine Parallelen zu den Rollgeräusch-Lautstärken (LMA-Werte) erkennen. Dies lässt sich anhand der Betrachtung von Abb. 6.13 und Abb. 6.14 erkennen.



*Abb. 6.13: Darstellung der durchschnittlichen Rollgeräusch-Lautstärke des Reifens auf den verschiedenen Streckenabschnitten.*

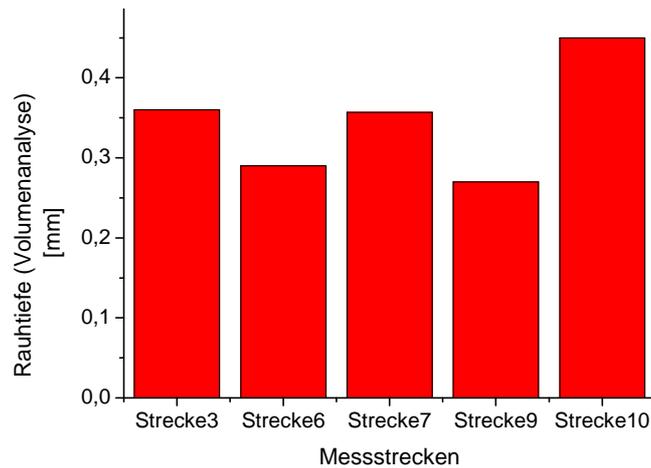


Abb. 6.14: Darstellung der mittels Volumenanalyse bestimmten Rauhtiefewerten.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie [HAIDER M., 2008] konnte durch einen Vergleich, der im Rahmen dieser Diplomarbeit gemessenen Oberflächenparameter und den Messwerten des Messsystems RoadSTAR gemäß [ÖNORM EN ISO 13473-1] festgestellt werden, dass der in dieser Arbeit gemessene Oberflächenparameter Rz mit dem Oberflächenparameter MPD des Messsystems RoadSTAR starke Zusammenhänge aufweist, und somit für die Oberflächenuntersuchungen im Straßenbauwesen, wo nicht nur die Griffbarkeit, sondern auch die entstehenden Rollgeräusche eine große Rolle spielen, von Interesse sein könnte [HAIDER M., 2008]. Der Parameter Rz ist in Abb. 6.15 graphisch dargestellt.

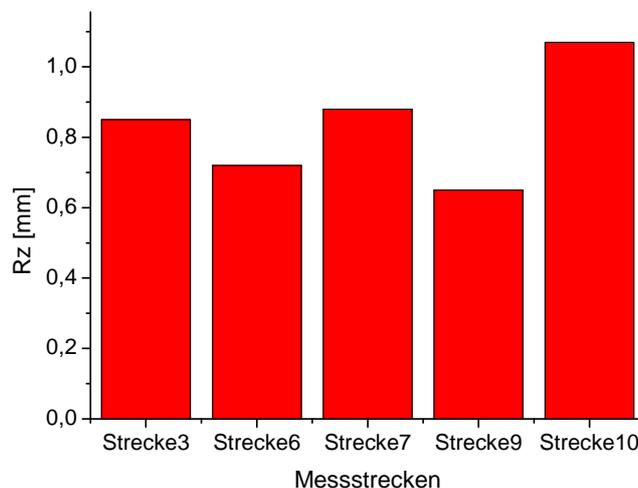


Abb. 6.15: Darstellung des Parameters Rz.

Im Bezug auf die Lärmentwicklung deuten die Ergebnisse des Forschungsprojektes auf ein unterschiedliches Verhalten, der erst vor relativ kurzer Zeit häufig gebauten Fahrbahndecken mit Größtkorn 11 mm und der älteren Fahrbahndecken mit Größtkorn 8mm, hin. Erstere zeigen in der bisherigen Liegedauer wesentlich größere jährliche Zunahmen der Lärmemission als letztere. Bei den Waschbetonoberflächen mit Größtkorn 8 mm konnte in einzelnen Fällen sogar eine Abnahme der Lärmemissionen festgestellt werden [HAIDER M., 2008].

Die Schallentwicklung beim Abrollen des Reifens wird durch zwei Anregungsmechanismen hervorgerufen. Diese sind die Anregung der mechanischen Schwingung des Reifens und die Auslösung aerodynamischer Vorgänge an der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. Das sogenannte „Air Pumping“ ist eine aerodynamische Anregung. Hier wird ein Luftvolumen vom Reifenprofil beim Rollen auf der vorderen Seite des Reifens angesaugt, zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche komprimiert und dann auf der hinteren Seite des Reifens unter Emission von Schall wieder freigesetzt. Je nach Beschaffenheit und Bauart der Straßenoberfläche, sowie der Fahrzeuggeschwindigkeit entstehen somit unterschiedliche Abrollgeräusche [BECKENBAUER, MÜLLER, 2008]. Die Entstehung des Abrollgeräusches durch „Air Pumping“ ist in Abbildung 6.16 illustriert.



Abb. 6.16: Entstehung des Abrollgeräusches mittels „Air Pumping“.  
[BECKENBAUER, MÜLLER, 2008]

## 6.4 Kalkbeschichtete Kalksteine

Im Interesse der Denkmalpflege wurden in diesem Kapitel Untersuchungen der Widerstandsfähigkeit verschiedener Beschichtungssysteme gegenüber Umwelteinflüssen durchgeführt.

Durch Umwelteinflüsse bewirkte Veränderungen an der Oberfläche und somit der Rauigkeit der Beschichtung von Denkmälern haben großen Einfluss auf die Schutzfunktion der Beschichtung. Im Zuge dieser Arbeit wurden Kalksteinproben mit unterschiedlichen Beschichtungen untersucht. Bei den drei Beschichtungssystemen handelt es sich um eine Sumpfkalkbeschichtung, eine Silikonharzbeschichtung und einer Nanobeschichtung.

Die Probekörper wurden dann Frost-Tauwechselversuchen unterzogen um Umwelteinflüsse zu simulieren, und deren Auswirkungen auf die Oberflächenrauigkeit ermitteln zu können. Zur Bestimmung dieser Rauigkeitskenngrößen (siehe Kapitel 2.2) wurden die Proben mit dem stereoskopischen Verfahren untersucht.

Um die Genauigkeit der mittels stereoskopischen Verfahren gewonnenen Daten mit anderen Messmethoden vergleichen zu können, wurden die gleichen Proben mit Laser-Lichtschnitttechnik untersucht, und die durchschnittliche mittlere Rauheit Ra berechnet.

[GRÄF V., 2008]

Die Kennzeichnung der untersuchten Proben erfolgt nach folgendem Schema:

*Bezeichnung der Beschichtungsart:*

- U ... unbeschichteter Probekörper aus Kalkstein
- K ... Sumpfkalkbeschichtung
- S ... Silikonbeschichtung
- N... Nanobeschichtung

*Bezeichnung der Verwitterungseinflüsse:*

- O ... ohne Verwitterungseinflüsse
- F/T ... Frost/Tau - Wechselversuche

Ein optischer Eindruck von den verschiedenen Kalksteinproben kann in Abbildung 6.17 gewonnen werden.



Abb. 6.17: Die unterschiedlichen Beschichtungen. [GRÄF V., 2008]

### MESSERGEBNISSE:

#### Mittelwerte zu den verschiedenen Proben:

Wie in den vorangegangenen Kapiteln werden zunächst die Mittelwerte der Oberflächenprofilparameter in den Tabellen 6.8 und 6.9 angeführt. Die Ergebnisse der Einzelmessungen befinden sich in den Tabellen A.9, A.10 und A.11 im Anhang.

Probenname	WF/PF	Sp [mm]	Sv [mm]	St [mm]
U-O	1,105	1,19	2,095	3,285
N-O	1,105	0,87	1,185	2,055
N-F/T	1,07	0,51	0,995	1,505
S-O	1,015	0,655	0,945	1,6
K-O	1,01	0,635	0,875	1,515
K-F/T	1,01	0,565	0,805	1,37
S-F/T	1,015	0,625	0,92	1,545

Tabelle 6.8

Probenname	Ra [mm]	Rp [mm]	Rv [mm]	Rt [mm]	Rz [mm]
U-O	0,042	0,126	0,2725	0,3985	0,4
N-O	0,0398	0,1218	0,235	0,3568	0,38
N-F/T	0,033	0,1068	0,225	0,3318	0,3325
S-O	0,022	0,0778	0,1025	0,1803	0,1825
K-O	0,0155	0,062	0,0583	0,1203	0,1095
K-F/T	0,0155	0,0585	0,0658	0,1243	0,125
S-F/T	0,0175	0,071	0,0743	0,1453	0,145

Tabelle 6.9

Zusammenfassung der Oberflächenparameter: (siehe Kapitel 2.2)

WF... Wahre Fläche

PF ... Projizierte Fläche

Sp ... Größte Höhe

Sv ... Größte Tiefe

St ... Maximale Höhe (=Sp+Sv)

Ra... Durchschnittliche mittlere Rauheit

Rp... Maximalrauheit

Rv... Minimalrauheit

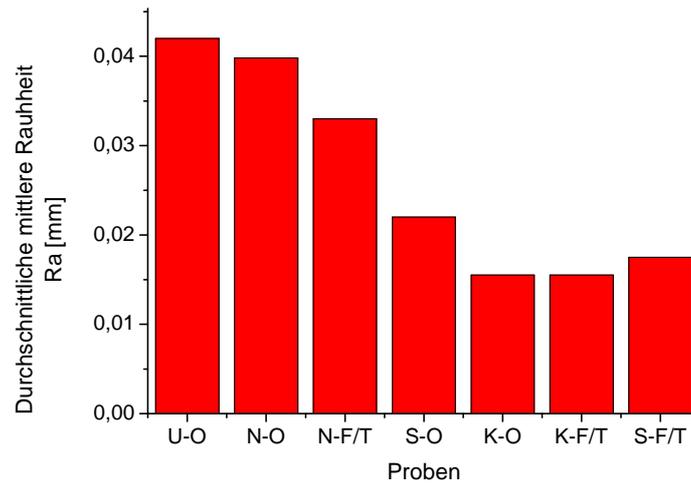
Rt ... Gesamthöhe des Rauheitsprofils (=Rp+Rv)

Rz ... Mittelwert über Rt über fünf  $\lambda c$

Wie aus Tabelle 6.8 ersichtlich ist, hat der unbeschichtete, nicht den Verwitterungseinflüssen ausgesetzte Probentyp U-O und der nanobeschichtete, nicht den Verwitterungseinflüssen ausgesetzte Probentyp N-O das größte Verhältnis von Wahrer zu projizierter Fläche mit einem Wert von  $\sim 1,1$ . Danach folgen die restlichen Proben mit einem Wert von  $\sim 1$ .

Auch bei der auf der Oberfläche auftretenden Maximalen Höhe St ( $St = Sp+Sv$ ) haben die Proben U-O mit  $\sim 3,3$ mm und N-O mit  $\sim 2$ mm die beiden höchsten Werte. Die restlichen Proben nehmen Werte von  $\sim 1,4$  bis  $1,6$ mm an, wobei der Probenkörper K-F/T mit einer Sumpfkalkbeschichtung, nach dem Aussetzen von Verwitterungseinflüssen, mit  $1,4$  die kleinste Maximale Höhe vorweisen kann.

Bei den Rauigkeitsparametern aus Tabelle 6.9 zeigt sich durchgehend die gleiche Reihenfolge zwischen den Proben in Bezug auf ihre Größe. Als stellvertretender Wert wird in Abbildung 6.18 die Durchschnittliche Rauheit ausgewählt und graphisch dargestellt.



*Abb. 6.18: Graphische Darstellung der durchschnittlichen Rauheit Ra.*

Wie aus Abbildung 6.14 zu erkennen ist, hatten die beiden Probentypen U-O und N-O die größten Ra - Werte, während K-O und K-/F/T sich den Platz mit dem kleinsten Ra – Wert teilen (die Zahlenwerte zu Abb. 6.14 befinden sich in Tabelle 6.9).

Zusätzlich zur Bestimmung der Oberflächenprofilparameter wurde mittels Volumenanalyse der Software der Rauhtiefewert ermittelt. Die Rauhtiefewerte befinden sich in Tabelle 6.10.

<b>Probenname</b>	<b>Rauhtiefe [mm]</b>
<b>U-O</b>	<b>0,0641</b>
<b>N-O</b>	<b>0,0678</b>
<b>N-F/T</b>	<b>0,0606</b>
<b>S-O</b>	<b>0,0538</b>
<b>K-O</b>	<b>0,0533</b>
<b>K-F/T</b>	<b>0,0322</b>
<b>S-F/T</b>	<b>0,0411</b>

*Tabelle 6.10*

In Abbildung 6.19 sind die Werte aus Tabelle 6.10 graphisch dargestellt.

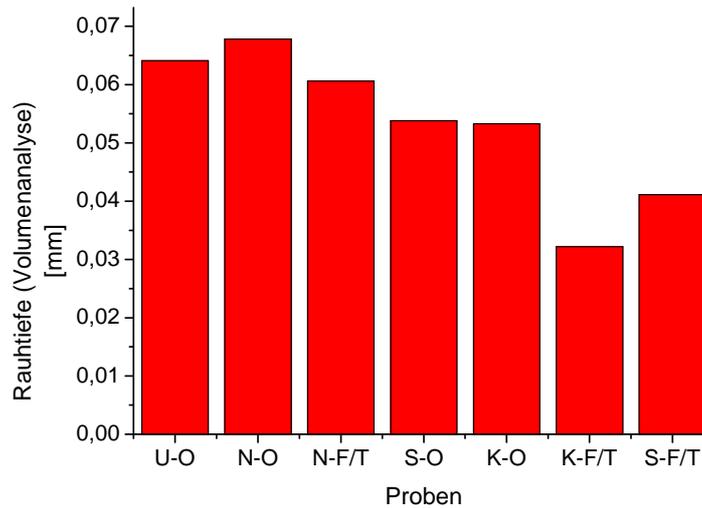


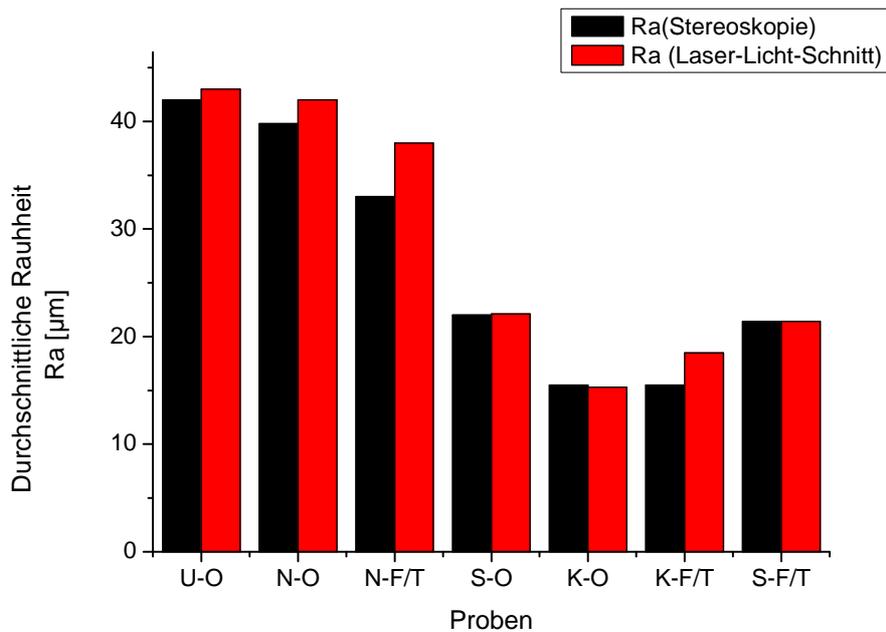
Abb. 6.19: Darstellung der Rauhtiefewerte der einzelnen Proben.

Zum Abschluss dieses Kapitels zeigt die Tabelle 6.11 den Vergleich zwischen mittels „Stereoskopischen Verfahrens“ bestimmten Ra – Werten und mittels „Laser-Licht-Schnitt-Verfahren“ gemessenen Ra Werten [GRÄF V., 2008].

<b>Probe</b>	<b>Ra (Laser-Licht- Schnitt) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Ra (Stereoskopie) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
<b>U-O</b>	<b>43</b>	<b>42</b>
<b>N-O</b>	<b>42</b>	<b>39,8</b>
<b>N-F/T</b>	<b>38</b>	<b>33</b>
<b>S-O</b>	<b>22,1</b>	<b>22</b>
<b>K-O</b>	<b>15,3</b>	<b>15,5</b>
<b>K-F/T</b>	<b>18,5</b>	<b>15,5</b>
<b>S-F/T</b>	<b>21,4</b>	<b>21,4</b>

Tabelle 6.11

Wie man aus Tabelle 6.11 erkennen kann liegen die aus den beiden verschiedenen Methoden gewonnenen Ra – Werte sehr nahe beieinander bzw. sind teilweise sogar ident. Der Inhalt aus Tabelle 6.11 wird in Abbildung 6.20 graphisch dargestellt.



*Abb. 6.20: Vergleich der mittels Stereoskopie und Laser-Licht-Schnitt-Verfahren ermittelten Ra- Werte zu den einzelnen Probentypen.*

Aus Abbildung 6.20 ist deutlich erkennbar, dass sich das Stereoskopische Verfahren hervorragend zur Bestimmung der Oberflächenparameter eignet, wie ein Vergleich mit der aufwendigeren und weniger Fläche erfassenden Laser – Lichtschnitt – Technik zeigt.

Weiters deuten die gewonnenen Daten darauf hin, dass die Durchschnittliche mittlere Rauheit Ra der mit Silikonharz bzw. Nanotechnologie beschichteten Probekörper um einige µm abnimmt. Proben mit Sumpfkalkbeschichtung haben hingegen einen erhöhten Ra – Wert nach den Frost – Tau Wechselversuchen.

## **7. ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN:**

Die Erfahrungen, die während der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche gemacht wurden, führten auch zu Ideen, wie das verwendete Gerät verbessert werden könnte.

So wäre es unter anderem von Vorteil die Größe des Stativs, auf dem die Kamera befestigt wird, zu reduzieren, um das Gerät noch handlicher zu machen und einfacheren Transport zu ermöglichen. Weiters wäre eine am Stativ fixierte Lichtquelle zur Beleuchtung der Probenoberflächen eine gute Möglichkeit Platz im Labor zu sparen, bzw. Feldversuche mit ungenügender natürlicher Beleuchtung auszuführen. Ebenso sollte die Möglichkeit nicht außer Acht gelassen werden, das Stativ so umzugestalten, dass statt der Verkipfung einer Kamera besser zwei in fixem Winkel verkippte Kameras mit einem gemeinsamen Auslöser bedient werden. Somit wird die Bedienung des Gerätes noch einfacher, und die Erstellung der Bilder beschleunigt.

Unter der Voraussetzung, dass ein Softwarehersteller ein solches Projekt unterstützt, wäre es natürlich auch möglich eine modifizierte Version der Software herzustellen, welche die aufgenommenen Bilder gleich automatisch rekonstruiert und die entsprechenden Oberflächenparameter ausgibt.

## **8. ZUSAMMENFASSUNG:**

Das Stereoskopische Verfahren, welches in dieser Arbeit zur Analyse der Oberflächenrauheit an Baustoffen verwendet wurde, zeigt sich nach den Erfahrungen, die damit gemacht wurden, als äußerst effizientes, schnelles und kostengünstiges Verfahren das zur Bestimmung vieler Oberflächenparameter (siehe Kapitel 2.2) eingesetzt werden kann.

Große Vorteile bestehen darin, dass das Gerät einfach zu bedienen ist, die Auswertung schnell erfolgt und die Genauigkeit der gemessenen Parameter, wie sich aus Vergleichsmessungen mit der Laser-Lichtschnittmethode zeigt (siehe Kapitel 6.4), genauso wie bei anderen Messverfahren, gegeben ist. Das stereoskopische Verfahren erweist sich zusätzlich als kostengünstiges Untersuchungsverfahren, weil an einer Software keine Wartungen oder Reparaturen durchgeführt werden müssen. Außerdem müssen keine teuren High-Tech-Digitalkameras verwendet werden, da kostengünstige Kameramodelle ausreichend gute Ergebnisse liefern.

Ein Nachteil der Stereoskopie ist sicherlich, dass keine besonders hohen und steilwandige Oberflächenprofile (siehe Kapitel 4.5), bzw. Oberflächen mit vielen toten Winkeln, exakt dargestellt werden können. Hier erfolgt von Seiten der Software eine Interpolation, welche die Genauigkeit des Ergebnisses reduziert. Auch spiegelnde bzw. stark lichtreflektierende Oberflächen können bei den verkippten Bildern zu Bereichen führen, die die Software nicht ordnungsgemäß rekonstruieren kann. Abhilfe schafft hier beispielsweise das Besprühen der Oberflächen mit feinem Lack bzw. Farbe, wobei hier zu bedenken ist, dass man dabei die Mikrorauheit der Oberfläche verändert.

Bei den in der Diplomarbeit durchgeführten Baustoffoberflächenuntersuchungen (siehe Kapitel 6) lieferte das stereoskopische Verfahren jedoch immer gute Ergebnisse.

Oberflächengestalt von Betonbruchflächen: So hat man in Kapitel 6.1 bei der Untersuchung von Betonbruchflächen festgestellt, dass mit zunehmendem Größtkorn die Rauigkeit an der Oberfläche anfangs zunimmt, und bei sehr großem Größtkorn wieder leicht abnimmt. Die so genannte Durchschnittliche Rauheit  $R_a$  hat bei einem Größtkorn von 8 mm den Wert 0,0226 cm, erreicht bei einem Größtkorn von 32 mm ihren Höchstwert von 0,0283 cm und sinkt bei einem Größtkorn von 64 mm auf einen Wert von 0,0278 cm. Dieses Absinken wird dadurch erklärt, dass wenn ein Riss durch das Korn verläuft, sich eine glattere Bruchfläche bildet, als wenn er um das Korn verläuft. Der Parameter  $R_t$ , der die Maximale Höhe des Rauheitsprofils darstellt, wird hingegen mit steigender Korngröße größer. Bei einem Größtkorn von 8 mm beträgt der  $R_t$  Wert 0,187 cm und wächst zusammen mit dem Größtkorn bis er bei einem Größtkorn von 64 mm einen Wert von 0,31 cm erreicht.

Oberflächengestalt von abgefrästen Strassen: In Kapitel 6.2, in dem es vorwiegend um die Untersuchung von abgefrästen Betonstraßen geht, wird neben den Oberflächenprofilparametern auch die so genannte Sandfleckmethode (siehe Kapitel 3.1) sowohl experimentell zur Bestimmung der Rauhtiefe durchgeführt, als auch am PC mit Hilfe der Volumenanalyse zur Rauhtiefeberechnung (siehe Kapitel 2.2) simuliert. Die experimentell ermittelten Rauhtiefewerte sind allesamt größer als jene, die mit der Volumenanalyse der Stereoskopiesoftware MeX Version 4.2 berechnet wurden. Allerdings liefern beide Methoden die gleichen Trends innerhalb der experimentell und der mittels Volumenanalyse ermittelten Rauhtiefewerte (siehe Kapitel 6.2, Messergebnisse).

Oberflächenuntersuchung an Asphaltfahrbahnoberflächen: Auch im Fall der Oberflächenuntersuchung an Asphaltfahrbahnoberflächen, wie sie in Kapitel 6.3 durchgeführt wurde, liefert das Stereoskopische Verfahren gute Ergebnisse. In diesem Kapitel wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie [HAIDER, 2008] versucht einen Zusammenhang zwischen der Beschaffenheit der Oberfläche- chentextur von Waschbetonfahrbahnoberflächen und dem gemessenen Rollgeräusch eines Reifens herzustellen. Ein solcher Zusammenhang konnte nicht gefunden werden. Es war jedoch dank des Stereoskopischen Verfahrens möglich, anhand der Bohrkerne von verschiedenen Streckenabschnitten, die zugehörigen Oberflächenprofilparameter (siehe Kapitel 2.2) zu bestimmen und mittels Volumenanalyse Rauhtiefewerte zu berechnen. Außerdem lieferte der Vergleich, der mittels Stereoskopie gewonnenen Oberflächenparameter und der mit dem Messsystems RoadSTAR gemäß [ÖNORM EN ISO 13473-1] ermittelten Oberflächenparameter, einen Hinweis darauf, dass zwischen dem Parameter  $R_z$  (siehe Kapitel 2.2) und dem Parameter MPD (RoadSTAR) ein Zusammenhang bestehen dürfte.

Oberflächenstrukturen an kalkbeschichtete Kalksteine: In Kapitel 6.4 werden kalkbeschichtete Kalksteine untersucht, die im Bereich des Denkmalschutzes eingesetzt werden, um gegen schlechte Umwelteinflüsse widerstandsfähiger zu sein. Hierbei wurden verschiedene unbeschichtete und beschichtete Kalkproben die teilweise Frost-Tau-Wechseln unterzogen wurden in Bezug auf ihre Oberflächenparameter untersucht. Im Gegensatz zu den Kapiteln 6.1, 6.2 und 6.3 stellten die Kalkoberflächen deshalb eine Herausforderung für die Methode der Stereoskopie dar, da die feine Rauigkeit der Oberfläche gerade noch, bis gar nicht mit freiem Auge erkennbar war. Allerdings verliefen auch unter diesen schwierigen Bedingungen die Untersuchungen einwandfrei und es konnten wie in den vorhergegangenen Untersuchungen alle Oberflächenprofilparameter und dank der Volumenanalyse wieder zu den Proben zugehörige Rauhtiefewerte ermittelt werden.

Somit ist aus Betrachtung obiger Ergebnisse zusammenfassend zu sagen, dass die Oberflächenuntersuchung an Baustoffen mittels Stereoskopischem Verfahren unter den vielen anderen Messverfahren in Zukunft wohl immer öfter eingesetzt werden wird. Die Vorteile der Stereoskopie liegen mit geringen Kosten, einfacher Handhabung des Gerätes, flexiblem Einsatz an verschiedenen Baustoffoberflächen und genauen und schnell ermittelten Messergebnissen klar auf der Hand.

## 9. LITERATUR:

In diesem Kapitel wird die zur Verfassung der vorliegenden Diplomarbeit zitierte und zum Zwecke der Information verwendete Literatur in alphabetischer Reihenfolge angeführt.

[ALICONA MeX Software 2005] Graz, Austria: Alicona Imaging GmbH, Softwarebeschreibung „MeX Version 4.2“ (Help Document) 2005.

<http://www.alicon.com/>

[BACHMANN T.,1998] „Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn“, Fortschrittbericht-Berichte VDI, Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Nr. 286, VDI-Verlag, Darmstadt, 1998.

[BECKENBAUER, MÜLLER, 2008] „Physik der Reifen-Fahrbahn Geräusche“, Geräuschemindernde Fahrbahnbeläge in der Praxis, Lärmaktionstage, 4. Informationstage, 2008.

[BLAB R., KIRCHMAIER L., 2007] Straßenbautechnisches Seminar, „Wege zur griffigen Straße, Labor- und Feldprüfmethode“, TU Wien 2007.

[BÜHLMANN F., 1985] „Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit von Fahrbahnen“, I-SETH Mitteilungen, Heft 53, Zürich 1985.

[CAPREZ M., 1995] „Oberflächeneigenschaften – Messverfahren und Beurteilung“, Straße und Verkehr Heft 4 / 1995.

[Carl Mahr Holding GmbH, 2003] Göttingen, Deutschland, 2003.

<http://www.mahr.de/>

[DIN EN ISO 3274: 4/1998] Geometrische Produktspezifikation (GPS), Oberflächenbeschaffenheit: „Tastschnittverfahren: Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten“, 1998.

[DUBBEL, 1997] „Taschenbuch für den Maschinenbau“, 19. Auflage, 1997.

[EN-ISO-4287] Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: „Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit“ (ISO 4287:1997), Deutsche Fassung EN ISO:4287:1997.

[EN-ISO-4288] Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: „Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit“ (ISO 4288:1996); Deutsche Fassung EN ISO 4288:1997.

[EN-ISO-3274] Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: „Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten“ (ISO 3274:1996); Deutsche Fassung EN ISO 3274:1997.

[EN ISO 11562] Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: „Tastschnittverfahren - Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern“ (ISO 11562:1996); Deutsche Fassung EN ISO 11562:1997.

- [ERVIN E., 1987] "Metals Handbook", Ninth Edition, Vol.12, Fractography ASM Metals Park Ohio, 1987.
- [GEYER W., 1972]: „Der Einfluss geometrischer Reibflächen-Rauhigkeitsformen auf das trockene und nasse Reibverhalten von Gummi“, Automobilindustrie, Heft 2 und Heft 4, Würzburg 1972.
- [GRÄF V., 2008] Projektarbeit zu „Messung der Oberflächenrauigkeit von beschichteten Kalkproben durch unterschiedliche Messverfahren“, Labor für Materialwissenschaften, TU Wien, 2008.
- [GRÄTZ B., 1998] „Langzeitwirkung von dünnen Schichten bezüglich der Erhaltung relevanter Oberflächenmerkmale“, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 761, Bonn 1998.
- [HAIDER M., 2008] Bericht „Lärmtechnisches Verhalten von Waschbetonoberflächen Straßenforschungsvorhaben 3.307 Endbericht“, Österreichisches Forschungs und Prüfungszentrum Arsenal Ges.m.b.H., Wien 2008.
- [HUSCHEK S., 1995] „Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe, Straße und Autobahn“, Heft 3 Bonn 1995.
- [HUSCHEK S., 1996b] Kennzeichnung der Oberflächenrauheit und deren Einfluss auf die Griffigkeit und die Reifengeräusche, Straße und Autobahn, Heft 6, Bonn, 1996b.
- [INNOWEP, Messgerät TRACEiT®, Würzburg, Deutschland 2008] Innowep G.m.b.H., Würzburg, Deutschland 2008.  
<http://www.innowep.com>
- [KALENDER U. , 1987] „Wechselwirkung Reifen/Fahrbahnoberfläche auf den Kraftschluss bei Nässe und hohen Fahrgeschwindigkeiten bei Verwendung neuester Reifentypen“, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik , Heft 498, Bonn, 1987.
- [KAUFMANN N., 1970] „Das Sandflächenverfahren“, VFT-Mitteilungen „Straßenbau und Bautenschutz mit Steinkohlenteer“, September 1970.
- [KOLEDNIK O., 1981] „Ein Beitrag zur Stereophotogrammetrie am Rasterelektronenmikroskop“, Praktische Metallographie 18, 1981.
- [KUMMER et al., 1967] „Verbesserter Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn-Ergebnis einer neuen Reibungstheorie“, Automobiltechnische Zeitschrift, November 1967, Stuttgart 1967.
- [KUMMER et al., 1970] „Versuch der Festlegung von Anforderungen an die Griffigkeit von Hauptverkehrsstraßen außerhalb von Ortschaften“. Im Intern. Kolloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe in Berlin 1968, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, München, Düsseldorf, 1970
- [MANHART C., HARTMUTH H., 2006] „Anwendung eines stereoskopischen Verfahrens zur fraktografischen Untersuchung von grobkeramischen Baustoffen“, Praktische Metallographie Heft 9, 2006.

[MANHART C., 2007] „Fraktografische Untersuchungen an basischen feuerfesten Baustoffen unterschiedlicher Sprödigkeit“, Dissertation an der Montanuniversität Leoben, Juli 2007.

[MARINELLO F. et al. ,2008] „Critical Factors in SEM 3D stereo microscopy“, Measurement Science and Technology, Band 19 Ausgabe 6, Juni 2008.

[MARSCHALL H.U., 2000] “Three-Dimensional Analysis of Decorated Ceramic Fracture Surfaces by Automatic Stereophotogrammetry“, Journal of the American Ceramic Society, Band 83 Ausgabe 1, Jänner 2000.

[MAURER P., 2007] “Aspekte der Fahrbahngriffigkeit und ihr Einfluss auf erreichbare Pkw-Bremsverzögerungen“, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Straßenforschung Heft 564, Wien 2007

[MEINKE H., 2004] „Anleitung für das Praktikum Oberflächenmesstechnik“, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin 2004.

[MORRIS, 1968] „Bau und Unterhaltung von Schnellstraßen mit großem Anteil an schwerem Güterverkehr“, VtT Mitteilungen 1968.

[NEUBAUER, 1995] „Fahrsicherheit: Polierverhalten von Mineralstoffen“. Strasse und Verkehr, Heft Nr. 4, 1995.

[ÖNORM-EN-13036-1] Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren - Teil 1: „Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mittels eines volumetrischen Verfahrens“, 2001.

[ÖNORM-EN-13036-4] Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: „Der Pendeltest“, 2003.

[ÖNORM EN ISO 13473-1] Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen. Teil1: „Bestimmung der mittleren Profiltiefe“, 2004.

[OSANNA P.H. et al. 2008] „Geometrische Produktspezifikation und Verifikation - GPS“, Abteilung für Maschinenbau und Messtechnik, TU Wien 2008.

[PATRIA VAMMAS AEC] „Produktbeschreibung Vammas Skiddometer BV 11“, 2003.

[PFEILER A., 2004] „Erhöhung der Griffigkeit von Asphaltstraßen – Der Einfluss der Polierresistenz feiner Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltdeckschichten“. Diss. am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung an der TU Wien 2004.

[PUCHER E., GIRARD J., LITZKA J., HABERL J., 2003]  
"Das Rollgeräusch von Pkw- und Lkw-Reifen auf lärm mindernden Fahrbahndecken";  
Vortrag: 1. Symposium Reifen und Fahrwerk, Wien (eingeladen); 30.09.2003; in: "1. Symposium Reifen und Fahrwerk", Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, TU Wien, Wien 2003.

[REIMPELL J., 1971] „Fahrwerktechnik“, Vogel-Verlag, Würzburg 1971.

[SCHÄFER H. et al., 1996] „Oberflächenrauheit und Haftverbund“, Buch: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 456, Berlin 1996.

[SCHULZE K.-H., 1970] „Zur quantitativen Bewertung der Rauheit von Straßenoberflächen in Beziehung zum Reibungswiderstand bei Nässe, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, BMV, Heft 103, Bonn, 1970.

[SLUIS v.d.S. 2002] „Ableitung einer Wechselbeziehung zwischen Griffigkeit, Geschwindigkeit und Haltesichtweite anhand realer Bremsvorgänge“. Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch- Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen 2002.

[STEINBAUER B., MAYER G., VAN DER SLUIS S., 2000] „Signifikante Griffigkeitswerte aus Verkehrssicherheitssicht“; Schlussbericht zur Auftragsenerweiterung des BMV BW-Forschungsprojektes FE 04.182/1998/CGB „Abnahmwerte für die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen“, Aachen 2000.

[SULTEN P., 1985] „Einfluss der Oberflächenausführung von Betondecken auf die Griffigkeit“, Straße und Autobahn, Heft 3, Bonn, 1985.

[TSCHEGG et al., 2007] „Mechanische und bruchmechanische Bewertung von Grenzflächen zwischen angefrästen und neuen Asphaltsschichten“, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Straßenforschung Heft 575, Wien 2007.

[WEHNER B., 1970] „Einige neue Feststellungen zu den Fragen der Straßengriffigkeit“, Straße und Autobahn, Heft 11, Bonn 1961.

[ZIPKES E., 1984] „Griffigkeit-Bremsspur-Kraftübertragung“, ISETH Mitteilungen, Heft 56 Zürich 1984.

# ANHANG:

## Kapitel 6.1: Einzelmessungen

Probenname	KG [mm]	WF [mm <sup>2</sup> ]	PF [mm <sup>2</sup> ]	WF / PF	Sp [cm]	Sv [cm]	St [cm]
1a-0-3	8	4715	3495	1,349	0,622	0,573	1,195
1a-0-3	8	4495	3287	1,367	1,031	0,705	1,735
1a-0-2	8	4080	2872	1,42	1,045	1,28	2,325
1a-0-2	8	5475	3956	1,383	0,625	1,251	1,876
1a-0-1	8	3383	2450	1,3807	0,718	0,819	1,537
1a-0-1	8	3474	2520	1,37	0,92	0,814	1,734
2-0-2	16	8916	6836	1,304	1,682	1,303	2,985
2-0-2	16	5943	4348	1,367	1,349	1,528	2,876
2-30-3	16	4254	3331	1,276	0,581	1,113	1,694
2-30-3	16	4837	3706	1,305	0,726	0,488	1,214
3a-0-3	32	7814	6262	1,247	0,855	0,724	1,579
3a-0-3	32	5536	4127	1,341	2,2	0,744	2,948
3a-45-3	32	7691	6079	1,265	1,294	1,206	2,5
3a-45-3	32	7171	5401	1,327	1,194	1,4	2,594
3a-0-2	32	5615	4206	1,334	1,691	1,715	3,405
3a-0-2	32	5725	4287	1,335	1,503	1,357	2,86
5-0-4	64	5946	4265	1,3943	1,447	1,756	3,203
5-0-4	64	5603	4267	1,312	1,785	0,942	2,727
5-0-3	64	5298	3374	1,57	3,391	1,641	5,032
5-0-3	64	6460	4407	1,465	1,613	3,074	4,687
5-0-2	64	6326	4658	1,358	1,306	1,471	2,777
5-0-2	64	5211	3931	1,325	0,997	1,43	2,427

*Tabelle A.1*

Probenname	KG [mm]	Ra [cm]	Rp [cm]	Rv [cm]	Rt [cm]	Rz [cm]	$\lambda_c$ [cm]
1a-0-3	8	0,024	0,0845	0,092	0,1765	0,1765	1,226
1a-0-3	8	0,025	0,0915	0,1	0,1915	0,191	1,196
1a-0-2	8	0,0275	0,092	0,1005	0,1925	0,1925	1,035
1a-0-2	8	0,0185	0,116	0,116	0,232	0,232	1,933
1a-0-1	8	0,021	0,0745	0,087	0,1615	0,162	0,988
1a-0-1	8	0,0195	0,079	0,0915	0,1705	0,171	1,227
2-0-2	16	0,0215	0,1315	0,01415	0,273	0,273	2,343
2-0-2	16	0,029	0,0925	0,0935	0,186	0,186	1,073
2-30-3	16	0,023	0,0845	0,0905	0,175	0,175	1,293
2-30-3	16	0,033	0,083	0,092	0,175	0,1755	1,2371
3a-0-3	32	0,0315	0,1175	0,112	0,2295	0,2295	1,74
3a-0-3	32	0,024	0,1275	0,11	0,2375	0,2375	1,7
3a-45-3	32	0,021	0,1425	0,135	0,2775	0,2775	2,117
3a-45-3	32	0,0315	0,132	0,1385	0,2705	0,2705	1,89
3a-0-2	32	0,034	0,1195	0,124	0,2435	0,243	1,82
3a-0-2	32	0,0275	0,1365	0,1295	0,266	0,2665	1,788
5-0-4	64	0,0185	0,125	0,132	0,257	0,257	1,699
5-0-4	64	0,0225	0,107	0,114	0,221	0,221	1,982
5-0-3	64	0,0285	0,2165	0,2605	0,477	0,477	1,951
5-0-3	64	0,043	0,217	0,181	0,398	0,398	1,707
5-0-2	64	0,0335	0,137	0,13	0,267	0,2675	1,95
5-0-2	64	0,0205	0,115	0,125	0,24	0,24	1,855

Tabelle A.2

Zusammenfassung der Oberflächenparameter: (siehe Kapitel 2.2)

GK... Größtkorn

WF... Wahre Fläche

PF ... Projizierte Fläche

Sp ... Größte Höhe

Sv ... Größte Tiefe

St ... Maximale Höhe

Ra... Durchschnittliche mittlere Rauheit

Rp... Maximalrauheit

Rv... Minimalrauheit

Rt ... Gesamthöhe des Rauheitsprofils

Rz ... Mittelwert über Rt über fünf  $\lambda_c$

$\lambda_c$  ... Grenzwellenlänge

## Kapitel 6.2: Einzelmessungen

Messstelle	WF [mm <sup>2</sup> ]	PF [mm <sup>2</sup> ]	WF/PF	Sp [mm]	Sv [mm]	St [mm]
1A	23302	16916	1,385	8	10,44	18,44
1A	23977	16908	1,418	8,64	9,77	18,4
2A	29812	21464	1,389	11,3	11,57	22,87
2A	31484	22226	1,416	12,98	12,6	25,58
2B	32360	224,4	1,444	10,19	11,67	21,85
2B	30325	21553	1,407	9,3	11,71	21
3A	31895	21954	1,453	7,3	11,57	18,87
3A	31828	21950	1,449	10,51	13,08	23,6
3B	32005	21464	1,491	11,04	12,12	23,17
3B	31840	21295	1,495	10,53	10,95	21,47
4A	16936	9712	1,743	7,97	12,27	20,42
4A	14929	8607	1,734	9,56	10,72	20,28
5A	32106	21732	1,477	9,77	11,25	21,01
5A	34410	23247	1,48	10,94	11,86	22,8
6A	25178	17398	1,447	15,6	10,53	26,13
6A	28671	19970	1,436	11,11	12,79	23,9
6B	26716	17918	1,491	11,59	11,93	23,51
6B	29004	19410	1,494	11,59	11,91	23,49
7A	19067	12381	1,539	7,38	13,05	20,44
7A	32804	19358	1,694	10,05	11,32	21,37
8A	18599	14146	1,315	8,13	7,98	16,1
8A	20402	15516	1,315	8,15	8,82	16,97

*Tabelle A.3*

Messstelle	Ra [mm]	Rp [mm]	Rv [mm]	Rt [mm]	Rz [mm]	$\lambda_c$ [mm]
1A	0,49	1,645	1,835	3,48	3,485	31,76
1A	0,5	1,695	1,84	3,535	3,54	31,51
2A	0,525	1,7	2,09	3,79	3,795	34,22
2A	0,525	1,795	2,145	3,94	3,935	34,73
2B	0,565	1,96	2,24	4,2	4,2	34,85
2B	0,525	1,825	2,11	3,935	3,925	34,42
3A	0,555	1,9	2,175	4,075	4,075	34,73
3A	0,56	1,92	2,295	4,215	4,215	34,89
3B	0,54	1,85	2,09	3,94	3,94	34,29
3B	0,53	1,935	2,06	3,995	3,995	34,02
4A	0,595	2,055	2,62	4,675	4,675	17,47
4A	0,58	2	2,435	4,435	4,43	16,67
5A	0,58	2,01	2,165	4,175	4,175	35,28
5A	0,565	1,98	2,105	4,085	4,08	35,6
6A	0,51	1,88	2	3,88	3,88	31,58
6A	0,515	1,87	2,045	3,915	3,91	33,35
6B	0,57	1,99	2,085	4,075	4,08	33,23
6B	0,565	2	2,055	4,055	4,055	32,63
7A	0,405	1,63	2,45	4,08	4,085	22,01
7A	0,48	1,81	2,645	4,455	4,455	32,6
8A	0,265	1,14	1,195	2,335	2,33	29,16
8A	0,265	1,13	1,21	2,34	2,34	29,12

Tabelle A.4

Zusammenfassung der Oberflächenparameter: (siehe Kapitel 2.2)

WF... Wahre Fläche

PF ... Projizierte Fläche

Sp ... Größte Höhe

Sv ... Größte Tiefe

St ... Maximale Höhe (=Sp+Sv)

Ra... Durchschnittliche mittlere Rauheit

Rp... Maximalrauheit

Rv... Minimalrauheit

Rt ... Gesamthöhe des Rauheitsprofils (=Rp+Rv)

Rz ... Mittelwert über Rt über fünf  $\lambda_c$

$\lambda_c$  ... Grenzwellenlänge

## Simulation der Sandfleckmethode mit der Volumenanalyse der Software:

Messposition	Projizierte Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]	Rauhtiefe [mm]
1A Bild1	15572	19136	1,2288
1A Bild2	17647	23820	1,3498
2A Bild1	20470	29076	1,4204
2A Bild2	20713	29042	1,4021
2B Bild1	19890	28728	1,4443
2B Bild2	21288	31111	1,4614
3A Bild1	20641	32527	1,5758
3A Bild2	21009	32265	1,5357
3B Bild1	18761	29575	1,5764
3B Bild2	20489	30064	1,4673
4A Bild1	11238	37579	3,3439
4A Bild2	12010	39014	3,2484
5A Bild1	20464	35313	1,7256
5A Bild2	21686	37888	1,7471
6A Bild1	16677	23546	1,4118
6A Bild2	18340	27656	1,5079
6B Bild1	17419	28017	1,6084
6B Bild2	18651	29514	1,5824
7A Bild1	12265	10383	0,8465
7A Bild2	17661	15446	0,8745
8A Bild1	13286	8807	0,6628
8A Bild2	14779	9934	0,6721

Tabelle A.5

## Kapitel 6.3: Einzelmessungen:

*Messstrecke 3: Bohrkerne Nr. 19-24*

*Messstrecke 6: Bohrkerne Nr. 7-12*

*Messstrecke 7: Bohrkerne Nr. 25-30*

*Messstrecke 9: Bohrkerne Nr. 13-18*

*Messstrecke 10: Bohrkerne Nr. 1-6*

Probenname Bohrkern Nr.	LMA [dB]*	WF [mm <sup>2</sup> ]	PF [mm <sup>2</sup> ]	WF/PF	Sp [mm]	Sv [mm]	St [mm]
1	103,72	2696	2317	1,1637	3,81	4,25	8,06
2	103,4	1688	1455	1,1597	2,63	2,93	5,56
3		2665	2342	1,138	3,39	3,59	6,988
4	102,7	2534	2159	1,1736	3,94	7,81	11,75
5	102,01	2949	2558	1,1529	3,73	3,87	7,613
6		2278	1981	1,1499	3,45	3,66	7,107
7	103,7	2812	2601	1,081	3,75	3,89	7,644
8	104,2	2304	2134	1,0793	5,21	3,77	8,993
9	103,9	2748	2505	1,0967	3,62	7,05	10,67
10	102,9	1910	1644	1,1616	2,94	3,88	6,832
11	102,8	1972	1774	1,1115	3,42	4,71	8,137
12		2330	2115	1,1015	3,28	4,03	7,313
13	103,05	2781	2579	1,0784	3,12	4,39	7,507
14	103,42	2458	2261	1,087	2,99	3,24	6,235
15		2243	2066	1,0857	3,1	3,41	6,505
16	101,52	2459	2281	1,0778	3,37	3,74	7,111
17	101,47	2849	2602	1,0948	3,53	3,47	7
18		2039	1864	1,094	3,43	3,52	6,942
19	103,53	1857	1735	1,0699	3,32	3,14	6,456
20	103,75	2137	1888	1,132	2,92	3,24	6,157
21		2033	1892	1,0746	3,00	3,36	6,36
22	101,55	2268	1940	1,1692	3,77	3,30	7,073
23	101,71	2143	1864	1,15	3,12	3,48	6,6
24		2762	2359	1,1711	3,59	4,00	7,599
25	104,03	2475	2159	1,1463	4,01	4,72	8,757
26	103,83	3108	2673	1,1626	5,18	4,94	10,12
27		2632	2284	1,1521	4,78	4,05	8,829
28	104,55	1615	1448	1,1152	3,73	3,45	7,226
29	104,7	1727	1561	1,1061	3,39	3,30	6,696
30		1519	1364	1,1133	3,47	3,10	6,58

Tabelle A.6

\* : der LMA – Wert wurde wie in der Einleitung des Kapitels 6.3 erklärt nicht mittels stereoskopischen Verfahrens gemessen.

Probenname Bohrkern Nr.	Ra [mm]	Rp [mm]	Rv [mm]	Rt [mm]	Rz [mm]	$\lambda_c$ [mm]
1	0,1775	0,523	0,6185	1,1415	1,1365	12,77
2	0,1555	0,474	0,539	1,013	1,013	10,54
3	0,1805	0,509	0,598	1,107	1,1075	12,35
4	0,155	0,56	0,655	1,215	1,215	12,7
5	0,1625	0,5055	0,5605	1,066	1,0655	13,35
6	0,1345	0,4415	0,4455	0,887	0,887	12,17
7	0,1235	0,369	0,458	0,827	0,827	12,47
8	0,0865	0,3225	0,315	0,6375	0,6375	12,1
9	0,125	0,39	0,52	0,91	0,4555	13,28
10	0,1325	0,3905	0,5615	0,952	0,9525	11,2
11	0,092	0,322	0,368	0,69	0,69	11,51
12	0,0935	0,3655	0,379	0,7445	0,7445	11,77
13	0,076	0,274	0,3285	0,6025	0,6025	13,4
14	0,09	0,2955	0,318	0,6135	0,614	12,18
15	0,0845	0,299	0,2955	0,5945	0,595	11,02
16	0,0995	0,332	0,315	0,647	0,647	13,12
17	0,117	0,3835	0,37	0,7535	0,7535	12,57
18	0,101	0,3535	0,3345	0,688	0,688	11,7
19	0,0935	0,297	0,337	0,634	0,634	10,66
20	0,1205	0,4015	0,487	0,8885	0,8885	10,46
21	0,0995	0,3305	0,4355	0,766	0,766	11,53
22	0,14	0,419	0,477	0,896	0,8965	11,55
23	0,1675	0,441	0,5195	0,9605	0,9605	11,6
24	0,166	0,4955	0,4625	0,958	0,958	12,4
25	0,149	0,4175	0,6405	1,058	1,0585	12,85
26	0,165	0,455	0,61	1,065	1,065	14,23
27	0,1395	0,4015	0,5495	0,951	0,951	12,53
28	0,098	0,316	0,45	0,766	0,766	10,15
29	0,104	0,3415	0,3665	0,708	0,708	9,862
30	0,1045	0,321	0,416	0,737	0,737	10,05

Tabelle A.7

Zusammenfassung der Oberflächenparameter: (siehe Kapitel 2.2)

WF... Wahre Fläche

PF ... Projizierte Fläche

Sp ... Größte Höhe

Sv ... Größte Tiefe

St ... Maximale Höhe (=Sp+Sv)

Ra... Durchschnittliche mittlere Rauheit

Rp... Maximalrauheit

Rv... Minimalrauheit

Rt ... Gesamthöhe des Rauheitsprofils (=Rp+Rv)

Rz ... Mittelwert über Rt über fünf  $\lambda_c$

$\lambda_c$  ... Grenzwellenlänge

## Simulation der Sandfleckmethode mit der Volumenanalyse der Software:

<b>Probenname Bohrkern Nr.</b>	<b>Projizierte Fläche [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Volumen [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>Rauhtiefe [mm]</b>
1	2413	1200	0,4973
2	1757	944,5	0,5375
3	2280	1116	0,4894
4	2098	867,2	0,4133
5	2461	1079	0,4384
6	1889	674,6	0,3571
7	2514	990,6	0,3940
8	2097	508,8	0,2426
9	2374	739,8	0,3116
10	1583	513,5	0,3243
11	1735	412,4	0,2376
12	2090	541,4	0,2590
13	2507	547,3	0,2183
14	2221	595,1	0,2679
15	2056	559,4	0,2720
16	2244	630,9	0,2811
17	2547	806,5	0,3166
18	1861	497,2	0,2671
19	1734	464,3	0,2677
20	1853	635	0,3426
21	1864	531,3	0,2850
22	1881	816,5	0,4340
23	1839	701,3	0,3813
24	2398	1116	0,4653
25	2107	735,8	0,3492
26	2633	1130	0,4291
27	2235	888,9	0,3977
28	1404	501,5	0,3571
29	1423	466,1	0,3275
30	1335	376,8	0,2822

*Tabelle A.8*

## Kapitel 6.4: Einzelmessungen:

Probename	WF [mm <sup>2</sup> ]	PF [mm <sup>2</sup> ]	WF/PF	Sp [mm]	Sv [mm]	St [mm]
U-O-1	1012	919,4	1,1	1,78	2,59	4,37
U-O-2	1330	1190	1,11	0,6	1,6	2,2
N-O-1	1129	1033	1,1	0,57	0,96	1,53
N-O-2	1192	1072	1,11	1,17	1,41	2,58
N-F/T-1	1168	1104	1,05	0,5	1,14	1,64
N-F/T-2	1216	1112	1,09	0,52	0,85	1,37
S-O-1	1042	1024	1,02	0,65	0,9	1,55
S-O-2	1093	1076	1,01	0,66	0,99	1,65
K-O-1	582,7	575,2	1,01	0,58	0,74	1,32
K-O-2	1159	1143	1,01	0,69	1,01	1,71
K-F/T-1	1219	1203	1,01	0,42	0,83	1,25
K-F/T-2	895,2	885,9	1,01	0,71	0,78	1,49
S-F/T-1	1193	1180	1,01	0,65	1,11	1,76
S-F/T-2	904,7	888,5	1,02	0,6	0,73	1,33

Tabelle A.9

Probename	Ra [mm]	Rp [mm]	Rv [mm]	Rt [mm]	Rz [mm]	$\lambda c$ [mm]
U-O-1	0,036	0,105	0,245	0,35	0,35	7,078
U-O-2	0,0475	0,147	0,3	0,447	0,45	8,87
N-O-1	0,0365	0,113	0,24	0,353	0,36	8,04
N-O-2	0,043	0,1305	0,23	0,3605	0,4	8,54
N-F/T-1	0,028	0,0985	0,2	0,2985	0,3	8,26
N-F/T-2	0,038	0,115	0,25	0,365	0,365	8,37
S-O-1	0,024	0,083	0,11	0,193	0,195	7,79
S-O-2	0,02	0,0725	0,095	0,1675	0,17	8,8
K-O-1	0,0135	0,0505	0,0455	0,096	0,074	5,4
K-O-2	0,0175	0,0735	0,071	0,1445	0,145	8,87
K-F/T-1	0,0165	0,058	0,0725	0,1305	0,135	9,04
K-F/T-2	0,0145	0,059	0,059	0,118	0,115	8,12
S-F/T-1	0,0165	0,0615	0,0655	0,127	0,13	8,92
S-F/T-2	0,0185	0,0805	0,083	0,1635	0,16	7,87

Tabelle A.10

Zusammenfassung der Oberflächenparameter: (siehe Kapitel 2.2)

WF... Wahre Fläche

PF ... Projizierte Fläche

Sp ... Größte Höhe

Sv ... Größte Tiefe

St ... Maximale Höhe (=Sp+Sv)

Ra... Durchschnittliche mittlere Rauheit

Rp... Maximalrauheit

Rv... Minimalrauheit

Rt ... Gesamthöhe des Rauheitsprofils (=Rp+Rv)

Rz ... Mittelwert über Rt über fünf  $\lambda c$

$\lambda c$  ... Grenzwellenlänge

## Simulation der Sandfleckmethode mit der Volumenanalyse der Software:

<b>Probenname</b>	<b>Volumen [mm<sup>3</sup>]</b>	<b>Fläche [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Rauhtiefe [mm]</b>
<b>U-O-1</b>	<b>47,36</b>	<b>856</b>	<b>0,0553</b>
<b>U-O-2</b>	<b>83,4</b>	<b>1145</b>	<b>0,0728</b>
<b>N-O-1</b>	<b>59,5</b>	<b>973,3</b>	<b>0,0611</b>
<b>N-O-2</b>	<b>77,64</b>	<b>1042</b>	<b>0,0745</b>
<b>N-F/T-1</b>	<b>50,64</b>	<b>1004</b>	<b>0,0504</b>
<b>N-F/T-2</b>	<b>74,13</b>	<b>1049</b>	<b>0,070</b>
<b>S-O-1</b>	<b>55,63</b>	<b>951,9</b>	<b>0,0584</b>
<b>S-O-2</b>	<b>49,45</b>	<b>1006</b>	<b>0,0491</b>
<b>K-O-1</b>	<b>40,31</b>	<b>598,2</b>	<b>0,0673</b>
<b>K-O-2</b>	<b>41,08</b>	<b>1046</b>	<b>0,0392</b>
<b>K-F/T-1</b>	<b>39,28</b>	<b>1141</b>	<b>0,0344</b>
<b>K-F/T-2</b>	<b>24,9</b>	<b>831,9</b>	<b>0,0299</b>
<b>S-F/T-1</b>	<b>41,48</b>	<b>1110</b>	<b>0,0373</b>
<b>S-F/T-2</b>	<b>36,38</b>	<b>811,3</b>	<b>0,0448</b>

*Tabelle A.11*