

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. W. Ressel

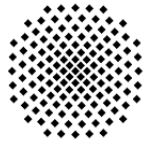
**Einflüsse der
mikroskaligen Oberflächengeometrie
von Asphaltdeckschichten
auf das Tribosystem Reifen-Fahrbahn**

Markus Weise

ISSN 0932 - 402X
ISBN 978 - 3 - 9816754 - 3 - 6
D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 53 (November 2015)



Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. W. Ressel

**Einflüsse der
mikroskaligen Oberflächengeometrie
von Asphaltdeckschichten
auf das Tribosystem Reifen-Fahrbahn**

Markus Weise

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 53 (November 2015)

Herausgeber : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart

Copyright : Das Copyright liegt beim Verfasser.

Eigenverlag und Vertrieb : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart

Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Hinweis / Note:

Diese Veröffentlichung ist auch als "Elektronische Dissertation" online unter <http://elib.uni-stuttgart.de> verfügbar und kann dort im PDF-Format heruntergeladen werden.

This paper is also published online as "Electronic Dissertation" at <http://elib.uni-stuttgart.de> and can be downloaded there as PDF file.

Einflüsse der mikroskaligen Oberflächen- geometrie von Asphaltdeckschichten auf das Tribosystem Reifen-Fahrbahn

Vom Stuttgart Research Centre for Simulation Technology (SRC SimTech) und der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Markus Weise

aus Albstadt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner

apl. Prof. Dr.-Ing. Holger Class

Tag der mündlichen Prüfung: 05.10.2015

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau

2015

für Dominika, Hanna und Tim

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter und als Mitglied der Graduiertenschule des Stuttgart Research Centre for Simulation Technology (SRC SimTech) der Universität Stuttgart.

Während dieser Zeit am Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau des Instituts für Straßen- und Verkehrswesens bekam ich die Gelegenheit mich fachlich und persönlich weiter zu entwickeln. Für diese Möglichkeit und für die Betreuung der Dissertation möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel, meinem Doktorvater, herzlich danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner und Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Holger Class danke ich ebenfalls sehr für die Übernahme des Korreferats.

Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Wolfgang Osten des Instituts für Technische Optik der Universität Stuttgart, Herrn Dipl.-Ing. Jens Skarabis des Centrums Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München und Herrn Dipl.-Ing. Peter Nutz des Instituts für Verkehrswissenschaft der Technischen Universität Wien für die Durchführung beziehungsweise für die Unterstützung bei der Durchführung von optischen Texturmessungen und der Bereitstellung von Texturdaten.

Besonderer Dank gilt meinen Kollegen am Lehrstuhl, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben sowie allen Hiwis und Diplomanden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meiner Familie, meiner Frau und meinen beiden Kindern bedanken, die das ein oder andere Wochenende auf mich verzichten mussten und mich trotzdem in jeder Phase der Arbeit unablässig gestärkt haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken. Sie haben es mir überhaupt ermöglicht diesen Werdegang einzuschlagen. Dabei konnte ich mich immer auf ihre Unterstützung verlassen.

Erklärung

Stuttgart, 16. Oktober 2015

Gemäß §6 (3) der Promotionsordnung der Universität Stuttgart erkläre ich hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation abgesehen von den ausdrücklich bezeichneten Quellen selbstständig verfasst habe.

Markus Weise

Zusammenfassung

Im Verkehrswesen werden an eine qualitativ hochwertige und dauerhafte Straßenverkehrsanlage besondere Anforderungen hinsichtlich ihrer Sicherheit und Funktionalität gestellt. In der vorliegenden Arbeit werden daher die qualitativen und quantitativen Einflüsse von extrinsischen und intrinsischen Faktoren auf diese wesentlichen Grundanforderungen untersucht.

Bei einer isolierten Betrachtung der Oberfläche einer Fahrbahndeckschicht als das Verbindungselement zwischen dem Reifen und der Straße hinsichtlich dieser Grundanforderungen, gelten ein ausreichendes Drainagevermögen, die Griffigkeit und das akustische Verhalten als die zentralen Oberflächeneigenschaften. Diese funktionalen Eigenschaften werden im Wesentlichen durch die geometrische Ausprägung einer Deckschicht, der Textur, beeinflusst und können unterschiedliche, teils gegensätzliche Anforderungen besitzen. Beispielsweise ist die Grobrauheit (Makrotextur) für das horizontale Drainagevermögen ausschlaggebend, während die Feinrauheit (Mikrotextur) für eine ausreichende Haftreibung zwischen Reifen und Fahrbahn verantwortlich ist. Umgekehrt existiert ein Wellenlängenbereich der Oberflächentextur, der sowohl auf die Griffigkeit als auch auf das akustische Verhalten der Deckschicht einwirkt. Das übergeordnete Ziel aktueller Forschungsarbeiten im Straßenwesen ist daher die Entwicklung von Modellen, auf deren Grundlage jede der Oberflächeneigenschaften für sich mittels numerischen Simulationsverfahren abgebildet werden kann. Eine anschließende Kombination dieser einzelnen Modelle stellt die Möglichkeit in Aussicht, im Bereich der Asphalttechnologie zukünftig Materialdesign zu betreiben. Auf diese Weise lassen sich, je nach Anforderung an die Oberflächeneigenschaften einer konkreten Straße, bestimmte funktionale Eigenschaften gezielt begünstigen.

Im Fokus dieser Arbeit liegt die Untersuchung der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen. Primäres Ziel ist dabei die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der hochaufgelöst gemessenen Geometrie der Oberflächentextur auf der Mikroskala und der daraus abzuleitenden Dimension der Griffigkeit, insbesondere dem damit verbundenen Haftreibungsniveau.

Dazu werden zunächst geometrische und statistische Parameter von bestehenden Asphaltproben bestimmt, um die isotrope Textur einer Deckschicht eindeutig definieren zu können. Anschließend werden auf Grundlage dieser Parameter künstliche Texturen mit unterschiedlichen Wellenlängen generiert. Dabei wird der selbstaffine Charakter des technischen Werkstoffs Asphalt herangezogen und anhand seiner mehrskaligen fraktalen Struktur realitätsnahe Mikrotexturen generiert. In diesem Zuge werden Methoden in ein Software-Tool implementiert, mit denen im Rahmen der Datenvorverarbeitung die aus den Texturmessungen resultierenden fehlenden oder verrauschten Texturhöhendaten sowie

Irregularitäten, wie Messausreißer, aufbereitet respektive beseitigt werden können. Des Weiteren werden Funktionen entwickelt, die es ermöglichen mithilfe von Filterverfahren die langwelligigen Anteile (Makrotextur) von den kurzwelligen Anteilen (Mikrotextur) zu trennen, um auf diese Weise eine exklusive Betrachtung der Mikrotextur zu erreichen.

Im Anschluss daran wird die Reibkomponente Hysterese, der Energietransfer zwischen Reifen und rauen Oberflächen, der auftritt, wenn das Elastomer durch die Unebenheiten der Textur zusammengepresst wird und anschließend wieder in seine Ausgangsposition zurückfedert, numerisch simuliert. Mithilfe dieses Wissens können die Grundlagen geschaffen werden, um mittelfristig die konventionellen Griffigkeitsmessverfahren, die alle taktil erfolgen und daher aufwendig und kostenintensiv sind, durch berührungslose optische Messmethoden zu ersetzen.

Zahlreiche Modelle zur Beschreibung der Griffigkeit betrachten lediglich Profilschnitte und vernachlässigen dadurch die dreidimensionalen statistischen Eigenschaften einer Textur. In der vorliegenden Arbeit wird daher eine hierarchische Simulationsmethodik eingeführt. Sie ermöglicht es das komplexe dreidimensionale Kontaktproblem Reifen-Fahrbahn auf ein vereinfachtes eindimensionales Ersatzsystem zu reduzieren, ohne die dreidimensionalen Kontakteigenschaften zu vernachlässigen.

Auf dieser Basis lässt sich die Haftreibung rechenstechnisch effizient simulieren. Das in der numerischen Simulation entstehende tribologische Modell führt die Parameter der Texturgeometrie und die viskoelastischen Eigenschaften des Reifenelastomers zusammen. Dies ermöglicht als Ergebnis die Ableitung der in den Mikrokontakten wirksamen Kraftverhältnisse, aus denen sich quantitativ geschwindigkeits- und belastungsabhängige Haftreibungskoeffizienten und effektive Kontaktflächen zwischen den beiden Reibpartnern ermitteln lassen. Die spezifische Variation von Texturen und ein Vergleich der daraus berechneten Reibkurven mit den eingangs bestimmten Parametern zur Charakterisierung der Texturen ergibt Aufschluss über den Zusammenhang der Mikrotexturgeometrie und dem dazugehörigen Griffigkeitsniveau.

Abstract

Safety and functionality are the basic requirements in road construction. In the present thesis, the qualitative and quantitative influence of the extrinsic and intrinsic factors is thoroughly investigated, in order to point out how it achieves the safety and functionality requirements. If the only interface between road and tire is the wearing course, the most important surface characteristics are good skid resistance (drainage capability, friction) and acoustic behavior. These are strongly influenced by the geometrical properties of the wearing course (texture) and may have contradictory needs. Different wavelengths dimensions of a texture affect different surface characteristics. Skid resistance depends on a pavement's macrotexture (drainage capability) and microtexture (friction). The long-term objective of road engineering science is to develop models to simulate all the single characteristics of the wearing course. For this purpose, every single characteristic has to be investigated and modeled independently and afterwards, single approaches can prospectively be combined in order to design asphalt surface characteristics artificially.

The main focus of the current research is investigating the skid resistance of road surface. In scientific literature, skid resistance is defined as the force developed when a tire that is prevented from rotating, slides along the pavement surface. Therefore, the priority is to identify the dependency between road surface geometry (texture) and related dimensions of skid resistance. This is done by simulating the hysteresis component of friction, which is the main cause of energy loss associated with rolling resistance, between rubber and three-dimensional rough surfaces on microscale. This could be used as the base to develop a contactless optical method to determine skid resistance of a road surface and to replace the conventional tactile friction measuring methods, which are elaborate and expensive.

First, geometrical and spatial parameters of textures heights derived from precise optical measurement systems are determined in order to characterize isotropic asphalt surfaces. Secondly, virtual textures on various wavelength dimensions are generated by utilization of the multi-scale fractal structure. Therefore, the current work introduces pre-processing methods to interpolate missing data and to eliminate noisy data and inconsistencies, such as outliers from texture data. Additionally, the developed software toolbox provides the possibility to separate textures into its long-wave (macrotexture) and short-wave range (microtexture), for further geometry evaluation.

Most of the friction or skid resistance models regard only profiles, without considering the three-dimensional statistical properties of textures. To improve that and to reduce large volume of texture data, a hierarchical high-performance simulation method is applied. Therefore, the three-dimensional contact problem is reduced into a simplified one-dimensional analogous system, which has the identical contact properties as the three-dimensional texture. Then, the combination of geometry and the appearing friction build

the tribological model, which is transferred into a contact mechanical simulation to reproduce rubber friction numerically.

The follow-up simulation of the hysteresis component of friction is based on the derived equivalent one-dimensional model taking into account the visco-elastic properties of tire's elastomer material. The results of the simulation are the acting forces in related micro-contact points. Based on this principle, the rubber friction coefficient and the real contact area between tire and road can be derived. This gives the opportunity to specify the connection between various road surface geometries and the related dimensions of skid resistance, by varying the geometry of specific textures and analyzing the differences of simulation results.

Inhalt

Vorwort	I
Erklärung	III
Zusammenfassung	V
Abstract	VII
Inhalt	IX
Abbildungen	XIII
Tabellen	XIX
Abkürzungen	XXI
Formelzeichen	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung und Motivation	1
1.2 Aufbau und Ziel der Arbeit	3
2 Griffigkeit von Fahrbahndeckschichten	6
2.1 Definition und Begriffserklärung	6
2.1.1 Griffigkeit als Materialeigenschaft	6
2.1.2 Griffigkeit im Kontext der Elastomerreibung	8
2.2 Stand der Wissenschaft in der Materialforschung	11
2.2.1 Ursachen mangelnder Griffigkeit	11
2.2.2 Einfluss der Baustoffe	12
2.3 Griffigkeit im Verfahren der Zustandserfassung und -bewertung	14
2.3.1 Griffigkeitsmessverfahren	14
2.3.2 Zustandswerte und Erhaltungsplanung	19
3 Physikalische Grundlagen und Stand der Wissenschaft der Reibungsphysik	21
3.1 Kontaktmechanik und Reibung von Elastomeren	21
3.2 Viskoelastische Eigenschaften von Elastomeren	22
3.3 Kontaktmodelle zwischen rauen Oberflächen	23
3.3.1 Modell nach <i>GREENWOOD</i> und <i>WILLIAMSON</i>	23
3.3.2 Theorie nach <i>PERSSON</i>	25
4 Charakterisierung der Texturgeometrie	27
4.1 Klassifizierung von Festkörperoberflächen	27

4.2	Optische Messtechnik	28
4.2.1	Messverfahren	28
4.2.2	Betrachtungen zur Messauflösung	31
4.2.3	Messergebnisse	31
4.3	Datenvorverarbeitung	32
4.3.1	Grundlagen digitaler Filterverfahren	32
4.3.2	Behandlung von systematischen und zufälligen Messfehlern	35
4.3.3	Trennung von Bereichen unterschiedlicher Texturwellenlängen	40
4.4	Parameterbildung zur Charakterisierung isotroper Texturen	43
4.4.1	Texturbetrachtung im Ortsraum	43
4.4.2	Texturbetrachtung im Frequenzraum	49
5	Modellierung der Texturgeometrie	57
5.1	Fraktale Geometriebetrachtung von selbstaffinen Asphaltoberflächen	57
5.2	Numerische Erzeugung von Mikrotexturgeometrien	59
5.2.1	Selbstaffine Texturen	59
5.2.2	Zufällig verteilte Texturen	60
6	Reduktion der Dimension des Kontaktproblems	62
6.1	Eigenschaften des tribologischen Systems	62
6.2	Reduktionsmethodik	63
6.3	Validierung der Reduktion	66
7	Tribosimulation des Reifen-/Fahrbahnkontaktes	68
7.1	Eindimensionales Ersatzmodell	68
7.2	Dynamische Simulation der Haftreibung	69
7.2.1	Normalkraftkomponente	69
7.2.2	Tangentialkraftkomponente	73
7.2.3	Haftreibungskoeffizient	74
7.2.4	Effektive Kontaktfläche zwischen den Reibpartnern	74
7.3	Validierung der Simulationsergebnisse	76
8	Parametervariation und die Auswirkungen auf das Haftreibungsniveau	78
8.1	Randbedingungen der Variationsanalyse	78
8.1.1	Allgemeines	78
8.1.2	Beschreibung der verwendeten Mikrotextur	79
8.1.3	Festlegung der Variationsfaktoren	80
8.2	Durchführung und Ergebnisse der Variationsanalyse	82
8.3	Wirksamkeit der Parametervariation	88

9 Diskussion und Ausblick	94
Literatur	97
Anhang A	104
Anhang B	105
Anhang C	111

Abbildungen

Abbildung 1.1:	Definitionen zur Beschreibung der geometrischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen am Beispiel eines eindimensionalen Profils	1
Abbildung 1.2:	Zielkonflikt bei der Optimierung von Oberflächeneigenschaften einer Fahrbahndeckschicht	2
Abbildung 1.3:	Übersicht über die Teilaspekte der Arbeit	4
Abbildung 1.4:	Benutzeroberfläche des MATLAB-basierten Tools GripViewer	5
Abbildung 2.1:	Wellenlängenspektrum der Fahrbahnoberfläche und ihre Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten des Fahrzeugs	7
Abbildung 2.2:	Darstellung der dominanten Komponenten der Gummireibung	9
Abbildung 2.3:	Wesentliche Komponenten der Elastomerreibung und der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit	10
Abbildung 2.4:	Beispiel einer Asphaltdeckschicht mit deutlich erkennbarem Schadensbild der Bindemittelanreicherung	11
Abbildung 2.5:	Messsysteme der kombinierten Griffigkeitsmessung bestehend aus dem (a) SRT-Pendelgerät (<u>S</u> kid <u>R</u> esistance <u>T</u> ester) und (b) Ausflussmessgerät nach Moore	16
Abbildung 2.6:	Messeinrichtung eines Messfahrzeuges für das Seitenkraftmessverfahren und das dazugehörige Messprinzip	17
Abbildung 2.7:	Beispiel eines GripTesters mit dem dazugehörigen Messprinzip	18
Abbildung 3.1:	Eine starre Kugel im Kontakt mit einem elastischen Halbraum	21
Abbildung 3.2:	Modellvorstellung der Oberfläche nach <i>GREENWOOD</i> u. <i>WILLIAMSON</i>	24
Abbildung 3.3:	Betrachtung eines Elastomers, das über eine raue Oberfläche gleitet; die Werte der Haftreibungskoeffizienten in (c), die aus dem Hystereseeffekt hervorgehen sind für die Fälle (a) und (b) gleich groß, da das Verhältnis von Rauheitsamplitude und Wellenlänge jeweils gleich ist	25
Abbildung 4.1:	Generelle Typisierung von Oberflächen	27
Abbildung 4.2:	Beispiel einer gemessenen isotropen Makrotextur (a) sowie einer numerisch erzeugten anisotropen Makrotextur (b)	28
Abbildung 4.3:	Streifenprojektion (verwendete Messeinrichtung)	29
Abbildung 4.4:	Prinzip der Streifenprojektion	29
Abbildung 4.5:	Stark vergrößerter Ausschnitt zweier Mikrotexturen unterschiedlicher Asphaltdeckschichten nach Eliminierung langwelliger Anteile; Textur mit anisotroper Struktur aufgrund der Lasermessrichtung (a), Textur mit stochastisch isotroper Struktur (b)	30
Abbildung 4.6:	Koordinatenbildung der Texturhöhenpunkte bei der optischen Messung	32
Abbildung 4.7:	Funktionsprinzip am Beispiel eines linearen <i>GAUSS</i> -Filters	33
Abbildung 4.8:	Eindimensionale Übertragungsfunktion g eines idealen Tiefpassfilters (a) im Vergleich zum realen Tiefpassfilter (b) mit der Grenzwellenlänge λ_c	34
Abbildung 4.9:	Randproblem bei Filterungen	34

Abbildung 4.10: Textur mit Messausreißern vor der Filterung (a) und Textur nach der Eliminierung der Ausreißer (b)	36
Abbildung 4.11: Übertragungsfunktionen von <i>BUTTERWORTH</i> -Bandsperrfilter erster Ordnung (a) und zehnter Ordnung (b)	37
Abbildung 4.12: Prinzip der 4-Punkt-Nachbarschaft der zentralen Differenzenmethode zur Approximation der <i>LAPLACE</i> -Gleichung	40
Abbildung 4.13: Steigungs- und Versatzunterdrückung eines Profils	41
Abbildung 4.14: Rauheitsprofile einer Textur im Ursprungszustand sowie mit Welligkeits- und Rauheitsanteilen (Makro- und Mikrotextrur) nach der Filterung	41
Abbildung 4.15: <i>GAUSS</i> sche Filtermaske	42
Abbildung 4.16: Textur (a) einer Kornoberfläche der Größe $5,12 \times 5,12 \text{ mm}^2$ nach Trennung in Welligkeit (Makrotextrur) (b) und Rauheit (Mikrotextrur) (c) mittels <i>GAUSS</i> -Filterung	43
Abbildung 4.17: Exemplarische Materialanteilkurven zweier Profile mit konkaver (hoher Gestaltfaktor) und konvexer Gestalt (niedriger Gestaltfaktor) generiert aus Mikrotextrurdaten	46
Abbildung 4.18: 3×3 Höhensubmatrix	48
Abbildung 4.19: Überlagerung von Sinus-Wellen unterschiedlicher Wellenlängen und Amplituden zur frequenzräumlichen Betrachtung eines Profils	50
Abbildung 4.20: Zweidimensionale qualitative Darstellung des Leistungsdichtespektrum einer Mikrotextrur; (a) zeigt das Ergebnis nach der Durchführung der 2D-DFT mit dem Ursprung in der Ecke (Bereich der niedrigen Frequenzen wiederholt sich aufgrund der Periodizität des Spektrums in allen Ecken), (b) zentrierte Ansicht der DFT durch paarweises Tauschen der vier Quadranten (hohe Wellenzahlen liegen nun im Zentrum)	51
Abbildung 4.21: Qualitative Darstellung eines gemittelten zweidimensionalen Leistungsdichtespektrums der Textur einer Asphaltdeckschicht	52
Abbildung 4.22: Darstellung der Funktion des verwendeten zweidimensionalen <i>TUKEY</i> -Fensters bei der Ermittlung der Leistungsspektren von Texturen mit $\alpha_T = 1$	52
Abbildung 4.23: Leistungsdichtespektren der Textur einer Asphaltdeckschicht vor und nach der Trennung der makroskopischen und mikroskopischen Anteile	53
Abbildung 4.24: Qualitative Darstellung der Leistungsdichtespektren einer Textur (T) sowie den dazugehörigen Rauheits- (R) und Welligkeitsanteilen (W) nach der Trennung der Wellenlängenbereiche	54
Abbildung 4.25: Prinzip zur Entwicklung des Algorithmus für die Berechnung der HDK (links) und exemplarische HDK einer Mikrotextrur mit abgeleiteten Deskriptoren (rechts)	55
Abbildung 5.1: Rauheit eines selbstähnlichen Profils auf verschiedenen Längenskalen	57

- Abbildung 5.2: Ein Elastomer in Kontakt mit einer Textur; das Elastomer tritt auf allen Skalen in Kontakt mit der Textur. Eine unvergrößerte Betrachtung erweckt den Eindruck, dass alle makroskopischen Bereiche in Kontakt sind. Eine zunehmende Vergrößerung macht jedoch deutlich, dass in Wirklichkeit nur partiell Kontakt auftritt 58
- Abbildung 5.3: Beispiel einer numerisch erzeugten, zufällig rauhen Mikrotextur im Wellenzahlbereich $[0,01 \text{ } 0,4]$ 60
- Abbildung 6.1: Zweidimensionale Mikrotextur der Größe $1,74 \times 1,74 \text{ mm}^2$ und einer lateralen Auflösung $\Delta x = 3,4 \text{ }\mu\text{m}$ (oben), dazugehöriges eindimensionales Profil nach Dimensionsreduktion (unten); die Länge des Profils entspricht der Seitenlänge der Textur, die quadratischen Mittenrauwerte betragen $\langle h^2 \rangle_{1D} = \langle h^2 \rangle_{2D} = 8,3 \text{ }\mu\text{m}$ 65
- Abbildung 7.1: Vertikale und laterale Diskretisierung des eindimensionalen Ersatzmodells 68
- Abbildung 7.2: Raus Elastomerelement auf glatter starrer Oberfläche (a), glattes Elastomerelement auf rauher starrer Oberfläche (b) 69
- Abbildung 7.3: Rheologisches Modell eines Mikrokontaktpunktes 70
- Abbildung 7.4: Exemplarischer Simulationsschritt; der Reifen (grau) gleitet nach links über die Textur (schwarz). In Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Materialparameter stellt sich ein „Nachzieheffekt“ (Hysterese) im Elastomer ein 71
- Abbildung 7.5: Typischer Verlauf der Normalkraftanteile aus Schubspannung und Viskosität sowie der Normalkraftanteile, die sich aus der Profilverchiebung ergeben; der Peak von ΔF zu Simulationsbeginn entsteht durch den Ausgleich beim Aufbau des „Nachzieheffekts“ der Hysterese; die Gesamtnormalkraft F_N bleibt konstant 72
- Abbildung 7.6: Numerische Ermittlung der Tangentialkraft 73
- Abbildung 7.7: Ergebnis der messtechnischen Aufnahme einer $50 \times 50 \text{ mm}^2$ großen Textur (links); Eindringtiefe bei 33 % Materialanteil (Mitte); Texturbereiche in Kontakt mit dem Reifen nach Elimination der darunterliegenden Texturhöhen (rechts) 75
- Abbildung 7.8: Zusammenhang des Haftreibungskoeffizienten μ mit der simulierten Gesamtnormalkraft F_N für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche 76
- Abbildung 8.1: Für die Variationsanalyse verwendeter Probekörper (Splittmastixasphalt) mit Darstellung des Messfeldes (a), dazugehörige Mikrotexturdaten (Messfeldgröße $6,76 \times 6,76 \text{ mm}^2$) (b) 79
- Abbildung 8.2: Variationen der Mikrotextur zur Validierung der Simulationsmethodik am Beispiel von Profilen (fünf von zwölf Variationsschritten sind dargestellt); Variation 1: Reduktion der zunehmend langwelligen Mikrotexturanteile, Variation 2: Reduktion der zunehmend kurzwelligen Mikrotexturanteile 80
- Abbildung 8.3: Variationen der Mikrotextur zur Validierung der Simulationsmethodik am Beispiel von Profilen (5 von 12 Variationsschritten sind dargestellt); Variation 3: Reduktion der Amplitudenausprägung, Variation 4: Zunahme der Amplitudenausprägung 81

- Abbildung 8.4: Dreidimensionale Darstellung der durch die Parametervariationen hervorgerufenen Veränderungen der verwendeten Mikrotextur; Variation 1: Reduktion der zunehmend langwelligen Mikrotexturanteile, Variation 2: Reduktion der zunehmend kurzwelligen Mikrotexturanteile 83
- Abbildung 8.5: Ausreißerbereinigte Reibkurven in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextur mit abnehmendem Langwellenanteil λ_i [mm] durch Filterung (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation 1 (b) 84
- Abbildung 8.6: Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextur mit abnehmender Feinrauheit durch Filterung (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation 2 (b) 85
- Abbildung 8.7: Dreidimensionale Darstellung der durch die Parametervariationen hervorgerufenen Veränderungen der verwendeten Mikrotextur; Variation 3: Reduktion der Amplitudenausprägung, Variation 4: Zunahme der Amplitudenausprägung 85
- Abbildung 8.8: Reibkurven in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextur mit abnehmender Texturamplitude (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation 3 (b) 86
- Abbildung 8.9: Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextur mit zunehmender Texturamplitude (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation 4 (b) 86
- Abbildung 8.10: Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextur mit abnehmendem Schubmodul G_i (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation G (b) 87
- Abbildung 8.11: Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextur mit zunehmender Viskosität η_i (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation η_i (b) 87
- Abbildung 8.12: Regressionsflächen der mittleren arithmetischen Texturhöhe S_a und der mittleren quadratischen Höhe der Textur S_q 89
- Abbildung 8.13: Regressionsflächen der größten Spitzenhöhe S_p und der größten Senkenhöhe S_v der Textur 89
- Abbildung 8.14: Regressionsflächen des mittleren quadratischen Gradienten der Textur S_{dq} und des Verhältnisses des Zuwachses der Übergangsfläche der Textur S_{dr} 90
- Abbildung 8.15: Regressionsfläche der Zehn-Punkt-Höhe S_{10z} und des Mittelwerts aller lokalen Gradienten der Textur 90
- Abbildung 8.16: Regressionsflächen der aus der Höhendifferenzkorrelation (HDK) abgeleiteten Parameter Schwellenwert und Topothesie 91

Abbildung 8.17: Regressionsflächen der Höhenparameter Schiefe S_{sk} und Kurtosis S_{ku} einer Textur	91
Abbildung 8.18: Regressionsflächen des aus der Materialanteilkurve abgeleiteten Gestaltfaktors g und der Exposition der Textur	92
Abbildung 8.19: Regressionsflächen der Profil- und Plankurvatur der Textur	92
Abbildung 8.20: Regressionsflächen der aus der Höhendifferenzkorrelation (HDK) abgeleiteten Parameter Aussageweite und fraktale Dimension	93

Tabellen

Tabelle 2.1:	Zustandswerte für Planungs- und Erhaltungsmaßnahmen	19
Tabelle 8.1:	Übersicht über die statistischen bzw. geometrischen Parameter der in der Analyse verwendeten Mikrotextrur	79
Tabelle 9.1:	Auszug aus den gängigen Normen für Sandpapier mit der Übersicht der jeweiligen Spezifikationen auf der Mikroskala; Grau hinterlegt: Für die Validierung der Simulation verwendete Sandpapierkörnungen	104
Tabelle 9.2:	Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation 1	105
Tabelle 9.3:	Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation 2	106
Tabelle 9.4:	Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation 3	107
Tabelle 9.5:	Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation 4	108
Tabelle 9.6:	Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation G	109
Tabelle 9.7:	Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation η	110
Tabelle 9.8:	Regressionskoeffizienten der Variationsanalyse	115

Abkürzungen

AKF	Autokorrelationsfunktion
AM	Ausflussmessgerät nach <i>MOORE</i>
ASCII	Zeichenkodierung (American Standard Code for Information Interchange)
CCD	Ladungsgekoppeltes Element (Charge-coupled Device)
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
ETD	Geschätzte Texturtiefe (Estimated Texture Depth)
FFT	Fast Fourier-Transformation
GW	<i>GREENWOOD</i> und <i>WILLIAMSON</i>
HDK	Höhendifferenzkorrelation
LFC	Longitudinal Friction Coefficient
MPD	Mittlere Profiltiefe (Mean Profile Depth)
NaN	Numerischer Datentyp (Not a Number)
OPA	Offenporiger Asphalt
PmB	Polymermodifiziertes Bitumen
PSV	Polierwert (Polished Stone Value)
RMS	Quadratischer Mittelwert (Root Mean Square)
RMSE	Mittlerer quadratischer Vorhersagefehler (Root-Mean-Square Error)
SCRIM	Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine (\cong SKM)
SEE	Standardschätzfehler (Standard Error of Estimation)
SKM	Seitenkraftmessverfahren (\cong SCRIM)
SMA	Splittmastixasphalt
SRT	Skid Resistance Tester
ZEB	Zustandserfassung und -bewertung

Formelzeichen

$\langle h^2 \rangle_{1D}$	Quadratischer Mittenrauwert eines Profils
$\langle h^2 \rangle_{2D}$	Quadratischer Mittenrauwert einer Textur
$\tilde{\sigma}^2$	Varianz der Texturhöhenwerte
h_i	Diskreter Texturhöhenwert
A_0	Nominelle Kontaktfläche
A_{1D}	Aus dem eindimensionalen Ersatzmodell ermittelte effektive Kontaktfläche
A_{2D}	Effektive Kontaktfläche
B_{1D}	Amplituden des eindimensionalen Leistungsdichtespektrums
B_{2D}	Amplituden des zweidimensionalen Leistungsdichtespektrums
C_{1D}	Eindimensionales Leistungsdichtespektrum
C_{2D}	Zweidimensionales Leistungsdichtespektrum
D_f	Fraktale Dimension
E^*	Kontaktsteifigkeit
E_H	Richtungsabhängige Matrix mit den Inversen der Texturhöhenmatrix
F_A	Reibkraftkomponenten Adhäsion
F_H	Reibkraftkomponente Hysterese
F_N	Gesamtnormalkraft
F_{fr}	Gesamtreibkraft
F_x	Gesamt tangentialkraft
F_y	Seitenführungskraft beim SKM-Verfahren
F_z	Radlast beim SKM-Verfahren
$\hat{H}(u, v)$	Frequenzräumliche Betrachtung der Texturhöhenmatrix
H'_R	Texturhöhenmatrix der Mikrotextur
H'_W	Texturhöhenmatrix der Makrotextur
H_a	Shore Härte A eines Elastomers
H_m	Ergebnis der zweidimensionalen DFT der Texturhöhen
f_i	Normalkraft an einem Kontaktpunkt
$f_{maxTextur}$	Maximaler Frequenzanteil der Textur
f_{tast}	Abtastrate
$f_{x,i}$	Tangentialkraft an einem Kontaktpunkt
l_i	Kontaktlänge im eindimensionalen Ersatzmodell
$m_{k,l}$	Lokaler Gradient
p_0	Maximaldruck
p_{ij}	Polynominalkoeffizienten

\vec{q}	Wellenvektor
q_0	Abrollwellenvektor
q_1	Grenzwellenvektor
q_L	Wellenvektor der Seitenlänge einer Textur
z_0	Nulllinie des ungestörten Elastomers
Γ_h	Höhendifferenzkorrelation (HDK)
α_T	Parameter des <i>TUKEY</i> -Fensters
λ_c	Grenzwellenlänge
λ_i	Laterale Abstände einer Textur zur Berechnung der HDK
μ_{LFC}	Haftreibungskoeffizient aus LFC-Verfahren
μ_{SKM}	Haftreibungskoeffizient aus SKM-Verfahren
$\xi_{ }$	Aussageweite der HDK
ξ_{\perp}^2	Schwellenwert der HDK
ΔF	Normalkraftanteil aus Verschiebung
ΔZ	Vertikalverschiebung bei der Simulation
E	Elastizitätsmodul
h	Spezifischer Höhenwert einer Textur
$B(u, v)$	Filtermaske <i>BUTTERWORTH</i> -Bandstoppfilter
F	Allgemeine Normalkraft
G	Schubmodul
$G(x, y)$	Filtermaske <i>GAUSS</i> -Filter
H	<i>HURST</i> -Exponent
$H(x, y)$	Texturhöhenmatrix
K	Fourierkoeffizienten eines numerischen FFT-basierten Schätzers
L	Seitenlänge einer Textur
N	Absolute Anzahl von Elementen einer Texturhöhenmatrix
$P(q)$	Relative Kontaktfläche nach <i>PERSSON</i>
$P(x, y)$	Polynominalfläche
R	Kugelradius einer starren Kugel in Kontakt mit einem elastischen Halbraum
R^2	Regressionskoeffizienten
S	Numerischer FFT-basierter Schätzer
a	Kontaktradius einer starren Kugel in Kontakt mit einem elastischen Halbraum
d	Eindringtiefe einer starren Kugel in Kontakt mit einem elastischen Halbraum
g	Gestaltfaktor
$g(x, y)$	Impulsantwort <i>GAUSS</i> -Filter
i	Laufvariable der Simulationsdurchgänge

k	Topothese
n	Absolute Anzahl der Zeitschritte bei der Simulation
v	Simulationsgeschwindigkeit
x	Laterale Koordinate eines Texturhöhenpunktes (Rechtswert)
y	Laterale Koordinate eines Texturhöhenpunktes (Hochwert)
z	Höhenkoordinate eines Texturhöhenpunktes
Δz_i	Verschiebung des Elastomers im Kontaktfall
Δt	Zeitschritt bei der Simulation
Δx	Diskretisierungsabstand der Textur bei der Simulation
α	Konstante des eindimensionalen <i>GAUSS</i> -Filters mit Durchlassverhältnis 50 %
α, β	Konstante bei <i>GAUSS</i> -Filterung (1D/2D)
β	Konstante des zweidimensionalen <i>GAUSS</i> -Filters mit Durchlassverhältnis 50 %
η	Dynamische Viskosität
λ	Allgemeine Texturwellenlänge
μ	Haftreibungskoeffizient
ρ	Pseudonorm zu Eigenwerten
ν	Querkontraktionszahl
ϕ	Leistungsdichtespektrum eines <i>GAUSS</i> feldes

1 Einleitung

1.1 Einordnung und Motivation

Die technischen Anforderungen an das Bauwerk Straße sind sehr vielfältig. Zum einen muss bei einer Straße die möglichst lang anhaltende Widerstandsfähigkeit gegenüber den stetig steigenden Belastungen aus Umwelt und Verkehr, also eine Vermeidung von Oberflächenverformungen und Oberflächenschäden, gewährleistet sein. Zum anderen sollte, neben einer umweltverträglichen Ausführung und möglichst geringen Herstellungs- und Erhaltungskosten der Straße, vor allem die Verkehrssicherheit der Verkehrsteilnehmer gesichert sein.

Neben der Ebenheit und Helligkeit einer Fahrbahndeckschicht spielt für eine sichere Benutzung der Straße vor allem ihre Rauheit eine entscheidende Rolle. Diese Rauheit wird anhand bestimmter Definitionen zur Beschreibung verschiedener Fahrbahnoberflächen herangezogen (siehe Abbildung 1.1). Bei der Betrachtung des eindimensionalen Falls, z. B. ein Schnitt durch eine Straßenoberfläche, spricht man von einem Profil, das in seiner vertikalen Ausprägung von Amplituden gekennzeichnet ist und in lateraler Richtung eine gewisse Distanz aufweist. Die Größe, die die horizontalen Abmessungen der Amplitudenschwankungen des Profils, d. h. die horizontalen Abstände zwischen zwei Texturspitzen, beschreibt, wird als Wellenlänge bezeichnet. Des Weiteren weist ein Profil zahlreiche unterschiedliche Profiltiefen auf. u. a. [23–25]

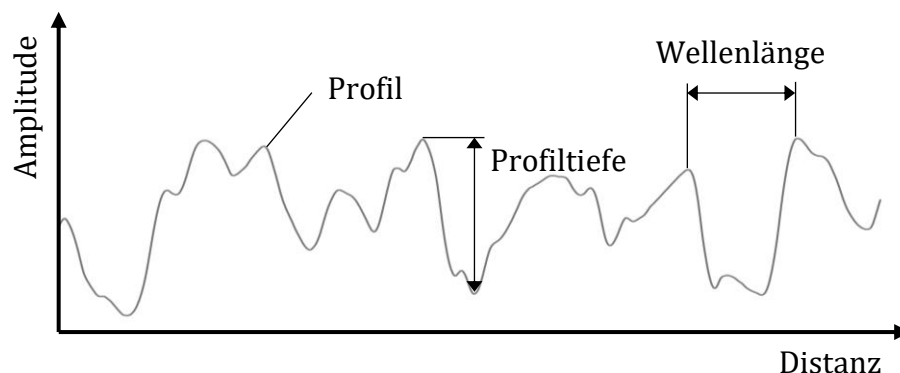


Abbildung 1.1: Definitionen zur Beschreibung der geometrischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen am Beispiel eines eindimensionalen Profils nach [25]

Bei der Betrachtung einer Fahrbahn als eine zweidimensionale Oberfläche im dreidimensionalen Raum wird nicht mehr von einem Profil gesprochen, sondern von einer Textur, welche als physikalische Eigenschaft der Fahrbahnoberfläche definiert ist [25,37]. In Abhängigkeit der Textur besitzt eine Fahrbahndeckschicht diverse funktionale Eigenschaften, welche in der Regel messtechnisch erfasst und bewertet werden können (siehe Kapitel 2.3). Während die Grobrauheit einer Fahrbahnoberfläche für die hydrau-

lischen Eigenschaften der Fahrbahn (z. B. horizontale Oberflächenentwässerung) ausschlaggebend ist, ist die Feinrauheit für eine ausreichende Haftreibung, also für das Kraftschlussvermögen zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn, verantwortlich. Diese beiden Eigenschaften werden unter dem Begriff Griffigkeit zusammengefasst (siehe Kapitel 2). Die geometrische Form der Textur spielt des Weiteren eine große Rolle für die akustischen Eigenschaften einer Fahrbahn, worunter man das Reifen-/Fahrbahngeräusch versteht, das entsteht, wenn ein Fahrzeugreifen auf der Fahrbahn abrollt und der Reifen aufgrund von Verformungen, hervorgerufen durch die Textur oder durch Fahrbahnunebenheiten, zu Reifenschwingungen angeregt wird [93]. Es wird davon ausgegangen, dass bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von ca. 40 - 120 km/h das Reifen-/Fahrbahngeräusch gegenüber dem Antriebs- und Umströmungsgeräusch dominiert. u. a. [37] Eine detaillierte Definition der physikalischen Eigenschaften einer Fahrbahnoberfläche und ihre Auswirkungen auf die funktionalen Eigenschaften folgt in Kapitel 2.1.1.

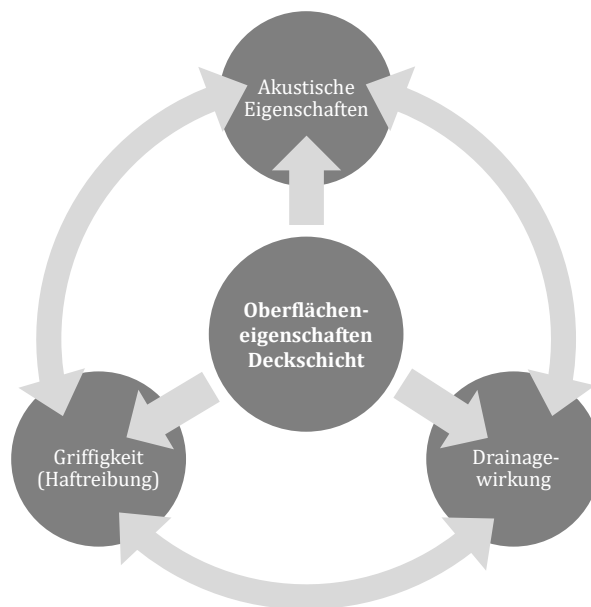


Abbildung 1.2: Zielkonflikt bei der Optimierung von Oberflächeneigenschaften einer Fahrbahndeckschicht

Da alle wesentlichen funktionalen Oberflächeneigenschaften einer Textur (Haftreibung/ Drainage/Akustik) unterschiedliche Anforderungen an die physikalischen Eigenschaften einer Fahrbahnoberfläche stellen, entsteht ein Zielkonflikt, der dem Zielkonflikt bei der Entwicklung von Reifen hinsichtlich Profilierung, Gummimischung etc. ähnlich ist (siehe Abbildung 1.2). Beispielsweise hat eine stärkere Ausprägung der Feinrauheit einer Fahrbahnoberfläche ein verbessertes Haftreibungsniveau zur Folge, führt unter Umständen jedoch zu einer geringeren Drainagewirkung, weil die notwendigen groben Texturanteile fehlen. Umgekehrt ist eine Textur mit hohem Drainagevermögen denkbar, welche jedoch aufgrund ihrer makroskopischen Gestalt zu einer Zunahme der Geräuschemissionen führen kann.

Ziel aktueller Forschungsarbeiten in der Straßenbautechnik ist daher, die Optimierung der Oberflächeneigenschaften zur Erhöhung der Verkehrssicherheit voranzutreiben. Dazu sollen - langfristig gesehen - zum einen die Oberflächeneigenschaften in einem ganzheitlichen System numerisch simuliert werden können. Zum anderen kann auf Grundlage der Interpretation der Simulationsergebnisse das Ziel verfolgt werden im Bereich von Asphalttechnologien künstliches Materialdesign zu betreiben, d. h. durch eine gezielte Texturgestaltung, je nach Anforderung an die Fahrbahndeckschicht, bestimmte Oberflächeneigenschaften zu begünstigen. Aufgrund des bereits genannten Zielkonflikts ist jedoch zu beachten, dass nicht alle Oberflächeneigenschaften in gleichem Maße verbessert werden können [37]. Entsprechend den jeweiligen Anforderungen einer Straße müssen auch in Zukunft immer Kompromisse eingegangen werden. Um sich diesem langfristigen Ziel trotz der Konfliktbehaftung anzunähern, müssen die einzelnen physikalischen Prozesse der genannten Einzelkomponenten funktionaler Oberflächeneigenschaften im Zusammenspiel mit der Textur im Detail verstanden und im Optimalfall mit numerischen Methoden abgebildet werden.

1.2 Aufbau und Ziel der Arbeit

Aus der in Kapitel 1.1 erläuterten Motivation heraus beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit dem tiefergehenden physikalischen Verständnis der Griffigkeit, speziell der Haftreibung von Fahrbahndeckschichten. Zur Erlangung der notwendigen Erkenntnisse, wird das Phänomen der Haftreibung zwischen Reifen und Fahrbahn numerisch simuliert und dabei die Zusammenhänge zwischen den dreidimensionalen geometrischen Ausprägungen einer Textur und einem quantitativen Wert für die Griffigkeit hergestellt.

In Kapitel 2 wird daher die Griffigkeit und deren Abhängigkeiten der physikalischen Eigenschaften von Fahrbahndeckschichten definiert. Hierbei wird die Griffigkeit als Materialeigenschaft von der Griffigkeit im mechanischen Sinne (Elastomerreibung) unterschieden. Des Weiteren wird darauf eingegangen, inwieweit die Baustoffbestandteile gängiger Oberbauweisen im Asphaltbau das Maß der Griffigkeit beeinflussen können und mit welchen Methoden dieses Maß aktuell messtechnisch erfasst bzw. bewertet werden kann.

Eine Vorstellung der physikalischen Grundlagen und tribologischen Modelle als Abbild des aktuellen Stands der Wissenschaft in der Kontaktmechanik erfolgt in Kapitel 3. Die Erkenntnisse dieser Modelle fließen in die weitere Bearbeitung, insbesondere in die verwendete Simulationsmethode, ein.

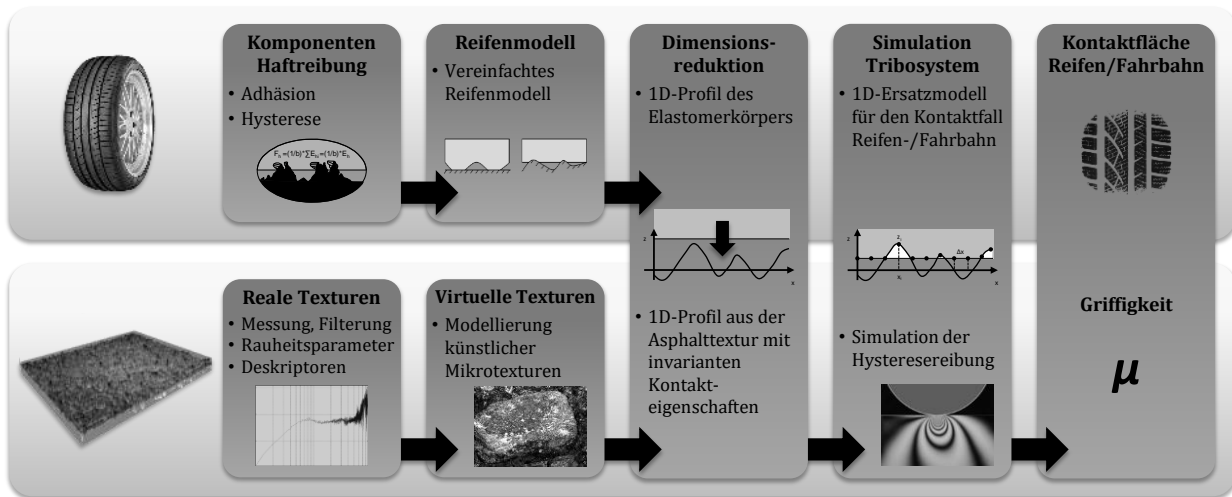


Abbildung 1.3: Übersicht über die Teilaspekte der Arbeit

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Charakterisierung der Texturgeometrie. Dazu werden in einem ersten Schritt Festkörperoberflächen klassifiziert. Anschließend wird ausgeführt, welche Möglichkeiten der Messung von Texturgeometrien zur Verfügung stehen und welche Randbedingungen auch im Hinblick auf die wirksame Skala beachtet werden müssen. Einen umfangreichen Anteil der Arbeit bildet die Datenvorverarbeitung, die notwendig ist, um die gemessenen Texturen beispielsweise von Messfehlern oder von Skalenbereichen, die nicht haftreibungswirksam sind, zu befreien. In diesem Zuge werden die verwendeten digitalen Filtermethoden und deren mathematischen Grundlagen intensiv diskutiert. Abschließend werden in Kapitel 4 die Texturparameter eingeführt, die eine Textur sowohl in einer ortsräumlichen als auch in einer frequenzräumlichen Betrachtungsweise charakterisieren sollen.

Die Modellierung von Texturgeometrien aufgrund der zuvor genannten Charakterisierung der Textur erfolgt in Kapitel 5. Dazu werden Verfahren vorgestellt, die es ermöglichen Texturen numerisch zu erstellen. Die künstliche Generierung von Texturen ermöglicht eine größere Bandbreite an Griffigkeitsuntersuchungen, da auf diese Weise aufwendige Texturgeometriemessungen entfallen können.

Bevor in Kapitel 7 das Verfahren zur numerischen Simulation der Haftreibung auf Grundlage der Modelle verschiedener gemessener und künstlich erzeugter Texturen vorgestellt wird, zeigt Kapitel 6 eine effektive Möglichkeit auf, wie der komplexe dreidimensionale Kontaktfall Reifen-Fahrbahn auf ein eindimensionales Kontaktmodell reduziert werden kann. Diese Reduktionsmethode ermöglicht eine vereinfachte Haftreibungssimulation auf Grundlage eines eindimensionalen Ersatzmodells.

Die Ergebnisse der Simulation und die Herstellung der Zusammenhänge zwischen den Simulationsergebnissen und den Texturparametern werden in Kapitel 8 vorgestellt. Dazu werden u. a. die Amplituden und Wellenlängen einer exemplarischen Textur gezielt

variiert. Mithilfe der Variationsanalyse sind Aussagen darüber möglich, inwiefern sich durch die Änderungen der Geometrie, charakterisiert durch die abgeleiteten Texturparameter, Auswirkungen auf die Haftreibung und dadurch auf das Griffigkeitsniveau ergeben.

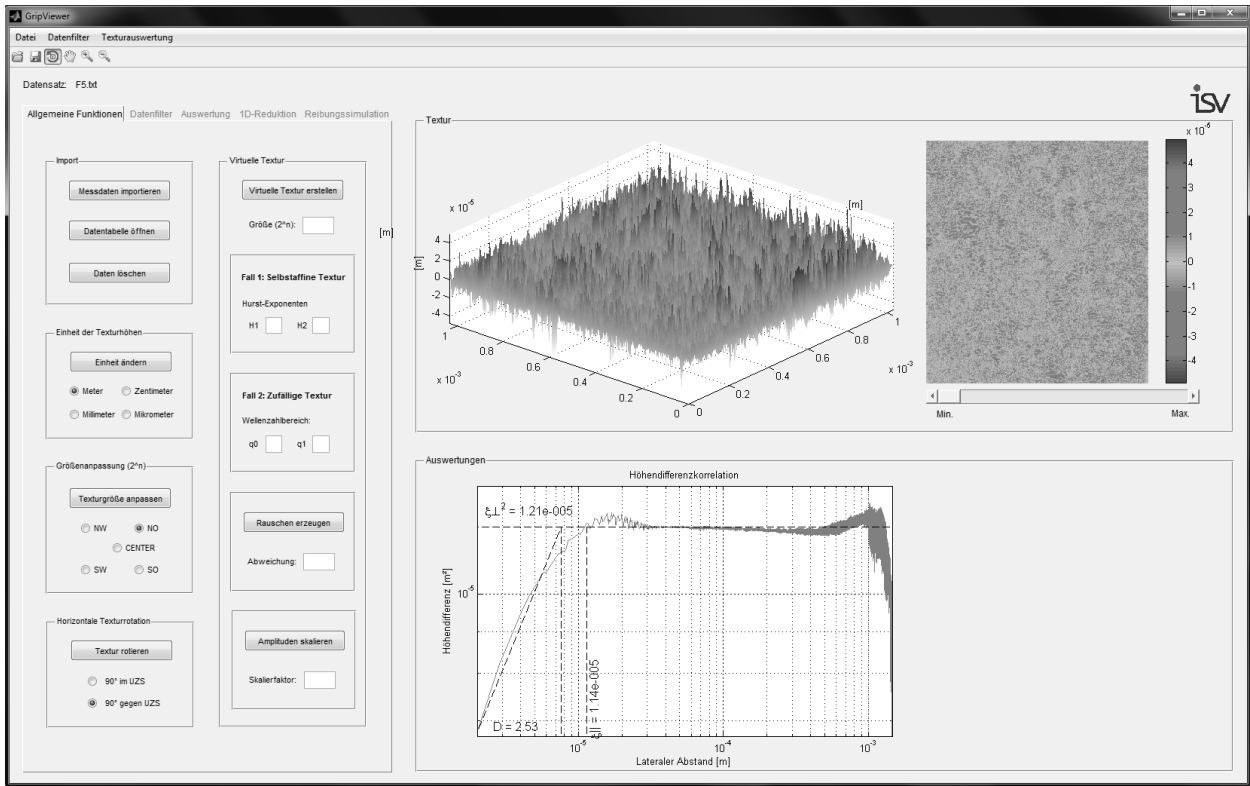


Abbildung 1.4: Benutzeroberfläche des MATLAB-basierten Tools GripViewer

Die im Folgenden vorgestellten Methoden und Funktionen wurden in das Softwaretool GripViewer implementiert. GripViewer besitzt eine eigenständigen Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 1.4) und wurde im Rahmen dieser Arbeit auf Basis von MATLAB® entwickelt. MATLAB® hat sich in dieser Arbeit deshalb als geeignetes Werkzeug erwiesen, da es für numerische Berechnungen auf Grundlage von Matrizen sehr gut geeignet ist. Denn die verwendeten Texturhöhen lassen sich leicht in Form von Matrizen beschreiben und mithilfe der grafischen Werkzeuge von MATLAB® interpretieren und darstellen.

2 Griffigkeit von Fahrbahndeckschichten

Die Griffigkeit gilt als die wichtigste nutzerrelevante Oberflächeneigenschaft von Fahrbahndeckschichten. Sie ist daher ausschlaggebendes Element einer sicheren Benutzung von Straßen. Im Folgenden wird das Phänomen Griffigkeit im Sinne einer Materialeigenschaft sowie einer physikalischen Kraftwirkung eingeführt [67]. Des Weiteren wird auf die Ursachen mangelnder Griffigkeit eingegangen und erläutert, welchen Einfluss die einzelnen Baustoffkomponenten von Asphalt bzw. Beton auf das Griffigkeitsniveau haben. Abschließend werden die messtechnischen Möglichkeiten zur Beurteilung der Griffigkeit vorgestellt und erläutert, wie die Messergebnisse im Kontext der zentralen Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) im Verkehrswesen verwendet werden, um dauerhaft sicher befahrbare Straßen zu gewährleisten.

2.1 Definition und Begriffserklärung

2.1.1 Griffigkeit als Materialeigenschaft

Unter der Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche versteht man den Einfluss der stofflichen Beschaffenheit und der geometrischen Formengestalt der Fahrbahnoberfläche auf die Größe der maximal vom Reifen auf die Straße übertragbaren Antriebs-, Brems- und Seitenkräfte. Das bedeutet, dass die Griffigkeit die Grundvoraussetzung ist, um einem Fahrzeug ein sicheres Beschleunigen und Anhalten sowie eine sichere Kurvenfahrt zu gewährleisten [73]. Der Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn ist vor allem von der Rauheit der Straßenoberflächen geprägt. Die Rauheit ist daher eine der nutzerrelevanten Oberflächeneigenschaften und ist mitbestimmend für den Gebrauchswert einer Straße. u. a. [32,35,43]

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, ist die Rauheit einer Fahrbahndeckschicht von ihrer physikalischen Eigenschaft, der Textur, abhängig. Diese lässt sich anhand von Wellenlängen und Amplituden definieren. Daher wurde bereits vor ca. 30 Jahren in [104] die Textur in verschiedene Wellenlängenbereiche mit unterschiedlichen Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten des Fahrzeugs und auf den Menschen eingeteilt (siehe Abbildung 2.1). Bei der Betrachtung dieses Wellenlängenspektrums fällt auf, dass sich die Wirkung der Griffigkeit aus zwei Komponenten, der Haftreibung und dem Drainagevermögen, zusammensetzt. Während die Haftreibung prinzipiell den entgegengesetzten Widerstand des Reifens gegenüber einer Verschiebung auf der Straße darstellt (siehe Kapitel 2.1.2), wird unter dem Drainagevermögen das Volumen verstanden, das eine texturierte Fahrbahnoberfläche zur Aufnahme von Oberflächenwasser zur Verfügung stellt, ohne dass ein gefährlicher Wasserfilm oberhalb der Rauspitzen (Aquaplaning) entsteht. Identisch der

Profilierung von Reifen, schafft die Textur Ausweichbereiche, in die das Oberflächenwasser durch den Reifen verdrängt werden kann. [32]

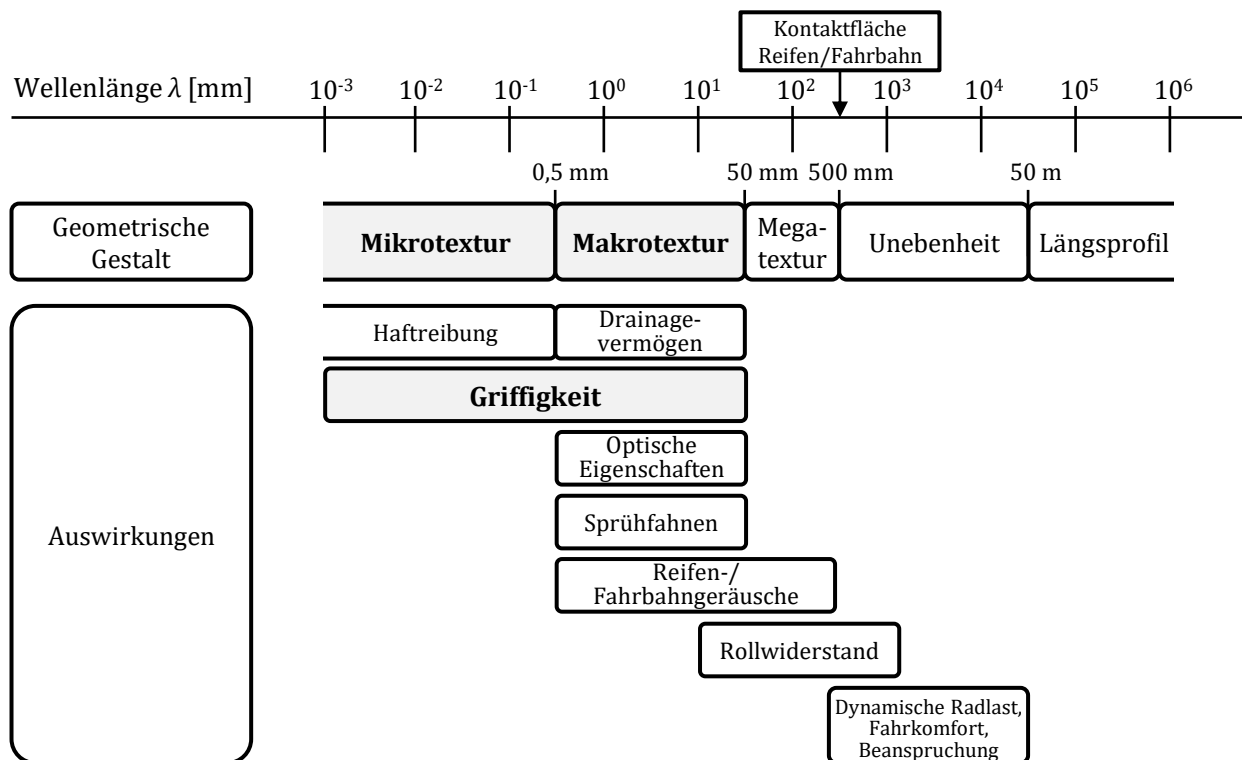


Abbildung 2.1: Wellenlängenspektrum der Fahrbahnoberfläche und ihre Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten des Fahrzeugs [43]

Das wirksame Drainagevermögen spielt sich dabei in Texturwellenlängenbereichen von 0,5 mm - 50 mm (Grobrauheit) ab, während die Mikrotextrur den Bereich mit Wellenlängen kleiner als 0,5 mm (Feinrauheit) darstellt. Die wirksame Untergrenze der Mikrotextrur ist dabei noch unbekannt. Die Makrotextrur wird demnach hauptsächlich vom verwendeten Größtkorn beeinflusst, während die feinen Ausprägungen der Gesteinsoberfläche für die Mikrotextrur bestimmend sind (siehe Kapitel 2.2.2). u. a. [24,25,32,43]

Hinreichend bekannt ist die Tatsache, dass das kritische Kraftschlussvermögen zwischen Reifen und Fahrbahn im Fall von auf der Fahrbahn vorhandener Nässe auftritt [32]. Es gilt jedoch hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit zu beachten, dass unterschiedliche Nässezustände zu definieren sind. Sind die Ausweichbereiche (Textur und Reifenprofil) mit Wasser gefüllt, kann es zu gefährlichem Aquaplaning kommen. In diesem Fall existiert keine wirksame Haftreibung mehr, da aufgrund eines Wasserfilms vollständiger Kontaktverlust zwischen Reifen und Fahrbahn auftritt. Auf dieses Phänomen wird im Weiteren jedoch nicht eingegangen. Ist die Textur der Straßenoberfläche nur teilweise mit Wasser gefüllt bzw. die Gesteinsoberflächen mit Wasser benetzt, wird je nach vorhandener Wassermenge die wirksame Haftreibung reduziert. Dementsprechend existieren gewisse Abhängigkeiten zwischen den beiden griffigkeitsrelevanten Texturwellenlängenbereichen,

welche hinsichtlich ihrer funktionalen Wirkung nicht eindeutig abgrenzbar sind (siehe Kapitel 2.1.2). Der dritte denkbare Zustand ist der trockene Zustand. Hier ist die maximale Haftreibung aktivierbar. Um sich den komplexen Prozessen im Kontaktfall Reifen-Fahrbahn annähern zu können, wird in dieser Arbeit ausnahmslos der trockene Zustand der Oberfläche betrachtet. Des Weiteren beschäftigt sich diese Arbeit lediglich mit dem Niveau der Haftreibung ohne Berücksichtigung des Drainagevermögens einer Textur, weshalb im weiteren Verlauf der Begriff Griffigkeit synonym zum Begriff Haftreibung verwendet wird.

Es existieren vielfältige Faktoren, die das Niveau der Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche beeinflussen können [73]:

- **Faktor Fahrzeug:**
 - Gefahrene Geschwindigkeit,
 - Knickwinkel der Reifen,
 - Reifenschlupf,
 - Reifeneigenschaften;
- **Faktor Belastung:**
 - Alter der Deckschicht,
 - äquivalente Achslasten,
 - Geometrie der Straße,
 - Verkehrsfluss;
- **Faktor Fahrbahn:**
 - Mineralogische Eigenschaften der Gesteinskörnung,
 - Oberflächentextur,
 - Art der Deckschicht,
 - örtliche Verhältnisse (Kurven-, Geradenbereich);
- **Faktor Umwelt:**
 - Jahreszeit,
 - Temperatur,
 - Regenhäufigkeit, -intensität, -dauer,
 - Oberflächenverschmutzung.

Es muss stets berücksichtigt werden, dass die Griffigkeit keine konstante Eigenschaft darstellt, sondern eine Fahrbahnoberfläche über ihre Lebensdauer hinweg bezüglich der oben genannten Faktoren langfristigen Entwicklungen und gleichzeitig kurzfristigen Schwankungen unterliegt (siehe Kapitel 2.2.1). Beispielweise ist die Griffigkeit einer Deckschicht in den Wintermonaten bis zu 10 % höher als im Sommer. Dies liegt daran, dass die Straße im Winter durch Abwitterung, Niederschläge und dem Einsatz von Splitt oder Streusalz eine gewisse Aufrauung erfährt, während in trockenen Sommermonaten der feine Staub, der sich in der Luft befindet, in Verbindung mit der Überrollung von Fahrzeugreifen eine eher polierende Wirkung besitzt. u. a. [32,57,96]

2.1.2 Griffigkeit im Kontext der Elastomerreibung

Zur Betrachtung der Griffigkeit als eine Kraftwirkung wird die Elastomerreibung detaillierter betrachtet. Die Wirkung der Elastomerreibung ist stark abhängig von der effektiven Kontaktfläche zwischen dem Reifenelastomer und der festen Fahrbahnoberfläche, die ent-

steht, wenn im makroskopischen System das Elastomer über die Unebenheiten der Textur geführt wird [74] (siehe Abbildung 2.2 und Kapitel 7.2.4).

Die Gesamtreibkraft F_{fr} ergibt sich unter Betrachtung des trockenen Fahrbahnzustandes und der Vernachlässigung von Abriebseigenschaften der jeweiligen Reibpartner u. a. nach [50,69,74,83] aus zwei Komponenten:

$$F_{fr} = F_{A(dhäsion)} + F_{H(ysteresese)}. \quad (2.1)$$

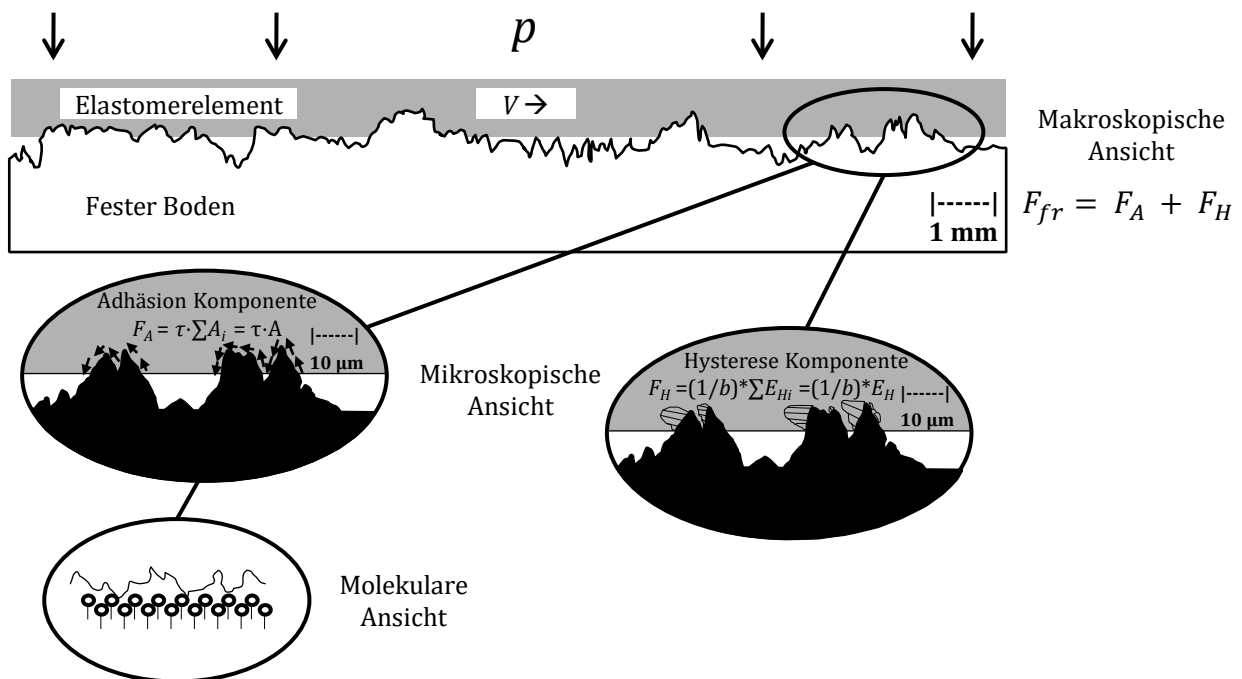


Abbildung 2.2: Darstellung der dominanten Komponenten der Gummireibung u. a. [7,74]

Die Adhäsionsreibkräfte F_A werden durch intermolekulare Bindungen zwischen dem Elastomer und der rauen Oberfläche verursacht und entsprechen näherungsweise dem Produkt aus den wirkenden Schubspannungen und der effektiven Kontaktfläche. Die Komponente Hysterese entsteht durch den Energietransfer, der auftritt, wenn das Elastomer durch die Unebenheiten der Textur zusammengepresst wird und anschließend wieder in seine Ausgangsposition zurückfedert. Die innere Reibung des Gummis wird als Energie dissipiert, was zu einem Temperaturanstieg im Elastomer führt. Der Reifen erwärmt sich. Dieser Prozess ist im Wesentlichen abhängig von den viskoelastischen Eigenschaften des Reifenelastomers (siehe Kapitel 3.2). Durch den Energietransfer wird wiederum die Adhäsion indirekt von der Hysterese beeinflusst, da eine erhöhte Reifentemperatur in einer Vergrößerung der Kontaktfläche resultiert. [65] Die Adhäsion und die Hysterese werden bei realen Reibprozessen von weiteren Komponenten ergänzt. Der viskose Reibkraftanteil, hervorgerufen durch Scherung z. B. eines Wasserfilms, und Kohäsionsreibverluste (Energieaufwand durch Abrieb) sind jedoch für diese Arbeit vernachlässigbar und werden daher nicht weiter betrachtet.

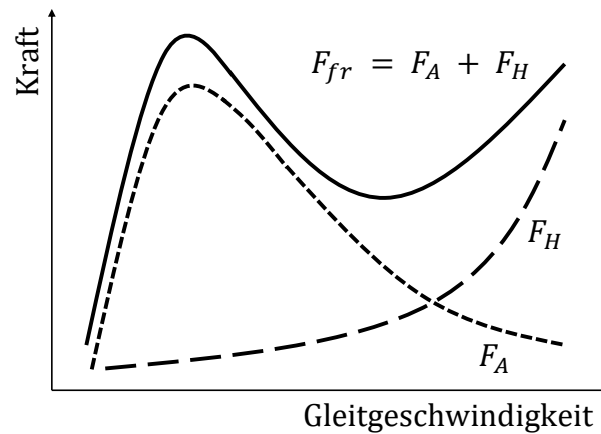


Abbildung 2.3: Wesentliche Komponenten der Elastomerreibung und der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit nach [106]

Abbildung 2.3 zeigt, dass bei kleinen Gleitgeschwindigkeiten Adhäsionskräfte bestimmend sind, während Hysteresekräfte bei hohen Gleitgeschwindigkeiten die übertragbaren Kräfte festlegen. Die Überlagerung der beiden Kraftkomponenten zeigt optimal wirksame Reibkräfte im niedrigen Geschwindigkeitsbereich. Dieser liegt in etwa zwischen 0,05 bis 0,5 m/s. Die maximale übertragbare Reibkraft durch Hysterese liegt in etwa bei 150 km/h und geht bei einer weiteren Geschwindigkeitserhöhung in kürzester Zeit auf ein Minimum zurück. Dies liegt daran, dass das Elastomer bei hohen Gleitgeschwindigkeiten nicht mehr genügend Zeit zur Verfügung hat, um zu relaxieren. Das Elastomer bleibt so dauerhaft komprimiert, was zu einer Verringerung der Dämpfungsverluste im Material und damit zu einem nachlassenden Haftreibungsniveau führt. [106]

Eine eindeutige Abgrenzung der Reibkomponenten und die Definition ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten ist sehr schwierig [69]. Tritt beispielsweise zwischen der Fahrbahn und dem Reifen ein Trennfilm aus Wasser auf, so wirken keine Adhäsionskräfte mehr und es verbleiben lediglich die Anteile der Reibungskraft, die durch Hysterese generiert werden (siehe Kapitel 2.1.1) [106]. Des Weiteren wurde in [77] festgestellt, dass die Adhäsionsreibung insbesondere bei sauberen und relativ glatten Oberflächen dominant ist. Dieser Zustand ist bei einer Straße nicht existent, weshalb man in der Lage ist, allein mit der Hysteresereibung den Reibwert vorherzusagen. Aus den hier genannten Gründen wird bei der Reibungssimulation dieser Arbeit (siehe Kapitel 7) lediglich die Komponente Hysterese berücksichtigt.

2.2 Stand der Wissenschaft in der Materialforschung

2.2.1 Ursachen mangelnder Griffigkeit

Kapitel 2.1.1 zeigt eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die zu kurz- oder langfristigen Schwankungen der Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche führen können. Neben diesen Faktoren sind vier maßgebliche Mechanismen zu nennen, die im Verlauf der Nutzungsdauer einer Straße zum Schadensbild einer mangelnden Griffigkeit führen können. Diese Mechanismen werden im Wesentlichen durch die mechanische Wirkung der Straßenverkehrsbelastung induziert.

Die häufigste Ursache mangelnder Griffigkeit sind polierte Kornoberflächen. Dieser langfristige Prozess ist abhängig von der Polierresistenz, ausgedrückt durch den Polierwert (PSV), des verwendeten Gesteins (siehe Kapitel 2.2.2.1). Dabei werden die Mikrotexturausprägungen der Gesteinskörner (Feinrauheit) aufgrund der mechanischen Einwirkung von jahrelangen Überrollungen durch den Verkehr (Reifenschlupf) nach und nach eingeebnet; die Wirksamkeit der Elastomerreibung (siehe Kapitel 2.1.2) und dadurch die Griffigkeit wird reduziert. u. a. [32,43,56]



Abbildung 2.4: Beispiel einer Asphaltdeckschicht mit deutlich erkennbarem Schadensbild der Bindemittelanreicherung

Ist das verwendete Mischgut zu bindemittelreich und hohlraumarm zusammengesetzt, kann dies zu flächenhaften Bindemittelanreicherungen an der Asphaltoberfläche führen (siehe Abbildung 2.4). Dieser Zustand wirkt sich negativ auf die Griffigkeit aus, da Bindemittel im Vergleich zu freigelegten Kornoberflächen sehr ungünstige Haftreibungseigenschaften besitzt. Begünstigt werden Bindemittelanreicherungen durch zu hohe Mischguttemperaturen, dem Einsatz von Gummirad- bzw. Kombiwalzen, einer zu intensiven Verdichtung (z. B. starke Vibration), zu niedrig viskosem Bindemittel und, besonders bei geringen Hohlraumgehalten, Verwalkungen/Materialumlagerungen durch den Verkehr (siehe Kapitel 2.2.2.2). u. a. [43,67,91]

Durch Verkehrsbelastungen erfahren die Ausprägungen der Makrotextur ebenfalls eine Reduktion, indem die Hauptbelastungen über die großen Gesteinskörner in den Unterbau übertragen werden. Dadurch werden die dazwischenliegenden Fülleranteile mit Bindemittel ausgepresst und die verbleibenden Kornoberflächen werden poliert sowie eingebnet. Die Folge ist mangelndes Drainagevermögen, was zu einer Erhöhung der Aquaplaninggefahr führen kann. [59]

Des Weiteren tritt häufig das Problem von Substanzverlust auf. Substanzverlust entsteht, wenn aufgrund von Bindemittelalterung (Ausmagerungen), Kornzertrümmerungen und mangelnder Einbettung ganze Körner aus der Asphaltmatrix herausgelöst werden. Dies führt zu einer Abnahme der wirksamen Kontaktfläche zwischen dem Reifen und der Fahrbahn (siehe Kapitel 7.2.4) und dadurch zu einer Verringerung der Griffigkeit. [56] Ein solches Herauslösen von Körnern tritt häufig bei Offenporigen Asphaltdeckschichten (OPA) auf, da dieser Prozess bei OPA aufgrund einer geringeren Bettung wegen des vergleichsweise hohen Hohlraumgehaltes begünstigt wird.

2.2.2 Einfluss der Baustoffe

Asphaltmischgut enthält neben Mineralstoffgemischen (Füller, feine und grobe Gesteinskörnungen) Bitumen als Bindemittel. Die Anforderungen an das Asphaltmischgut im Straßenbau sind in Technischen Lieferbedingungen [36] festgelegt. Je nach eingesetzter Asphaltbauweise der Fahrbahn und der Zusammensetzung des verwendeten Mischguts [91] spielen die Einzelkomponenten des Mischguts hinsichtlich des Griffigkeitsniveaus eine große Rolle. Daher werden in [43] die Einflüsse der einzelnen Baustoffkomponenten auf das Niveau der Griffigkeit betrachtet und im Folgenden zusammengefasst.

2.2.2.1 Gestein

Die mineralogische Zusammensetzung bestimmt hauptsächlich sowohl die aufbereitungsbedingten Merkmale, wie z. B. die Bruchflächigkeit bzw. die Kantigkeit als auch die Polierresistenz eines Gesteinskorns. Diese Polierresistenz kommt durch den PSV-Wert zum Ausdruck, der spezifisch für alle im Straßenbau verwendeten Gesteinskörnungen ermittelt und angegeben werden muss [36]. Die Anforderungen an das verwendete Gestein hinsichtlich des Widerstandes gegen das Polieren werden in [33] festgelegt. Es gelten daher Mindestanforderungen bezüglich des PSV-Wertes, der maßgeblich ein möglichst dauerhaft hohes Niveau der Haftreibung bestimmt [85].

Neben dem PSV-Wert spielen die verwendeten Korngrößen und ihre Verteilung eine wichtige Rolle. Bei Verwendung eines kleineren Größtkorns tendiert die Deckschicht zu einer höheren Griffigkeit, da mit abnehmendem Einzelkorndurchmesser der Widerstand gegen Polieren durch Zunahme des Anteils an Kantenschärfe im Verhältnis zur flächenhaften Schärfe steigt. Daher wird bei Mischgutarten mit hohem Größtkornanteil das Einzelkorn einer erhöhten Polierbeanspruchung ausgesetzt [91] und besitzt daher höhere Anforderungen bei der Polierresistenz [36]. Als Beispiele seien hier die Bauweisen Splittmastixasphalt (SMA) und OPA genannt. Die Auswirkungen durch die Veränderung des Größtkorns machen den in Kapitel 1.1 erwähnten Zielkonflikt erneut deutlich. Durch die Verwendung eines kleineren Größtkorns wird das Drainagevermögen der Deckschicht reduziert und somit kann wiederum eine Beeinträchtigung der Griffigkeit im Fall von Fahrbahnässe eintreten. [56]

Die Art bzw. der geologische Ursprung der feinen Gesteinskörnung beeinflusst die Mikrotextur des Mörtels, die Wirkung ist jedoch nur bei Bauweisen mit entsprechend großem Anteil feiner Korngrößen signifikant. Keinen nennenswerten Einfluss auf die Griffigkeit dagegen wird der Art und der Korngrößenverteilung des im Mischgut verwendeten Füllers zugeschrieben. [43]

2.2.2.2 Bindemittel

Bei einer fachgerecht hergestellten Deckschicht sollte das Bindemittel eigentlich keinen Einfluss auf die Griffigkeit haben, da der Reifenkontakt in der Regel nur mit freiliegenden Gesteinsoberflächen stattfindet. Eine Ausnahme bildet der Zeitraum kurz nach der Herstellung der Deckschicht (siehe Kapitel 2.2.2.4). Das im Mischgut vorhandene Bindemittel beeinflusst jedoch in Zusammenarbeit mit Sand und Füller als Mörtel die Textur der Oberfläche der Deckschicht. Grundsätzlich gilt, dass die Bindemittelmengen ausschlaggebend sind. Geringe Hohlraumgehalte aufgrund einer zu hohen Bindemittelmenge können Bindemittel-/Mörtelanreicherungen an der Oberfläche (Überfettung) nach sich ziehen, die sich ungünstig auf das Haftreibungsniveau auswirken (siehe Abbildung 2.4). Dagegen hat die Bindemittelart bzw. -sorte keinen nachweisbaren Einfluss auf die Griffigkeit, sofern die Viskosität der Bindemittel keine Auswirkungen auf die Veränderung der Oberflächentextur in den Rollspuren hat. Bei hohen Verkehrsbelastungen wird, wegen ihrer günstigen Auswirkung auf die Griffigkeitsentwicklung, die Verwendung höherviskoser Bindemittel empfohlen. Bei Belastungsklassen mit höherer Verkehrsbelastung und z. B. Verwendung von SMA kommt aufgrund der deutlich höheren Viskosität häufig polymermodifiziertes Bitumen (PmB) zum Einsatz. Dies erfolgt jedoch hauptsächlich aus Gründen der Verformungsbeständigkeit gegen Wärme, aber auch aufgrund des Kälteverhaltens und der Standfestigkeit des Oberbaus. [43,91]

2.2.2.3 Einflüsse aus Einbau und Verdichtung

Neben der Einhaltung der durch die Eignungsprüfung vorgegebenen Mischgutzusammensetzung und der Verwendung von adäquaten Gesteinssorten sind ein fachgerechter Einbau der Deckschicht sowie ihre Verdichtung entscheidend für die Griffigkeit. Bei unsachgemäßem Einbau besteht die Gefahr von horizontalen und vertikalen Entmischungen. Horizontale Entmischungen durch unsachgemäßen Einsatz des Asphaltfertigers entstehen, wenn beispielsweise die Bohlenverbreiterung ohne Verteilerschnecke durchgeführt wird oder sich Grobkorn im Aufgabekübel anreichert. Vertikale Entmischungen mit Mörtelanreicherungen an der Oberfläche können durch die Auswahl ungeeigneter Walzenarten (z. B. Gummirad- oder Kombiwalzen) und durch unsachgemäßen Walzeneinsatz (z. B. Vibrationsdauer, Nichtbeachtung des Walzschemas) entstehen. [43,91]

2.2.2.4 Sicherung der Anfangsgriffigkeit

Die Oberflächen von dem im Mischgut verwendeten Gestein von Walzasphalten sind in der Regel direkt nach dem Einbau von einem dünnen Bitumenfilm überdeckt. Erst durch die Überrollungen des Verkehrs werden nach und nach die Gesteinsoberflächen freigelegt und ihre Mikrotexturen können die volle Griffigkeitwirkung entfalten. Je nach Verkehrsbelastung und der Bindemittelsorte kann dieser Prozess bis zu mehreren Monaten andauern. Um direkt nach dem Einbau eine ausreichende Anfangsgriffigkeit zu gewährleisten, werden Walzasphalte, mit Ausnahme von OPA-Deckschichten, abgestumpft, indem Abstreumaterial 1/3 mm oder 2/5 mm gleichmäßig aufgebracht und in die noch heiße Deckschicht eingewalzt wird. Die Körnung des Abstreumaterials ist dabei abhängig vom Größtkorn des eingesetzten Mischguts. Bei Gussasphalten wird die Aufrauung durch Abstreuen mit bindemittelumhülltem Abstreumaterial der Körnung 2/5 mm oder 5/8 mm hergestellt. Eine Abstreuerung kann wiederum ungünstige akustische Auswirkungen nach sich ziehen. [43,91]

2.3 Griffigkeit im Verfahren der Zustandserfassung und -bewertung

2.3.1 Griffigkeitsmessverfahren

Regelmäßige Griffigkeitsmessungen sind von großer Bedeutung, da die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche für den Verkehrsteilnehmer nicht erkennbar ist. Wie in Kapitel 2.1.1 ausgeführt, ist die Mikrotextur in großem Maße ausschlaggebend für das Niveau der Haftreibung. Da die Mikroausprägungen der Textur mit Wellenlängenanteilen von $\lambda \leq 0,5$ mm mit dem bloßen Auge nicht sichtbar sind, kann es zu Verkehrssituationen kommen, bei

denen trotz angemessener Fahrweise, ein Fahrzeug nicht sicher beherrschbar ist. Da die Verkehrssicherungspflicht dem Straßenbaulastträger obliegt, muss dieser Vorkehrungen treffen, um für alle Verkehrsteilnehmer eine sichere Benutzung der Straße zu gewährleisten. Aufgrund des Gefährdungspotentials der hohen Schutzgüter (Menschenleben) ist die regelmäßige Messung der Griffigkeit im Rahmen der ZEB sowie weiterer Ergänzungsmessungen eine wesentliche Überwachungspflicht des Verkehrssicherungspflichtigen. Kann eine ausreichende Griffigkeit nicht gewährleistet werden, müssen griffigkeitsverbessernde Maßnahmen [35] ergriffen werden oder es muss durch verkehrsrechtliche Anordnungen auf die Gefahrensituation hingewiesen werden. [32]

Die folgenden Verfahren besitzen alle den Nachteil, dass die Messung taktil erfolgen muss, indem ein definiertes Gummielement über die Straßenoberfläche gleitet und daraus auf bestimmte Weise der Kraftschluss zwischen den Reibpartnern abgeleitet wird, der jeweils vom Messverfahren abhängig ist. Der dadurch entstehende Verschleiß und die Tatsache, dass für alle Verfahren Annässungswasser in einem Wassertank vorgehalten werden muss, machen die Messtechniken aufwendig und kostenintensiv. Zudem ist zu beachten, dass aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen der Messmethodiken eine eindeutige Korrelation zwischen Messergebnissen, die durch unterschiedliche Messverfahren gewonnen wurden, nicht in zufriedenstellendem Maße möglich ist [58,97]. Des Weiteren wird häufig die Präzision von Messungen, insbesondere die Wiederholgenauigkeit auch aufgrund von Geschwindigkeits- und Temperaturkorrekturfaktoren, in Frage gestellt. [44,95]

Daher wäre für die Zukunft ein Verfahren wünschenswert, das berührungslos die Fahrbahnoberfläche misst und aus der gemessenen Textur einen Wert für die vorhandene Griffigkeit ableitet. Ein solches Verfahren könnte neben der Reduktion der Erfassungskosten die Wiederhol- und Vergleichsgenauigkeit verbessern [95]. Eine berührungslose Griffigkeitsmessung hätte des Weiteren ein enormes Potential für den Einsatz in Fahrerassistenzsystemen, bei denen beispielsweise dem Fahrzeuglenker ein, wie bereits erwähnt, nicht sichtbarer Mangel bei der Griffigkeit eines Straßenabschnitts angezeigt wird.

2.3.1.1 Kombinierte Griffigkeitsmessung

Das einfachste Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen ist die kombinierte Griffigkeitsmessung. Diese besteht aus der Messung mit dem SRT-Pendelgerät (Skid Resistance Tester) und dem Ausflussmesser nach *MOORE* (AM) (siehe Abbildung 2.5). Die Verwendung der Messverfahren und deren Grundlagen sind in der Technischen Prüfvorschrift [39] und in den Normen [22,23] geregelt.

Das SRT-Pendelgerät besteht aus einem dreiarmigen Basisgestell, das ein Standrohr trägt, an dem ein Skalenschild und der Pendellagerkopf mit Pendelarm und Schleppzeiger

angebracht sind. Am Ende des Pendelarms des SRT-Gerätes befindet sich ein federnd gelagerter Gummigleitkörper. Die vorgespannte Feder drückt beim Schwingen des Pendels mit ca. 10 km/h die Reibkante des Gleitkörpers mit annähernd gleichbleibender Kraft gegen die zu prüfende angenässte Straßenoberfläche. Der Verlust der dabei verlorengangenen potentiellen Energie über die definierte Reiblänge von ca. 12,6 cm ergibt das Maß für die Griffigkeit und kann mittels Skalenschild und Schleppzeiger abgelesen werden. Der SRT-Wert ist dimensionslos und abhängig von der Temperatur der Fahrbahnoberfläche sowie der Umgebungstemperatur. Daher werden alle Messergebnisse mittels eines Korrekturwertes in Abhängigkeit der Gleitkörpertemperatur korrigiert.

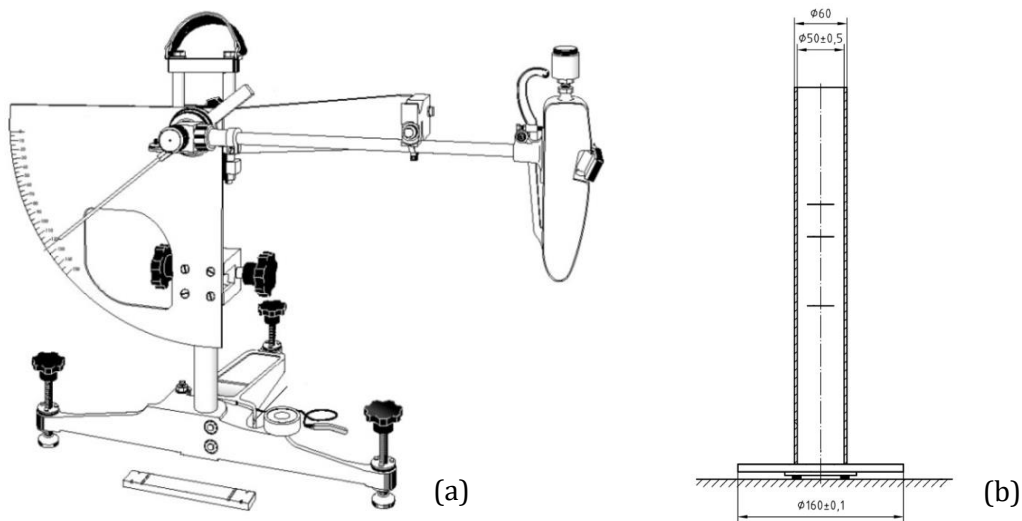


Abbildung 2.5: Messsysteme der kombinierten Griffigkeitsmessung bestehend aus dem (a) SRT-Pendelgerät (Skid Resistance Tester) und (b) Ausflussmessgerät nach Moore [22,39]

Bei der Ausflussmessung nach Moore wird ein 41,0 cm hoher Acrylglaszylinder, an dessen Unterseite ein Gewichtsring mit einem Gummiring angeklebt ist, auf die Prüfoberfläche gestellt. Der Zylinder wird mit Wasser gefüllt und die Ausflusszeit zwischen zwei Markierungen gemessen. Fließt das Wasser sehr schnell aus, ist ein hohes Drainagevermögen bei der Deckschicht vorhanden. Fließt das Wasser sehr langsam aus oder bleibt gar stehen, ist das ein Indiz für eine erhöhte Aquaplaninggefahr.

Mit dem SRT-Pendel wird die Mikrorauheit und damit das Maß der Haftreibung bewertet, während mit dem AM das Drainagevermögen einer Fahrbahnoberfläche untersucht wird, welches hauptsächlich von der Makrorauheit abhängt. Die Messergebnisse werden jeweils in Kombination bewertet. Nachteil der Messmethode ist, dass es sich um ein stationäres Verfahren handelt, das nur punktuell eingesetzt und nicht unter fließendem Straßenverkehr durchgeführt werden kann. Die SRT/AM-Messungen werden hauptsächlich zur Entscheidung herangezogen, ob auf Kontrollprüfungen bei der Abnahme mit dem Seitenkraftmessverfahren (siehe Kapitel 2.3.1.2) verzichtet werden kann.

2.3.1.2 Seitenkraftmessverfahren

Das Seitenkraftmessverfahren (SKM) oder im englischsprachigen Raum auch bekannt als SCRIM-Verfahren (Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine) ist das gängigste Verfahren zur Kontrolle der Fahrbahngriffigkeit in Deutschland und ist nach [36] bauvertraglich zugelassen. Es wird die Seitenkraft an einem Messfahrzeug unter einem Schräglaufwinkel α von 20° angebrachten Messrad bestimmt (siehe Abbildung 2.6). Das Messrad ist mit einem profillosen Reifen bestückt und rollt unter einem definierten Seitenschlupf ab. Der Quotient aus der gemessenen Seitenführungskraft F_y und der bekannten Radlast (Normalkraft) F_z ergibt den Seitenkraftbeiwert zur Bewertung der Griffigkeit. Es gilt

$$\mu_{SKM} = \frac{F_y}{F_z} \quad (2.2)$$

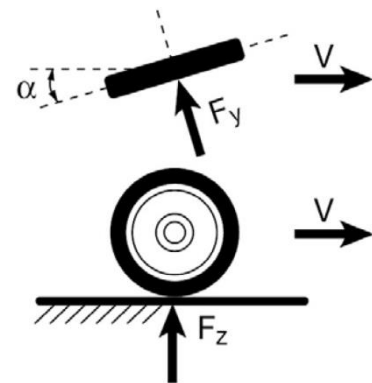


Abbildung 2.6: Messeinrichtung eines Messfahrzeuges für das Seitenkraftmessverfahren und das dazugehörige Messprinzip [41]

Da die kritischen Kraftschlusswerte zwischen Reifen und Fahrbahn in der Regel bei Nässe auftreten, muss die Fahrbahn in der Rollspur während der Messung angehästet werden. Dazu besitzt das Messfahrzeug neben einem Vorratstank eine Ausflussvorrichtung direkt vor dem Messrad, die geschwindigkeitsabhängig einen definierten Wasserfilm auf die Messoberfläche aufbringt. Alle festgelegten Bedingungen, Toleranzen und Einflussfaktoren auf die Messungen hinsichtlich Messfahrten, Messgeschwindigkeiten, Messgenauigkeit, Temperaturen, Verunreinigungen und Wassermengen sind in [41] festgelegt.

Zur Bewertung der Gültigkeit der Messergebnisse wird die Prüfstrecke in 2 km lange Gültigkeitsabschnitte eingeteilt, die wiederum aus normierten 100 m-Abschnitten besteht, und aus zwei Messungen gebildet werden. Im Gegensatz zur kombinierten Griffigkeitsmessung (siehe Kapitel 2.3.1.1) handelt es sich hier um ein dynamisches linienhaftes Verfahren mit einer wesentlich höheren Verlässlichkeit in den Aussagewerten. Die Wiederholgenauigkeit der Messungen ist jedoch aufgrund der Schwankungen der Fahr-

bahngriffigkeit (siehe Kapitel 2.1.1) und den zahlreichen Faktoren, die die Ergebnisse des SKM-Messverfahrens beeinflussen, noch verbesserungsfähig.

2.3.1.3 GripTester

Beim LFC-Messverfahren (Longitudinal Friction Coefficient) [40] wird der Kraftschlussbeiwert nach dem Prinzip des definiert gebremsten Messrades ermittelt. Das typische Prüfgerät ist der GripTester, der aus einem dreirädrigen Anhänger mit zwei Antriebsrädern und einem profillosem Messrad besteht. Bei der Messung muss die Straßenoberfläche ebenfalls mit Wasser benetzt werden. Die horizontale Längsreibungskraft, die in der Messradachse erfasst wird, ist abhängig vom Kraftschluss zwischen dem Messreifen und der Fahrbahn. Gleichzeitig wird die auf das Messrad wirkende Normalkraft erfasst. Das Messrad ist mit Dehnmessstreifen ausgestattet. Die Dehnung, ausgelöst durch die elastische Verformung des Messrades, kann in die Horizontal- und Normalkraftkomponenten umgerechnet werden. Der Quotient daraus ergibt den Kraftschlussbeiwert

$$\mu_{LFC} = \frac{F_H}{F_N} \quad (2.3)$$

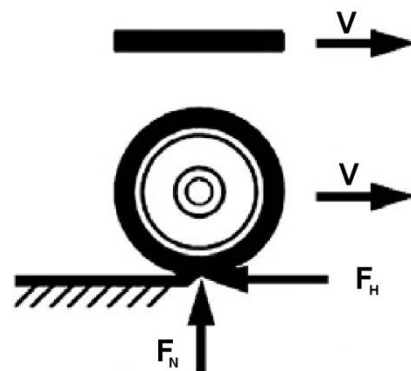


Abbildung 2.7: Beispiel eines GripTesters mit dem dazugehörigen Messprinzip [40,70]

Alle Messbedingungen und Einflussfaktoren sind denen des SKM-Verfahrens ähnlich und sind in [40] detailliert aufgeführt. Der GripTester kann sowohl im Schlepptrieb als auch im Schubtrieb eingesetzt werden und ist daher in seiner Verwendung sehr flexibel. Da entsprechend [34,36] für Abnahme- und Gewährleistungsmessungen lediglich das SKM-Verfahren eingesetzt werden darf, findet der GripTester aufgrund seiner Flexibilität häufig bei Flugbetriebsflächen oder Parkflächen seinen Einsatz.

2.3.2 Zustandswerte und Erhaltungsplanung

Die Anforderungen für die Griffigkeit auf Straßen sind in technischen Regelwerken fest verankert. Dabei wurde lange Zeit lediglich die Forderung nach einer ausreichenden Rauheit einer Fahrbahnoberfläche gestellt. Erst seit dem Jahr 2001 sind die Grenzwerte für die Abnahme und für die Messungen im Rahmen der Verjährungsfrist für Mängelansprüche definiert, d. h. die Grenzwerte sind erst seit diesem Zeitpunkt für abgeschlossene Bauverträge quantitativ verbindlich festgelegt. Neben den bauvertraglichen Prüfungen der Griffigkeit erfolgen regelmäßig netzweite Messungen im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB), einem amtlichen Verfahren zur Ermittlung der Qualität des öffentlichen Straßennetzes und des daraus entstehenden Investitionsvolumens. [44]

Zustandswerte		Zustandsgrößen				
ZEB-Werte		Messverfahren SKM			Kombinierte Griffigkeitsmessung	
Zustandswert	Bedeutung	μ_{SKM} bei $v =$			SRT [Einheiten]	AM [s]
		40 km/h	60 km/h	80 km/h		
1		0,66	0,61	0,56	-	-
1,5	Zielwert	0,63	0,58	0,53	60	30
2		0,59	0,54	0,49	-	-
	Abnahme	0,56	0,51	0,46		
	Gewährleistung	0,52	0,48	0,43		
3		0,52	0,47	0,42	-	-
3,5	Warnwert	0,49	0,44	0,39	55	60
4		0,45	0,4	0,35	-	-
4,5	Schwellenwert	0,42	0,37	0,32	50	120
1		0,66	0,61	0,56	-	-

Tabelle 2.1: Zustandswerte für Planungs- und Erhaltungsmaßnahmen [32,36,42]

Die dabei aktuell gültigen Grenzwerte können Tabelle 2.1 entnommen werden und gelten nach den Regelwerken [36,38] für Asphaltstraßen. Die Grenzwerte von Betonfahrbahnoberflächen sind identisch. Unterschieden werden die Anforderungen an eine fertige Oberfläche bei der Abnahme des Bauwerks und nach Ablauf der Gewährleistungsfrist (je nach Belastungsklasse 4 bzw. 5 Jahre).

Es gilt zu beachten, dass in Deutschland für die messtechnische Ermittlung des Zustandsmerkmals Griffigkeit im Verfahren der ZEB lediglich das SKM-Verfahren (siehe Kapitel 2.3.1.2) zum Einsatz kommen darf. Die dabei ermittelten Zustandsgrößen werden mithilfe von Normierungsfunktionen in einen Zustandswert überführt, der zusammen mit weiteren erfassten Merkmalsgruppen, wie die Quer- und Längsebenheit sowie Substanzmerkmale, zu einem Gesamtwert zur Zustandsbewertung zusammengefasst werden. [42] Für Abnahme-, Gewährleistungs- sowie Kontrollmessungen kann dagegen auch die kombinierte Griffigkeitsmessung eingesetzt werden [67].

Werden bei einer Messung die oben genannten Anforderungen an die Griffigkeit der Fahrbahn unterschritten, können im Rahmen der baulichen Erhaltung nach [38] diverse Instandhaltungs-, Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen zum Einsatz kommen, um ein ausreichendes Sicherheitsniveau für die Verkehrsteilnehmer wiederherzustellen. Die technischen Maßnahmen, die hier zur Verfügung stehen, werden an dieser Stelle nicht weiter diskutiert. Es sei auf das Merkblatt für griffigkeitsverbessernde Maßnahmen an Verkehrsflächen aus Asphalt [35] verwiesen.

3 Physikalische Grundlagen und Stand der Wissenschaft der Reibungsphysik

3.1 Kontaktmechanik und Reibung von Elastomeren

Das Fachgebiet der Kontaktmechanik beschäftigt sich mit der Untersuchung des Kontakts zwischen zwei Körpern und deren Wirkungen untereinander. Das Feld ist dabei sehr breit gefächert und ist Teil der wissenschaftlichen Disziplin der Tribologie, die sich mit Festigkeitsnachweisen, Reibung, Schmierung und dem Verschleiß zweier relativ zueinander bewegender Oberflächen bzw. Kontaktelemente beschäftigt [87,101].

Bereits im 15. Jahrhundert erkannte *DA VINCI*, dass bei Festkörpern die Reibungskraft proportional zur Belastung und unabhängig von der scheinbaren Kontaktfläche ist. Diese Erkenntnis der Proportionalität der Reibkraft zur Normalkraft wurde um 1700 von *AMONTONS* wiederentdeckt und ist noch heute als *AMONTONSsches* Gesetz bekannt. Im 18. Jahrhundert wurden diese Erkenntnisse von *COULOMB* bestätigt. Er stellte ebenso fest, dass die Haftreibung größer ist als die Gleitreibung. Diese ist des Weiteren unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit. Der Reibkoeffizient selbst, als Quotient aus der Reibkraft und der Normalkraft, wurde erstmals von *EULER* formuliert (siehe Kapitel 7.2.3). [87]

Für die vorliegende Arbeit gilt zu berücksichtigen, dass bei viskoelastischen Materialien, wie z. B. bei Reifenelastomeren, die klassischen Reibgesetze ihre Gültigkeit verlieren. Der Reibkoeffizient besitzt keine linearen Abhängigkeiten zwischen der Normalkraft und der Geschwindigkeit. Es besteht jedoch ein linearer Zusammenhang zwischen dem Reibkoeffizient und der wahren Kontaktfläche, der sogenannten effektiven Kontaktfläche (siehe Kapitel 3.3 und 7.2.4). [98]

Die Grundlage der Kontaktmechanik bilden daher die Erkenntnisse von *HERTZ*, der den Kontakt zwischen zwei elastischen Körpern mit gekrümmten Oberflächen beschrieben hat. [79,87] Bei der Betrachtung einer starren Ebene im Kontakt mit einem elastischen Halbraum lassen sich diese Erkenntnisse nachvollziehen.

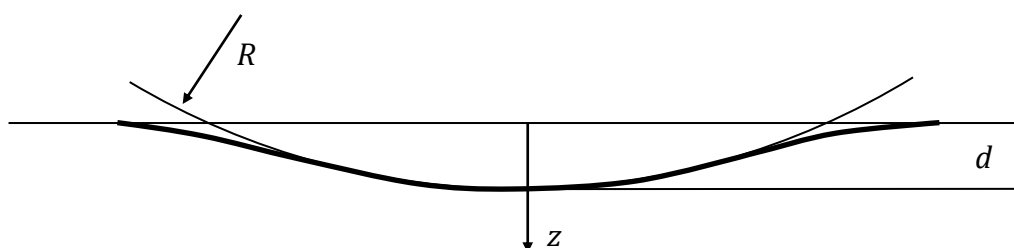


Abbildung 3.1: Eine starre Kugel im Kontakt mit einem elastischen Halbraum nach [87]

Betrachtet man zunächst die Verschiebung der Oberflächenpunkte im Kontaktgebiet so, dass die Druckverteilung genau die Verschiebungen verursacht, folgt für den Kontaktradius in Abhängigkeit des Kugelradius R und der Eindringtiefe d

$$a^2 = Rd \quad (3.1)$$

und für den Maximaldruck

$$p_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left(\frac{d}{R} \right)^{1/2}, \quad (3.2)$$

wobei

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (3.3)$$

mit dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl ν . Aus den Gleichungen (3.1) und (3.2) folgt für die Normalkraft

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2}. \quad (3.4)$$

Mithilfe der Gleichungen (3.2) und (3.4) lassen sich nun der Druck im Zentrum des Kontaktgebietes und der Kontaktradius als Funktion der Normalkraft berechnen. Es wird des Weiteren deutlich, dass die Kontaktfläche nicht-linear mit der aufgebrauchten Normalkraft F ansteigt. [66,79,87]

Die oben genannten Erkenntnisse führten zu der Annahme, dass der Haftreibungskoeffizient (siehe Kapitel 7.2.3) bei der Elastomerreibung abhängig ist von der Belastung. Unter der Annahme von gekrümmten Oberflächenunebenheiten und dem elastischen Verhalten von Gummi (siehe Kapitel 3.2) nach *HERTZ* wird anhand empirischer Versuche bereits in den 50er Jahren bestätigt, dass der Koeffizient mit zunehmendem Kontaktdruck abnimmt. [74,94] Mithilfe der in dieser Arbeit verwendeten Simulationsmethodik (siehe Kapitel 7) kann dieser Zusammenhang bestätigt werden (siehe Kapitel 7.3).

Die detaillierten Vorgänge bei der Reibung von Elastomeren wurden bereits in Kapitel 2.1.2 eingeführt. Für die folgende Haftreibungssimulation ist es jedoch von großer Bedeutung die viskoelastischen Eigenschaften von Elastomeren eingehender zu betrachten.

3.2 Viskoelastische Eigenschaften von Elastomeren

Zu den wesentlichen Eigenschaften von Elastomeren oder auch Gummi gehört zum einen ihr extrem kleiner Elastizitätsmodul E (ca. 1 bis 10 MPa bzw. N/mm²). Dieser lässt sich unter der Annahme eines elastischen Materialverhaltens mit der Vorschrift $E = 3G$

näherungsweise in das dazugehörige Schubmodul G umrechnen (ca. 0,1 und 100 MPa bzw. N/mm²). Zum anderen besitzen Elastomere eine sehr hohe elastische Deformierbarkeit. Das Maß einer Deformation des Reifengummis bei der Überfahrt über eine starre raue Oberfläche wird im Wesentlichen durch die dynamische Viskosität η des Elastomers beeinflusst. In [68] wird von einem Verzahnungseffekt gesprochen, der einem Belastungs-/Entlastungs-Zyklus unterworfen ist. Dieser Zyklus induziert den bereits in Kapitel 2.1.2 diskutierten Effekt der Hysterese. In diesem Zusammenhang trifft man auch häufig auf den Begriff Zähigkeit. Die gängige Einheit der Viskosität beträgt $1 \text{ mPas} = 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$. Neben der viskosen Eigenschaft besitzen Elastomere aber auch elastische Eigenschaften, weshalb sie als lineare viskoelastische Werkstoffe behandelt werden. Die Struktur eines Elastomers ist dabei die Ursache für seine Eigenschaften. Elastomere gelten als polymere, vernetzte Werkstoffe. Ihre Polymermoleküle befinden sich unbelastet in einem verknäulten Zustand. Wird der Werkstoff gedehnt, beginnen sich die Moleküle zu entflechten. Eine Entlastung führt zur Relaxation in den Ursprungszustand. [29,87,107] Bei der Betrachtung der tribologischen Eigenschaften von Elastomeren wird deutlich, dass die Reibungseigenschaften von Elastomeren auf ihrer Rheologie und nicht auf den Oberflächeneigenschaften basieren (siehe Kapitel 7.1). [87]

Durch die Zugabe weiterer Füllstoffe, wie beispielsweise Ruß, können die Eigenschaften von Elastomeren für die Herstellung von Reifen hinsichtlich Elastizität, Haftung und Verschleißverhalten weiter verbessert werden. Man spricht dann von einem gefüllten Gummi. [69,87]

3.3 Kontaktmodelle zwischen rauen Oberflächen

Eine wichtige Teildisziplin der Tribologie beschäftigt sich mit der Modellierung von Kontaktbedingungen von rauen Oberflächen, die mit einem Elastomer in Kontakt treten. Es sei darauf hingewiesen, dass in diesem Bereich in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl an Theorien entwickelt worden sind. Dabei reicht die Bandbreite der Untersuchungen von empirischen über analytische bis hin zu numerischen Modellansätzen, die an dieser Stelle nicht detailliert betrachtet werden können. Vielmehr werden im Folgenden die beiden wesentlichen Theorien vorgestellt, auf die sich die in dieser Arbeit verwendete Methode der Dimensionsreduktion (siehe Kapitel 6) hauptsächlich stützt.

3.3.1 Modell nach GREENWOOD und WILLIAMSON

Kapitel 2.1.1 hat gezeigt, dass Oberflächen, wie beispielsweise Asphalt, Rauheitsausprägungen auf mehreren Skalen besitzen. Daraus resultiert, dass die effektive Kontaktfläche

zwischen einer rauen Oberfläche und einem Elastomer sehr viel kleiner ist, als die nominelle Fläche. Die Berechnung der effektiven Kontaktfläche ist abhängig von der Belastung (siehe Kapitel 7.2.4). Dies hat die Modellvorstellung des *HERTZ*schen Kontakts bereits gezeigt (siehe Kapitel 3.1). Nachteil dieser Modellvorstellung ist die Tatsache, dass die Kontaktfläche einer Rauheitsspitze von ihrem Radius abhängt und dieser in aller Regel unbekannt ist. [49]

GREENWOOD und *WILLIAMSON* (GW) griffen die Idee von *HERTZ* auf und modellierten eine raue Oberfläche aus einer Vielzahl von identisch gekrümmten Rauheitserhebungen. Um der realen statistischen Verteilung von Oberflächenhöhen gerecht zu werden, wurden die Höhen dieser Modellkugeln normalverteilt angeordnet (siehe Kapitel 4.1). Bei dieser Vorgehensweise wird der Multiskalencharakter einer Oberfläche (siehe Kapitel 2.1.1) allerdings nicht betrachtet, weshalb im Ergebnis des GW-Modells kein ideal linearer Zusammenhang zwischen der Belastung und der effektiven Kontaktfläche hergestellt werden kann. Zudem hängen die Bedingungen wie der Druck oder die Größe des Mikrokontaktes in einzelnen Mikrokontaktpunkten nur schwach von der Belastung ab. u. a. [5,19,49,87]

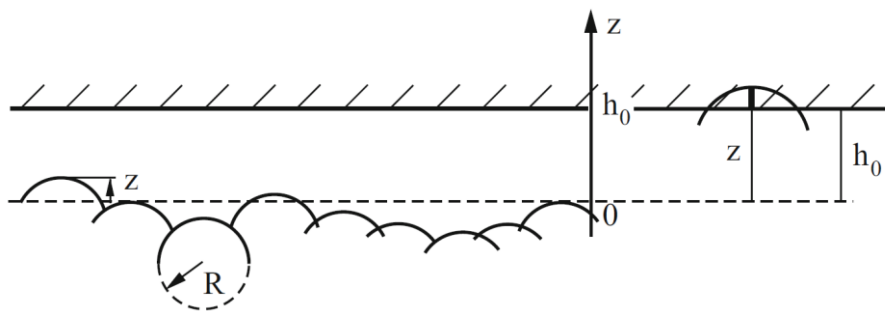


Abbildung 3.2: Modellvorstellung der Oberfläche nach *GREENWOOD* u. *WILLIAMSON* [87]

Mithilfe der Gleichung (3.1) und der Eindrucktiefe $d = z - h_0$ folgt für die Kontaktfläche einer Rauheitsspitze

$$\Delta A = \pi a^2 = \pi d \cdot R = \pi(z - h_0)R \quad (3.5)$$

mit der darauf wirkenden Kraft

$$\Delta F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2} = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} (z - h_0)^{3/2}. \quad (3.6)$$

z ist dabei die Höhe des Mikrokontaktes und h_0 der mittlere Abstand zwischen den beiden Kontaktflächen. Die Gesamtkontaktfläche A und die Gesamtnormalkraft F können im Anschluss durch Integration der Oberfläche im Kontakt über alle Rauheitsspitzen mit der Bedingung $z = h_0$ gewonnen werden. Daraus ergibt sich die Proportionalität der Kontaktfläche zur Gesamtnormalkraft mit

$$\frac{A}{F} \approx \left(\frac{R}{l}\right)^{1/2} \frac{3,3}{E^*} \quad (3.7)$$

in einer guten Näherung; den schwach logarithmischen Faktor ausgenommen. [49,87]

3.3.2 Theorie nach *PERSSON*

Die bisherigen Kenntnisse auf dem Gebiet der Kontaktmechanik nahm *PERSSON* auf, um sich in zahlreichen Veröffentlichungen [77–84,109] der Entwicklung einer umfassenden analytischen Beschreibung des Kontakts zwischen rauen Oberflächen und Elastomeren anzunähern. Dabei wird angenommen, dass eine raue Oberfläche Rauheitsausprägungen auf verschiedenen Längenskalen besitzt und sich ihre äußeren Gestalt bzw. Form (Morphologie) und die statistischen Eigenschaften auf diesen Längenskalen nicht ändern. Solche Oberflächen werden als selbstaffin bezeichnet und werden in Kapitel 5.1 eingehender betrachtet.

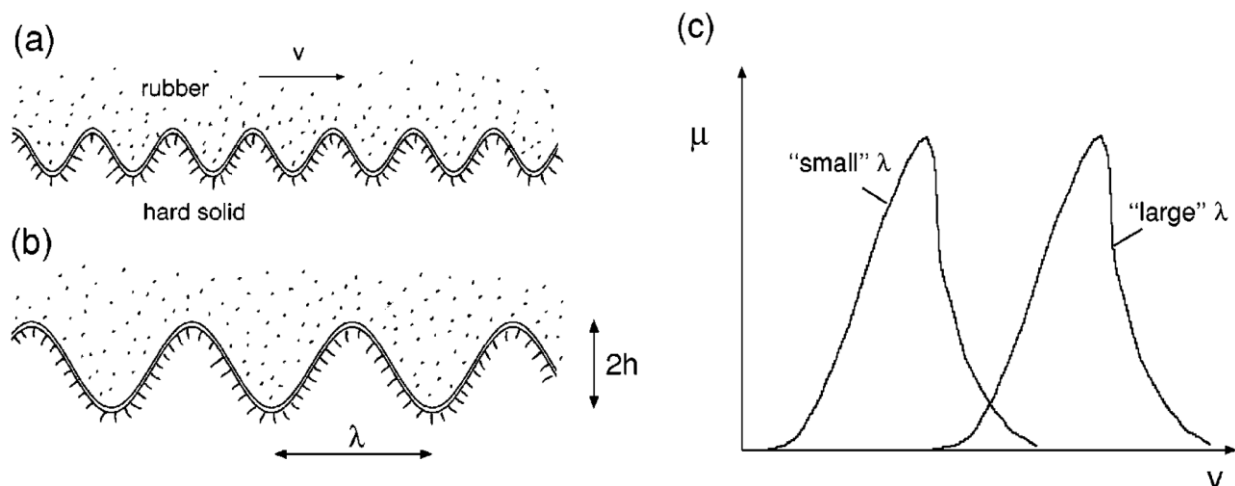


Abbildung 3.3: Betrachtung eines Elastomers, das über eine raue Oberfläche gleitet; die Werte der Haftreibungskoeffizienten in (c), die aus dem Hystereseeffekt hervorgehen sind für die Fälle (a) und (b) gleich groß, da das Verhältnis von Rauheitsamplitude und Wellenlänge jeweils gleich ist [77]

Die analytische Lösung zur Berechnung des geschwindigkeitsabhängigen Haftreibungskoeffizienten μ nach *PERSSON* [83] lautet

$$\mu = \frac{1}{2} \int_{q_0}^{q_1} dq q^3 C(q) P(q) \int_0^{2\pi} d\phi \cos \phi \operatorname{Im} \frac{E(qv \cos \phi)}{(1 - v^2)\sigma}. \quad (3.8)$$

Ein analytischer Ansatz zur Ermittlung des Haftreibungskoeffizienten ist jedoch nicht der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Vielmehr soll ein numerischer Ansatz gefunden werden, der die kontaktmechanischen Prozesse der Elastomerreibung abzubilden vermag. Daher wird auf die mathematische Herleitung der Gleichung (3.8) an dieser Stelle ver-

zichtet und auf die oben genannten Veröffentlichungen verwiesen. Es werden jedoch im Folgenden die in die Berechnungen einfließenden Einzelkomponenten der Gleichung (3.8) erläutert, die im weiteren Verlauf der Arbeit zur realitätsnahen Abbildung der Haftreibung in die Simulation einfließen werden.

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 ausgeführt, basiert der Effekt der Hysterese auf der viskoelastischen Energiedissipation, die sich durch innere Elastomerreibung aufgrund der pulsierenden Krafteinwirkung der Oberflächenunebenheiten auf das Elastomer einstellt. Dieser Effekt kommt durch den komplexen E -Modul in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v zum Ausdruck, wobei σ den lotrechten Kontaktdruck (Normalkraft pro nominale Kontaktfläche) darstellt (siehe Kapitel 7.2). Wie Kapitel 4.4.2.1 zeigen wird, ist das Ergebnis der Berechnung vom Leistungsspektrum $C(\vec{q})$ der Textur abhängig, wobei \vec{q} der Wellenvektor darstellt, der zwischen den Grenzen $q_0 < q < q_1$ definiert ist. Des Weiteren ist der Haftreibungskoeffizient μ nach *PERSSON* von der relativen Kontaktfläche $P(q)$, die der effektiven Kontaktfläche zwischen den beiden Reibpartnern entspricht, abhängig. Auf diese wird in Kapitel 7.2.4 detaillierter eingegangen.

4 Charakterisierung der Texturgeometrie

Ziel dieser Arbeit ist es, auf Grundlage der Texturen von Fahrbahndeckschichten mit diskreten Höhenpunkten auf der Mikroskala die wirksame Haftreibung im Falle eines Reifenkontakts numerisch zu simulieren und mithilfe der Simulationsergebnisse wiederum einen Bezug zur Textur und ihren geometrischen Eigenschaften herzustellen. Dazu muss ein Grundverständnis von Texturen, die scheinbar regellose Verteilungen der einzelnen Texturhöhen besitzen, erlangt werden. Für eine genauere Untersuchung werden exemplarisch Texturen optisch dreidimensional aufgenommen und im Rahmen eines Datenvorverarbeitungsprozesses für weitere Betrachtungen aufbereitet. Des Weiteren wird auf eine generelle Typisierung von Texturen eingegangen sowie die Ableitung diverser sowohl ortsräumlicher als auch frequenzräumlicher Parameter zur expliziten Charakterisierung von Texturen spezifiziert.

4.1 Klassifizierung von Festkörperoberflächen

Die Festkörperlehre unterscheidet inhomogene und homogene Oberflächen (siehe Abbildung 4.1). Die Textur einer Fahrbahndeckschicht fällt dabei in die Kategorie der homogenen Oberflächen, da ihre physikalischen Eigenschaften über die ganze Oberflächenausdehnung als gleichartig angesehen werden kann. Dabei sind die einzelnen Texturhöhen zufällig verteilt; die Untersuchung der Höhen der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Straßenoberflächen hat stets ergeben, dass zudem eine Normalverteilung vorliegt, was die Erkenntnisse u. a. in [86] bestätigt.

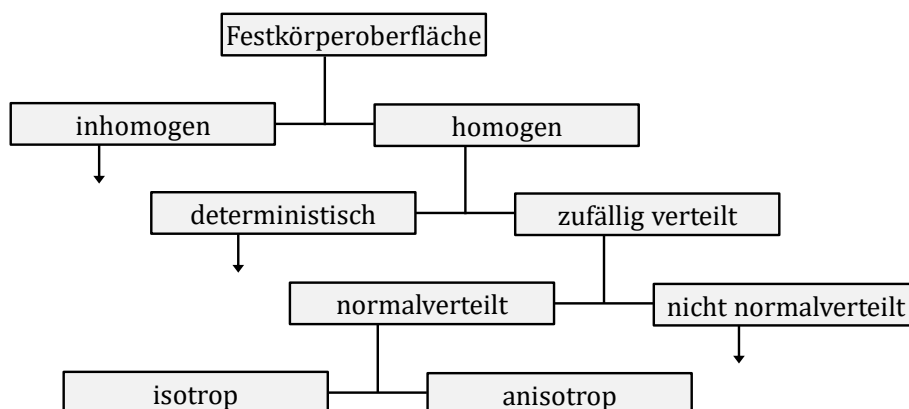


Abbildung 4.1: Generelle Typisierung von Oberflächen nach [75]

Weiterhin werden Texturen hinsichtlich der räumlichen Variation eingeteilt. DIN ISO 13473 [24] unterscheidet dazu isotrope und anisotrope Texturen. Eine isotrope Textur besitzt in allen Richtungen in der Ebene der Oberfläche ähnliche Textureigen-

schaften, während eine Textur, die eine gerichtete Struktur aufweist, als anisotrop gilt (siehe Abbildung 4.2).

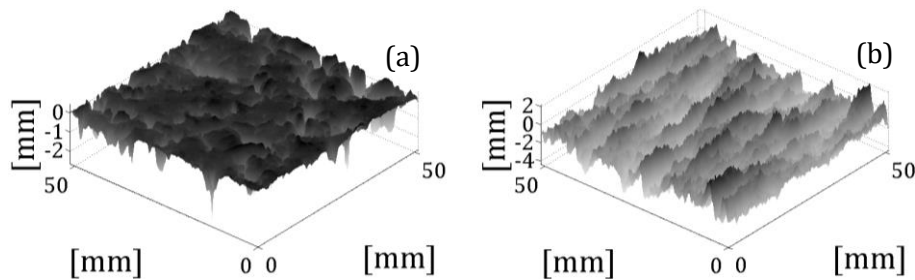


Abbildung 4.2: Beispiel einer gemessenen isotropen Makrotextur (a) sowie einer numerisch erzeugten anisotropen Makrotextur (b)

Typische Beispiele für isotrope Texturen sind Oberflächen von Asphaltdeckschichten, ganz unabhängig von der verwendeten Bauweise. Des Weiteren besitzen Fahrbahnen aus Waschbeton eine isotrope Textur. Oberflächen von klassischen Betonfahrbahnen besitzen eine charakteristische gerichtete Struktur. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Griffigkeit von Betonoberflächen werden diese nach dem Glätten dem Regelwerk [34] nach mit einem Stahlbesen quer zur Fahrtrichtung strukturiert. Dieser wird jedoch bei aktuellen Baumaßnahmen entweder durch ein Jutetuch oder mithilfe von Kunstrasen in Längsrichtung ersetzt [44]. Diese Art von Oberflächen und Oberflächen mit gefrästen Quer- oder Längsrillen gelten als anisotrop.

In dieser Arbeit wurden lediglich isotrope Texturen messtechnisch erfasst (siehe Kapitel 4.2). Es ist jedoch ebenfalls möglich anisotrope Texturen der Haftreibungssimulation zuzuführen, da sich diese mithilfe des in Kapitel 5.2.1 aufgeführten Verfahrens numerisch generieren lassen.

4.2 Optische Messtechnik

4.2.1 Messverfahren

Grundlage dieser Arbeit sind Texturaufnahmen verschiedener Asphaltproben. Hierbei ist die Art der Deckschicht, aus der die Asphaltprobe stammt, und die Materialunterscheidung Gestein-Bitumen von geringerer Bedeutung. Vielmehr dienen diese Texturen einem grundsätzlichen Verständnis der geometrischen Zusammensetzung einer Deckschichttextur, wobei der Fokus auf der Mikrotextur liegt, da diese für das Niveau der Haftreibung ausschlaggebend ist. Es ist daher hinsichtlich der Wahl des zu verwendenden optischen Messverfahrens und der damit verbundenen Auflösung (siehe Kapitel 4.2.2) zu beachten, dass insbesondere die feinen Rauheiten der Gesteinskörner einer Deckschicht von großem

Interesse sind. Hierbei spielen insbesondere die Höhenverteilung einer Textur, die Texturrautiefen (siehe Kapitel 4.4.1.1) und die vorhandenen Texturwellenlängen (siehe Kapitel 2.1.1 und 4.4.2) eine Rolle.



Abbildung 4.3: Streifenprojektion (verwendete Messeinrichtung)

Aufgrund der Struktur der Asphaltzusammensetzung kann ein Reifen im Kontaktfall nie mit der vollständigen makroskopischen Oberfläche eines Gesteinskorns in Berührung kommen (siehe Kapitel 7.2.4). Daher wird für die Messungen eine mittlere Korngröße von 10 mm als ausreichend erachtet; die maximal mögliche Korngröße einer Deckschicht beträgt 12 mm (siehe Kapitel 2.2.2.1). Ausgehend von dieser mittleren Korngröße von 10 mm wird zur Betrachtung eines einzelnen Korns eine erforderliche Messfeldgröße im Bereich von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ gesehen. Die Messfeldgröße ist stark abhängig von der erforderlichen lateralen Auflösung der Messaufgabe. Um die Mikrotextur in Gänze betrachten zu können, wobei die wirksame Untergrenze unbekannt ist, muss die Auflösung sehr fein gewählt werden. Dies führt dazu, dass die Größe der Messfelder noch unter dem geforderten Wert liegen kann.

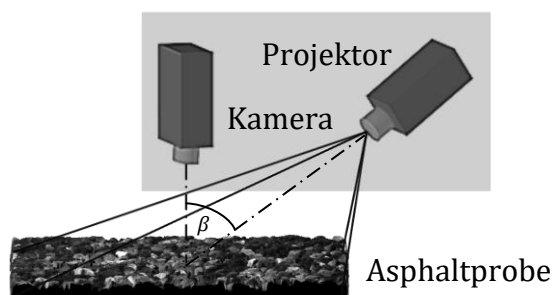


Abbildung 4.4: Prinzip der Streifenprojektion

Ein zweckmäßiges Messverfahren, das hier zum Einsatz kommt, ist die Streifenprojektion. Sie ermöglicht eine berührungslose optische Erfassung einer dreidimensionalen Textur.

Die Messung kann sehr schnell und flächendeckend erfolgen. Das Messsystem besteht aus einer CCD-Kamera mit einem Messobjektiv und einem Streifenprojektor. Die Anordnung der Kamera und des Projektors muss so erfolgen, dass der Winkel $\beta < 90^\circ$ beträgt. (siehe Abbildung 4.4)

Bei der Durchführung eines Messvorgangs projiziert der Projektor eine Sequenz unterschiedlicher Streifenmuster auf die Textur. Die Streifen werden nun durch die Ausprägungen der Textur gebrochen. Die daraus entstehende Streifenauslenkung wird von der Kamera erfasst. Ein einzelnes Streifenmuster ist nicht ausreichend, um die Position des Musters auf der Bildebene eindeutig bestimmen zu können. Mit einer geeigneten Sequenz von Streifenmustern unterschiedlicher Wellenlängen kann jedoch die Position in der Bildebene des Projektors durch eine Abfolge von hellen und dunklen Werten eindeutig kodiert werden. Die Auslenkungen der Streifensequenzen werden anschließend mithilfe der theoretischen Zusammenhänge der geometrischen Optik zur Berechnung der Koordinatenwerte der Höhenpunkte verwendet. [53]

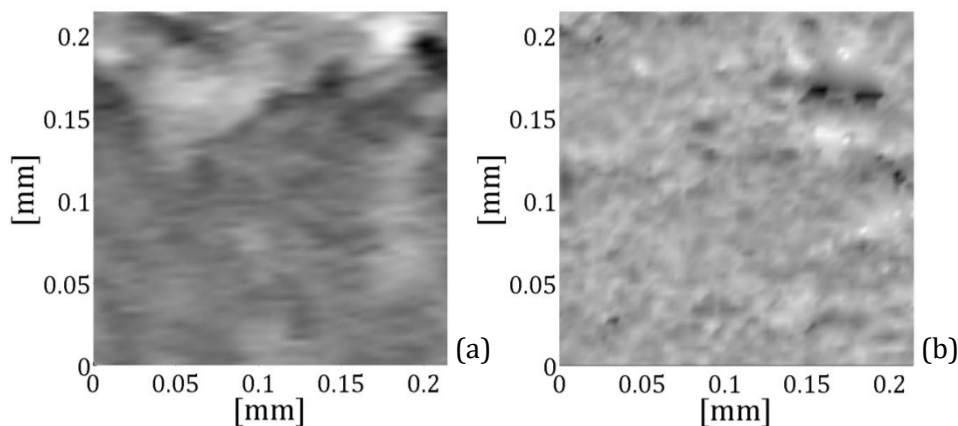


Abbildung 4.5: Stark vergrößerter Ausschnitt zweier Mikrotexturen unterschiedlicher Asphaltdeckschichten nach Eliminierung langwelliger Anteile; Textur mit anisotroper Struktur aufgrund der Lasermessrichtung (a), Textur mit stochastisch isotroper Struktur (b)

Weitere Texturen wurden mithilfe eines Doppeltriangulationssensors gemessen. Dieser besteht aus einem Laserkopf für die Messung der Texturhöhen, der starr über einem horizontal verschiebbaren Messtisch angeordnet ist. Der Messkopf arbeitet, ähnlich der Streifenprojektion, nach dem Triangulationsprinzip mit zwei symmetrisch angeordneten positionsempfindlichen Detektoren, die so kalibriert sind, dass maximal eine Texturtiefe von 3 mm aufgenommen werden kann. Der Messtisch ermöglicht eine Fixierung des Messobjekts und wird mithilfe eines Schrittmotors in x - und y -Richtung verschoben. Dieses Prinzip des Verschiebens bringt den Nachteil mit sich, dass bei höchster Auflösung, die bei der Betrachtung von Mikrotexturen notwendig sind, gerichtete Strukturen, insbesondere in x -Richtung, wahrnehmbar sind (siehe Abbildung 4.5). Daher sollten lediglich Texturen, die

mit demselben Messsystem aufgenommen wurden, einer vergleichenden Betrachtung hinsichtlich ihrer Griffigkeit zugeführt werden.

4.2.2 Betrachtungen zur Messauflösung

Um die für Mikrot Texturen notwendige Abtastrate und somit die laterale Auflösung zu bestimmen, wird das *NYQUIST-SHANNON*-Theorem [48,89] herangezogen. Es besagt, dass die Abtastrate größer sein muss als das Doppelte des maximalen Frequenzanteils der Textur:

$$f_{tast} > 2 \cdot f_{maxTextur}. \quad (4.1)$$

Mit $f = 2\pi/\lambda$ folgt $\lambda_{tast} < 1/2 \cdot \lambda_{maxTextur}$. Das bedeutet, dass Mikrot Texturen erst dann detektiert werden können, wenn die laterale Auflösung mindestens 0,25 mm beträgt. Im Falle der Streifenprojektionskamera ist die Auflösung durch die Pixelzahl der zur Bilderfassung verwendeten CCD-Kamera gegeben, wobei jedes Pixel eine z-Koordinate liefert. Das oben dargestellte Messsystem erzielt dabei eine laterale Auflösung von ca. 2 μm , d. h. in etwa Wellenlängen bis 4 μm . Die vertikale Auflösung liegt dabei in derselben Größenordnung. Der Doppeltriangulationslaser dagegen kann bei einer Texturmessung eine laterale Auflösung von 3 μm und eine vertikale Auflösung von 0,3 μm erzielen.

Nach [53] sind in den nächsten Jahren im Bereich der optischen Messtechnik Fortschritte hinsichtlich der Auflösung und insbesondere auch hinsichtlich der Messfeldgröße zu erwarten. Es ist jedoch mittelfristig nicht mit einer messtechnischen Möglichkeit zu rechnen, aus einem fahrenden Fahrzeug derart hohe Auflösungen flächenhaft zu erzielen, wie es für eine berührungslose Griffigkeitsmessung auf Grundlage der Mikrot Textur notwendig wäre.

4.2.3 Messergebnisse

Das Ergebnis der Messungen sind Messfelder, die mit den in Kapitel 4.2.2 diskutierten Auflösungs werten gewonnen wurden. Dabei wurden laterale Auflösungen von 2 μm - 6,6 μm realisiert. In Anbetracht der Tatsache, dass das Tool GripViewer in akzeptabler Geschwindigkeit Texturen bis zu einer Größe von $N^2 = 2048^2$ verarbeiten kann, lassen sich somit Messfeldgrößen von $4 \times 4 \text{ mm}^2$ bis $13 \times 13 \text{ mm}^2$ ableiten. Bei dieser Messfeldgröße muss bedacht werden, dass sich die Matrix der Texturhöhen schon aus über 4 Millionen Datenpunkten zusammensetzt. Je nach Datenoperation kann diese Größe zu verlängerten Rechenzeiten im Tool GripViewer führen.

Die Messsysteme geben die Koordinaten auf einem äquidistanten x - y -Gitter mit der dazugehörigen Texturhöhe z , wie in Abbildung 4.6 dargestellt, in der Regel in einem ASCII-Format aus. Dieses Format kann mithilfe des Parsers der Entwicklung GripViewer unter Angabe der verwendeten Maßeinheit und der lateralen Auflösung zur Vorbereitung der Haftreibungssimulation interpretiert werden.

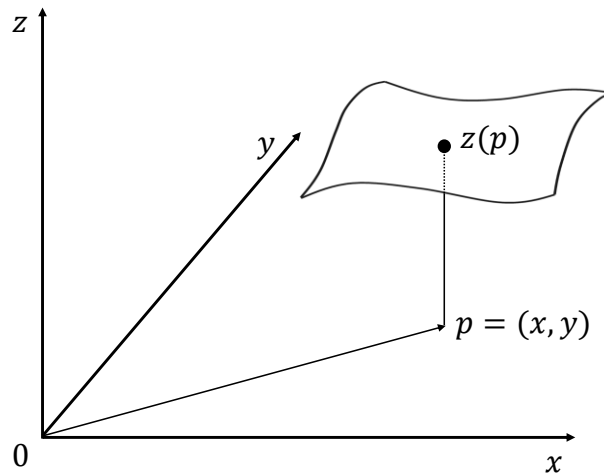


Abbildung 4.6: Koordinatenbildung der Texturhöhenpunkte bei der optischen Messung

4.3 Datenvorverarbeitung

4.3.1 Grundlagen digitaler Filterverfahren

Bei der praktischen Verwendung optischer Messtechnik erhält man oft fehlerhafte, fehlende oder verrauschte Höhendaten. Daher gehört es im Rahmen der Datenvorverarbeitung zu den wichtigsten Aufgaben diese entweder als systematisch oder zufällig zu begründende Fehler zu detektieren und zu beseitigen. Die Beseitigung soll es ermöglichen, eine möglichst realitätsnahe Datengrundlage aus der Messung zu erhalten, auf deren Basis die weiteren Berechnungen erfolgen und Verfahren angewendet werden sollen.

Die im vorliegenden Fall gemessenen Rohdaten der Texturhöhen (siehe Kapitel 4.2) sind im Wesentlichen von zwei Fehlerklassen geprägt. Zum einen werden vom Messsystem systembedingte Messfehler automatisch auf einen bestimmten Wert gesetzt. Zum anderen entstehen durch Abschattungseffekte, insbesondere in den Texturtälern oder -kavitäten, zufällige Ausreißer. Beide Fehlerklassen lassen sich mithilfe geeigneter Filterverfahren, wie sie häufig in den Bereichen der Signaltechnik und der Bildverarbeitung vorkommen, beseitigen. Die Verfahren aus der Bildverarbeitung lassen sich aufgrund der gleichen Dimensionalität leicht auf Texturhöhendaten übertragen.

Abbildung 4.7 zeigt eine Filteroperation, bei der Abbildungen von Texturhöhenpunkten realisiert werden. Dabei wird das Filterergebnis üblicherweise aus einer zusammenhängenden Region, bestehend aus mehreren Texturhöhen, berechnet. Diese Filterregionen enthalten unterschiedliche Gewichtungen, wobei dem Filterkern näherliegende Höhenpunkte stärker berücksichtigt werden als entfernte Höhenpunkte. Diese Gewichtungsfunktionen sind auch als Impulsantwort bekannt.

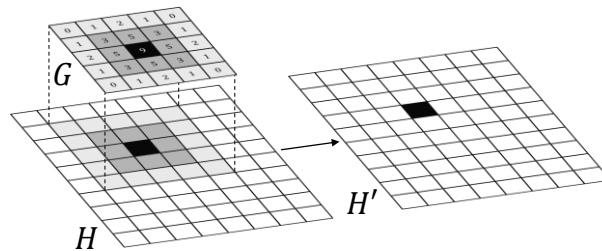


Abbildung 4.7: Funktionsprinzip am Beispiel eines linearen *GAUSS*-Filters

Eine Filterung lässt sich sowohl ortsräumlich als auch frequenzräumlich durchführen. Bei der Betrachtung im Ortsraum wird bei der Filteroperation die Texturhöhenmatrix H mit der Filtermaske G mittels linearer Faltung diskret verknüpft [17,48,102]. Es sei:

$$H' := G * H = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau)H(t - \tau) d\tau. \quad (4.2)$$

Bei einer frequenzräumlichen Betrachtung überführt man die Texturhöhenmatrix H durch eine diskrete Fourier-Transformation (DFT) in den Frequenzraum. Nach der Überführung wird die Textur nicht mehr durch Höhenwerte charakterisiert, sondern man erhält die Frequenzen bzw. Wellenlängen der periodischen Texturanteile. Die Filterung ist dann mathematisch betrachtet nur noch eine einfache Matrizenmultiplikation

$$H' = G \cdot H. \quad (4.3)$$

Beim Einsatz digitaler Filter spricht man von einem idealen Filter, wenn alle Filterkriterien erfüllt werden und dadurch die Sperrwirkung des Filters ideal ist. D. h. Wellenlängen oberhalb der Grenzwellenlänge λ_c werden komplett gesperrt und die Wellenlängen, die den Filter passieren, werden in ihrer Amplitude nicht verändert. In diesem Fall ist der Übergang von Durchlass- und Sperrbereich unendlich steil (siehe Abbildung 4.8). Ein idealer Filter repräsentiert allerdings nicht die physikalischen Gegebenheiten. In Wirklichkeit werden im Übergangsbereich nicht alle Anteile oberhalb und unterhalb der Grenzwellenlänge gedämpft. Die Dämpfung erfolgt in der Regel exponentiell abfallend. Die Übertragungsfunktion entspricht häufig der eines *GAUSS*- oder *BUTTERWORTH*-Filters. Für den Grad der Steilheit im Übergangsbereich ist die Ordnung der Übertragungsfunktion verantwortlich. Je höher die Ordnung, desto eher nähert man sich einem idealen Filter an (siehe Kapitel 4.3.2). [48,102]

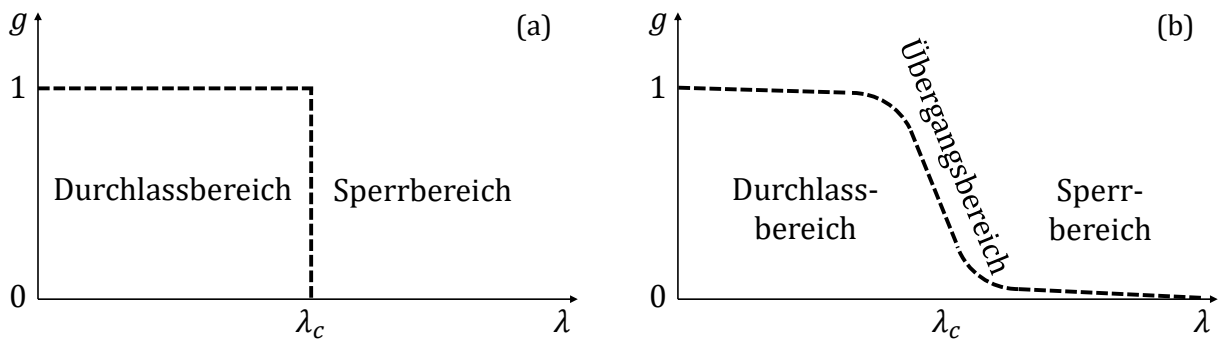


Abbildung 4.8: Eindimensionale Übertragungsfunktion g eines idealen Tiefpassfilters (a) im Vergleich zum realen Tiefpassfilter (b) mit der Grenzwellenlänge λ_c

Bei der Anwendung von Filterverfahren, sowohl ortsräumlich als auch frequenzräumlich betrachtet, zeigt sich ein weiteres prozedurales Problem in der Vorgehensweise, das bei einer Implementierung beachtet werden muss; das Randproblem (siehe Abbildung 4.9). Das Randproblem ergibt sich, wenn die Filtermaske die Texturmatrix im Randbereich überragt, was das Filterergebnis stark verändern würde. [16]

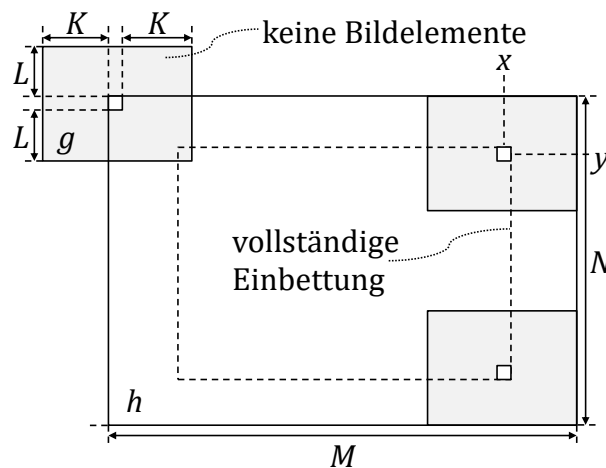


Abbildung 4.9: Randproblem bei Filterungen [16]

Zur Lösung des Randproblems stehen diverse Padding-Verfahren zur Verfügung, wobei im vorliegenden Fall das Last-Value-Verfahren eingesetzt wird. Dabei werden die äußersten Werte des Arrays der Texturhöhenmatrix so lange kontinuierlich nach außen fortgesetzt, bis die Filtermaske gerade noch die äußersten Zeilen und Spalten der Texturmatrix abdecken kann. Im Bereich der Ecken entstehen so homogene Flächen mit dem jeweiligen Matrixeckwert.

Exkurs Fourier-Transformation

Die zweidimensionale DFT beispielsweise einer Texturhöhenmatrix der Größe $N \times N$ zur Überführung in den Frequenzraum ist definiert durch

$$\hat{H}(h_x, h_y) = \sum_{x=0, y=0}^{N-1} H(x, y) \cdot e^{i \frac{2\pi}{N}(h_x x + h_y y)}, \quad (4.4)$$

wobei $H(x, y)$ die Fourierkoeffizienten darstellen, mithilfe deren Produkts sich die Textur als Summe aus Sinus- und Kosinusfunktionen darstellen lässt. Durch die Anwendung einer inversen DFT lässt sich das Filterergebnis H' aus der Gleichung (4.3) wieder zur orts-räumlichen Betrachtung gewinnen. Die dazugehörige inverse Fourier-Transformation, mit deren Hilfe die Texturamplituden zurück in den Ortsraum transformiert werden, lautet dann

$$H(x, y) = \frac{1}{N^2} \sum_{h_x=0, h_y=0}^{N-1} \hat{H}(h_x, h_y) \cdot e^{-i \frac{2\pi}{N}(h_x x + h_y y)}. \quad (4.5)$$

Der entscheidende Vorteil einer Vorgehensweise über die Filterung im Frequenzraum ist eine deutliche Geschwindigkeitssteigerung im Falle der Implementierung in einem Softwaretool, wie z. B. in MATLAB®, insbesondere bei großen Faltungskernen. [48,83,89] Denn eine DFT lässt sich wesentlich effektiver numerisch mithilfe einer Fast Fourier Transformation (FFT) durchführen, weil dabei bestimmte Rechenoperationen wegfallen, indem die Transformation für N Elemente auf jeweils zwei Transformationen mit $N/2$ Elementen verteilt wird. Der Rechenaufwand bei einer DFT beträgt bei zweidimensionalen Operationen in etwa N^4 komplexe Multiplikationen, während eine FFT mit $N^2 \cdot \log_2 N$ komplexen Multiplikationen auskommt. Daraus resultiert mithilfe der FFT eine deutlich beschleunigte Rechenoperation. Dies ist auch der Grund, warum Messfelder der Größe N^2 deutlich effektiver zu handhaben sind. GripViewer bietet daher die Möglichkeit Texturen auf die nächstkleinere quadratische Größe N^2 zuzuschneiden.

4.3.2 Behandlung von systematischen und zufälligen Messfehlern

Bei vielen optischen Messtechniken entstehen durch Abschattungen insbesondere in Texturtälern oder Kavitäten, oder durch materialbedingte Reflexionen systematische Messfehler. Deren Ursachen sind dem System in der Regel bekannt. Die Höhenwerte dieser Punkte können daher vom Messsystem auf einen bestimmten Wert gesetzt werden (im vorliegenden Fall -1) und lassen sich dadurch im Rahmen der Datenvorverarbeitung leicht detektieren. Im Anschluss daran erhalten die Höhenpunkte im Array, die als systematische

Messfehler deklariert sind, den numerischen Datentyp NaN; einen undefinierten Datenwert.

Im Gegensatz zu den systematischen Messfehlern sind die Ursachen von zufälligen Fehlern teilweise unbekannt, da sie meist völlig regellos auftreten. Dabei können neben dem Messgerät und dem Messobjekt auch Umwelteinflüsse, wie z. B. die Lichtverhältnisse bei der Messdurchführung, eine Rolle spielen. Zur Vermeidung zufälliger Fehler wird in der Regel eine Messaufgabe mehrfach wiederholt und im Anschluss eine Mittelung der Messwerte durchgeführt. Im vorliegenden Fall konnte, der aufwendigen Messmethode geschuldet, von den jeweiligen Asphaltproben lediglich eine Messung durchgeführt werden.

Jedes Messergebnis besteht daher aus dem wahren Wert und einer stochastischen Variation in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen, welche auch als Rauschen bezeichnet wird. Eine rauschfreie Messung ist praktisch nicht möglich. Da die Untergrenze des für die Haftreibung wirksamen Wellenlängenbereichs nicht bekannt ist (siehe Kapitel 2.1.1), wird bewusst auf eine Rauschunterdrückung mittels Filterverfahren verzichtet, um keine griffigkeitsrelevanten Anteile zu verlieren. Entsprechend dem in Kapitel 4.3.3 folgenden Filterverfahren ist jedoch, eine geeignete Wahl der Filterparameter vorausgesetzt, eine Rauschunterdrückung durch das Tool GripViewer möglich.

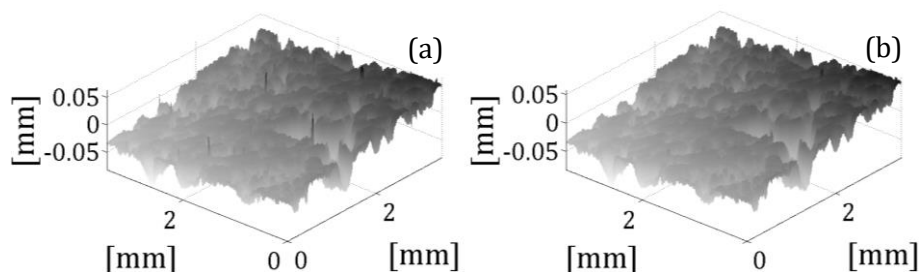


Abbildung 4.10: Textur mit Messausreißern vor der Filterung (a) und Textur nach der Eliminierung der Ausreißer (b)

Die zweite Klasse von zufälligen Messfehlern, die bei den Messungen auftreten, sind lokale Ausreißer. Die Ausreißer in der Textur sind geprägt von einer signifikanten Höhenabweichung zur umgebenden Texturregion. Diese Art von Messfehlern ist visuell leicht zu erkennen und muss für die weitere Verwendung eliminiert werden, da sie gravierende Auswirkungen auf die Bildung von statistischen Texturparametern und auf die Ergebnisse der Haftreibungssimulation nach sich ziehen würden (siehe Abbildung 4.10).

Das Problem bei der Detektion von zufälligen Fehlern, insbesondere von Ausreißern, liegt in der Unterscheidung von Fehlerpunkten und weitestgehend korrekten Höhenpunkten. Das klassische Verfahren zur Detektion von Ausreißern mittels der Abweichung eines Einzelpunktes von der Standardabweichung des Texturhöhenensembles kann daher nicht zum

Ziel führen. Kurzwellige Fehler in langwelligen Makrotexturtälern würden dabei unberührt bleiben. Um solche Fehler zuverlässig zu ermitteln, wird ein Bandstopffilter verwendet, der es ermöglicht ein bestimmtes Frequenzband für eine Übertragung zu sperren, während alle Frequenzen über- und unterhalb der Bandsperre passieren können [3]. Dazu wird die Texturhöhenmatrix mittels diskreter Fourier-Transformation $H(x, y) \rightarrow H(u, v)$ in den Frequenzraum überführt (siehe Kapitel 4.3.1). Theoretisch betrachtet, stellt ein Bandstopffilter eine parallele Ausführung einer Hoch- und Tiefpassfilterung dar, wobei der dazwischenliegende Bereich ausgesperrt wird. Der Filterkern des verwendeten *BUTTERWORTH*-Bandstopffilters ist definiert zu

$$B(u, v) = \frac{1}{1 + \frac{D(u, v) \cdot w}{(D(u, v)^2 - \lambda_c^2)^{2n}}}. \quad (4.6)$$

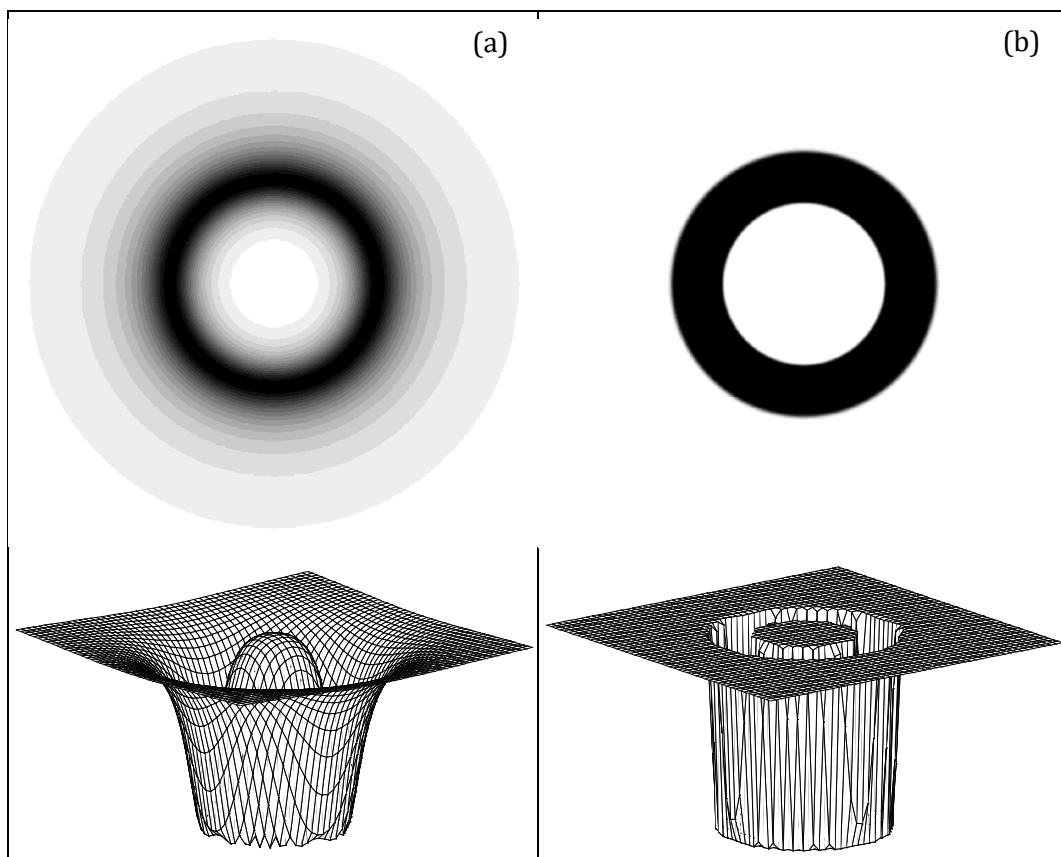


Abbildung 4.11: Übertragungsfunktionen von *BUTTERWORTH*-Bandsperrfilterer erster Ordnung (a) und zehnter Ordnung (b)

Mit $n \rightarrow \infty$ konvergiert der Filter zum idealen Filter (siehe Abbildung 4.11 und Kapitel 4.3.1). $w = const.$ bestimmt die Bandbreite des Filters, während $\lambda_c = const.$ die Grenzwellenlänge darstellt [3]. Eine klare Definition der Grenzwellenlänge ist jedoch bei dieser Art von Filter nicht möglich. Man verwendet daher oft die Stelle $D(u, v)$

$$D(u, v) = \frac{\left((u - (nx + 1))^2 + (v - (ny + 1))^2 \right)^{1/2}}{2} \quad (4.7)$$

als den Abstand zwischen dem Ursprung und dem Punkt (u, v) im Frequenzraum [48]. An dieser Stelle beträgt $H(u, v) = 0.5$, d. h. noch 50 % seines Maximalwertes. Bandsperrfilter mit äußerst schmaler Frequenzcharakteristik und hoher Flankensteilheit werden auch Kerb- oder Notch-Filter genannt. Die Form der Filterung ist besonders effektiv bei der Entfernung schmalbandiger Interferenzen einer Textur, wie sie nach der Messung von Texturen häufig vorliegen.

Entsprechend den Filteroperationen, erläutert in Kapitel 4.3.1, erfolgt der Filtervorgang durch die Matrixmultiplikation $H' = B \cdot H$ im Frequenzraum. Eine inverse Fourier-Transformation führt H' zurück in eine ortsräumliche Betrachtungsweise. Der Realteil H' ergibt dann das gesperrte Wellenlängenband W . Im Anschluss an diesen Filtervorgang werden in der vorliegenden Arbeit alle Höhen, die um mehr als die dreifache Standardabweichung σ_W des gefilterten Wellenlängenbandes abweichen auf „Not a Number“ (NaN) gesetzt. Bei dieser Vorgehensweise und der damit verbundenen Filterkalibrierung durch die Auswahl der Filterordnung, der Bandbreite und der Grenzwellenlänge sind zuverlässige Ergebnisse bei der Detektion von zufälligen Fehlerpunkten innerhalb einer Textur zu erzielen (siehe Abbildung 4.10).

In den vorhergehenden Ausführungen wird die Detektion systematischer und zufälliger Messfehler beschrieben. Sind die Koordinaten der Fehlerpunkte innerhalb der Texturhöhenmatrix $H(x, y)$ bekannt, werden die Höhenwerte an diesen Stellen gelöscht. So entstehen unbesetzte Stellen im Array der Texturhöhen, die in zwei Klassen eingeteilt werden können. Bei Einzelfehlerpunkten sind alle Höhen in der 8-Punkt-Nachbarschaft bekannt. Fehlerfelder erhält man, wenn mindestens zwei benachbarte Höhenpunkte innerhalb einer 8-Punkt-Nachbarschaft unbesetzt sind. Die Unterscheidung ist deshalb notwendig, weil auf dieser Grundlage die Interpolationsverfahren, die aus dem Bereich der Bildverarbeitung stammen, zum Füllen der Lücken ausgewählt werden.

Einzelfehlerpunkte werden durch eine Abfrage der Randwerte ermittelt. Sind für einen unbesetzten Gitterpunkt der Texturhöhenmatrix alle acht Nachbarschaftspunkte vorhanden, so wird der Einzelfehlerpunkt durch das arithmetische Mittel der Höhen in der 8-Punkt-Nachbarschaft ersetzt:

$$H'(x, y) = \frac{1}{8} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 H(x - i, y - j) \quad \forall i, j = -1, 0, 1 \quad \setminus \{i = j = 0\}. \quad (4.8)$$

Zur Interpolation der Fehlerfelder innerhalb der Texturhöhenmatrix kommt ein digitaler Inpainting-Algorithmus zur Anwendung, der häufig im Bereich der Bildrestauration herangezogen wird. Dieses Verfahren wird verwendet, um Bilder, die eine Schädigung

aufweisen, wiederherzustellen, indem Farbwerte der Schadstellen numerisch interpoliert werden. Mithilfe dieses Algorithmus ist es möglich, die unbekanntes Höhenwerte innerhalb der Fehlerfelder einer Textur zu ermitteln, indem vom Randbereich aus, mit den dort bekannten Höhenwerten, die Felder gleichmäßig interpoliert werden.

Der Höhenverlauf der Textur innerhalb des Feldes mit den fehlenden Höhenwerten kann durch eine partielle Differentialgleichung beschrieben werden. Die partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung mit der Funktion u für die Verläufe in x - und y -Richtung lautet

$$u_{xx} + u_{yy} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, y) + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}(x, y) = 0 \quad (4.9)$$

und entspricht dem homogenen Fall der *POISSON*-Gleichung, der auch als *LAPLACE*-Gleichung bekannt ist. Die *LAPLACE*-Gleichung ist das einfachste Beispiel einer elliptischen Differentialgleichung und beschreibt zahlreiche technische und physikalische Vorgänge, wie z. B. die stationäre Temperaturobreitung innerhalb eines Materials. Im vorliegenden Fall wird die Ausbreitung der Höhenwerte vom Randbereich betrachtet. Da alle Randwerte bekannt sind und als Vorgabewerte in die Berechnung mit eingehen, gelten die *DIRICHLET*-Randbedingungen. [31]

Der vorliegende Fall besitzt ein äquidistantes Gitter im Abstand d , weshalb Gleichung (4.9) mithilfe der zentralen Differenzenmethode numerisch approximiert werden kann [100]. Die zweiten partiellen Ableitungen zur Beschreibung eines Höhenpunktes $H(x_i, y_i)$ werden dabei durch Differenzenquotienten angenähert:

$$u_{xx}(x_i, y_i) \approx \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{d^2}, \quad (4.10)$$

$$u_{yy}(x_i, y_i) \approx \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{d^2}. \quad (4.11)$$

Setzt man die Gleichungen (4.10) und (4.11) in Gleichung (4.9) ein, erhält man für den in Abbildung 4.12 dargestellten Differenzenstern den von d^2 befreiten Differenzenausdruck

$$4u_{i,j} - u_{i,j+1} - u_{i,j-1} - u_{i-1,j} - u_{i+1,j} = 0. \quad (4.12)$$

Bildet man nun für alle Punkte $H(x_i, y_i)$, die mit mindestens einem besetzten Randwert benachbart sind, die Gleichung (4.12), erhält man ein lineares Gleichungssystem der Dimension $(n-1)(m-1) \times (n-1)(m-1)$. Durch das Lösen des linearen Gleichungssystems lassen sich die unbekanntes Höhen bestimmen, mit deren Hilfe die Fehlerfelder durch die entsprechenden Höhenwerte aufgefüllt werden. [31]

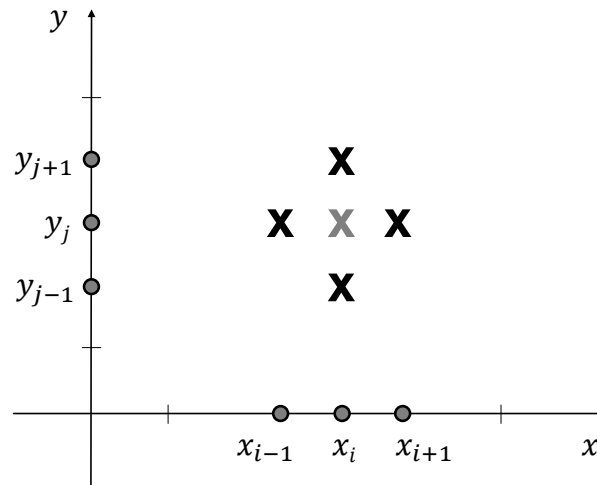


Abbildung 4.12: Prinzip der 4-Punkt-Nachbarschaft der zentralen Differenzenmethode zur Approximation der LAPLACE-Gleichung [31]

Je größer das Feld mit den fehlenden Werten ist, desto mehr tendiert die Approximation zu einer Mittelwertbildung der Randwerte, also zu einer Glättung, und desto größer wird die Abweichung zur realen Textur. Die Parameter Bandweite, Grenzwellenlänge und Filterordnung sollten daher so gewählt werden, dass die Fehlerfelder möglichst klein gehalten werden, um so nicht unnötig die Texturhöhen zu verfälschen.

4.3.3 Trennung von Bereichen unterschiedlicher Texturwellenlängen

Wie in Kapitel 2.1.1 ausgeführt, kann die Textur in Abhängigkeit der Texturwellenlänge in unterschiedliche Wellenlängenbereiche eingeteilt werden. Für die Griffigkeit relevant sind dabei die Bereiche der Makro- und Mikrotextrur. Diese Bereiche können aus materialwissenschaftlicher Sicht als Welligkeit und Rauheit umschrieben werden, wobei keine konkrete Festlegung einer Wellenlänge besteht, die die beiden Bereiche voneinander trennt [105]. Da für die Simulation der Haftreibung lediglich die Mikrotextrur, also die Rauheit, eine Rolle spielt, werden für alle weiteren Prozesse die Wellenlängenbereiche der Textur mithilfe einer Filtertechnik in definierte Bandbreiten aufgeteilt. Die Grenzwellenlänge bestimmt dabei die Wellenlänge der Textur, deren Amplitude mit 50 % durch den Filter übertragen wird [21] und kann in der Implementierung in GripViewer frei gewählt werden. Mit abnehmender Grenzwellenlänge nehmen die Amplituden der gefilterten Rauheit der Textur ab und die der Welligkeit der Textur zu. DIN ISO 13473 [24,25] regelt die Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen und unterstreicht für weitere mathematische Berechnungen die Notwendigkeit Steigungen und andere langwellige Anteile der Textur zu eliminieren sowie das mittlere Niveau des Profils über die Auswertungslänge auf null zu setzen, sodass gilt $\langle h \rangle = 0$.

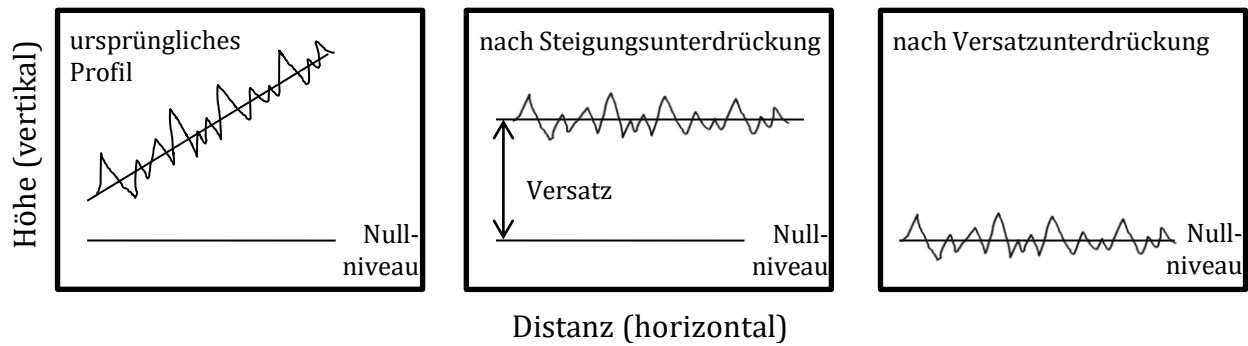


Abbildung 4.13: Steigungs- und Versatzunterdrückung eines Profils nach [24]

Zur Trennung dieser beiden Texturwellenlängenbereichen bzw. zur Steigungsunterdrückung wird u. a. in [24] eine Hochpassfilterung vorgeschlagen (siehe Abbildung 4.14). Daher wird ein linearer *GAUSS*-Filter verwendet, der in [103] rechenstechnisch effizient entwickelt wurde. Im eindimensionalen Fall besitzt die Gewichtungsfunktion des *GAUSS*-Filters im Ortsraum die Gleichung der *GAUSS*schen Dichtefunktion mit der Grenzwellenlänge λ_c [21]:

$$G(x) = \frac{1}{\alpha\lambda_c} e^{-\pi\left(\frac{x}{\lambda_c}\right)^2} \quad (4.13)$$

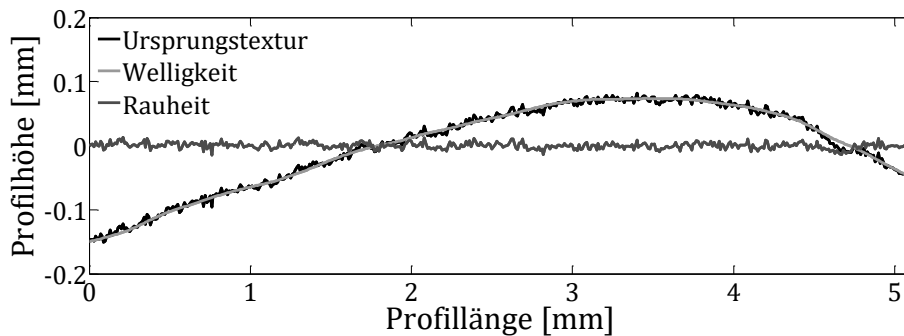


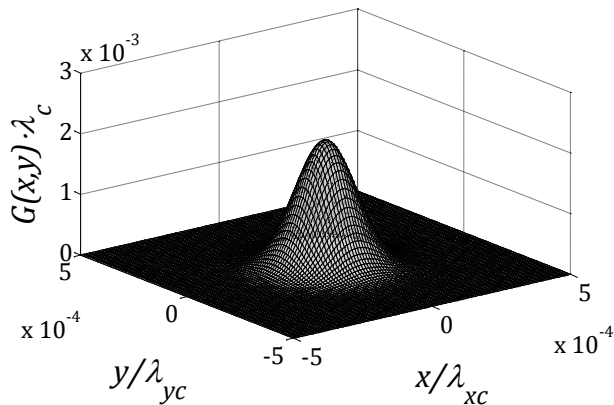
Abbildung 4.14: Rauheitsprofile einer Textur im Ursprungszustand sowie mit Welligkeits- und Rauheitsanteilen (Makro- und Mikrotextrur) nach der Filterung

Zwischen der Funktion $G(x)$, als Impulsantwort eines *GAUSS*-Filters, und des dazugehörigen Fourierspektrums

$$g(\lambda) = e^{-\pi\left(\frac{\alpha\lambda_c}{\lambda}\right)^2} \quad (4.14)$$

besteht ein eindeutiger Zusammenhang in beiden Richtungen. Daher bilden die beiden Funktionen ein Transformationspaar und weisen im Ortsraum und im Frequenzraum denselben Funktionstyp auf [16]. DIN ISO 11562 [21] legt fest, dass für $\lambda = \lambda_c$ der Wert für die Filtercharakteristik $g(\lambda) = 0,5$ betragen soll und daher $\alpha = \sqrt{\ln 2 / \pi} = 0,4697$ ist. Die Erweiterung auf den zweidimensionalen Fall erfolgt nach [103] aufgrund der Separierbarkeit eines *GAUSS*-Filters als Aneinanderreihung des eindimensionalen Filters jeweils in

x - und y -Richtung. Die verwendete Filtermatrix entspricht einer diskreten, zweidimensionalen GAUSS-Funktion:



$$G(x, y) = \frac{1}{\beta \lambda_{xc} \lambda_{yc}} e^{\left\{ \frac{-\pi}{\beta} \left[\left(\frac{x}{\lambda_{xc}} \right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda_{yc}} \right)^2 \right] \right\}}. \quad (4.15)$$

Abbildung 4.15: GAUSSsche Filtermaske

Der zur Impulsantwort gehörende Amplitudengang nach einer zweidimensionalen diskreten Fourier-Transformation lautet dann:

$$g(x, y) = e^{\left\{ -\pi \beta \left[\left(\frac{\lambda_{xc}}{\lambda_x} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_{yc}}{\lambda_y} \right)^2 \right] \right\}}. \quad (4.16)$$

Dabei sind λ_{xc} , λ_{yc} die Grenzwellenlängen in x - und y - Richtung und $\beta = \alpha^2 = \ln 2 / \pi$, um das Durchlassverhältnis des Filters von 50 % zu gewährleisten mit $\lambda_x = \lambda_{xc}$ bei $\lambda_y = \infty$ oder $\lambda_y = \lambda_{yc}$ bei $\lambda_x = \infty$.

Für die Filterung der kompletten Textur wird die Maske sukzessiv über alle Bildpositionen platziert und die Höhen in Abhängigkeit der gewichteten Summen der Nachbarhöhen manipuliert. Für diese Vorgehensweise existieren die beiden in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Möglichkeiten. Bei einer Filterung im Ortsraum wird mittels linearer Faltung [16] die Texturhöhenmatrix H mit der Filtermatrix $G(x, y)$ aus Gleichung (4.15) verknüpft:

$$H'(x, y) = G(x, y) * H(i, j) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} G(x - i, y - j) \cdot H(i, j). \quad (4.17)$$

Vorteil dieser Methodik ist, dass auf eine Transformation der Texturhöhenmatrix in den Frequenzraum und auf die anschließende Retransformation in den Ortsraum verzichtet werden kann. Die Filteroperation selbst ist jedoch aufwendiger, weshalb aufgrund der großen Texturdatenmengen und den damit verbundenen Rechenoperationen auf eine performante Implementierung des Filters geachtet werden muss. Alternativ kann der Filter vom Ortsraum in den Frequenzraum transformiert werden und ergibt dabei den in Gleichung (4.16) beschriebenen Amplitudengang. Im Frequenzraum wird die Faltung des Ortsraumes durch die einfache Multiplikation $G(x, y) \cdot H(i, j)$ gelöst, was den Rechenaufwand drastisch reduzieren kann. Für die Größe der vorliegenden Texturdaten hat sich die

ortsräumliche Implementierung in MATLAB®, bei der die Lösung der Faltungsoperation für finite Intervalle berechnet wird, als zweckmäßig erwiesen.

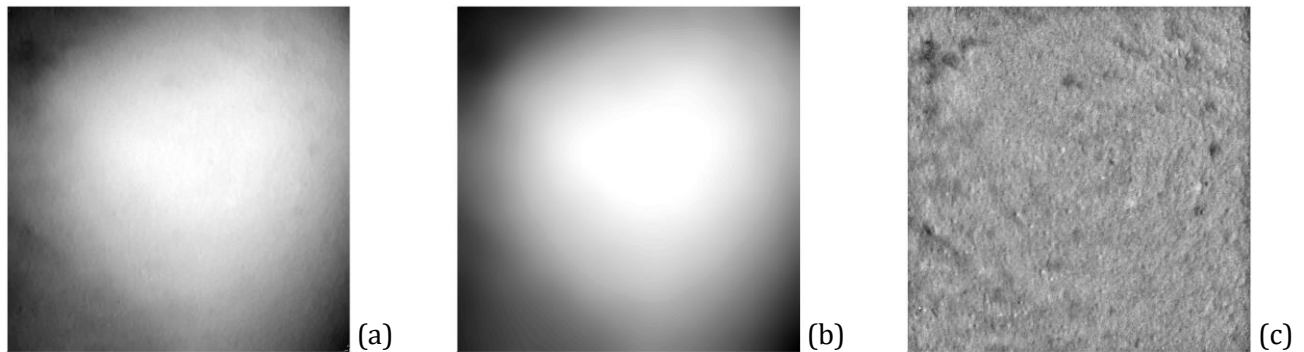


Abbildung 4.16: Textur (a) einer Kornoberfläche der Größe $5,12 \times 5,12 \text{ mm}^2$ nach Trennung in Welligkeit (Makrotextur) (b) und Rauheit (Mikrotextur) (c) mittels *GAUSS*-Filterung

Der *GAUSS*-Filter fungiert als Tiefpassfilter und überträgt lediglich Wellenlängen unter der Grenzwellenlänge. Bei einer zweckmäßigen Wahl der Grenzwellenlänge für die Filterung erhält man als Ergebnis die Makrotextur als die Welligkeit $H'_W(x, y)$ der ursprünglichen Textur. Die Höhenwerte der Mikrotextur - der Rauheitsmatrix $H'_R(x, y)$ - erhält man durch Subtraktion der Welligkeitswerte $H'_W(x, y)$ von der ursprünglichen Texturmatrix $H(x, y)$ (siehe Abbildung 4.16).

4.4 Parameterbildung zur Charakterisierung isotroper Texturen

4.4.1 Texturbetrachtung im Ortsraum

4.4.1.1 Flächenrauheitsparameter

In der Vergangenheit dominierten bei der Texturanalyse eindimensionale Verfahren, bei denen lediglich Profile einer Oberfläche weitergehend untersucht wurden. Erst mit der steigenden Leistungsfähigkeit von Computern und insbesondere mit der Verfügbarkeit von flächenhaft hochauflösenden optischen Messtechniken (siehe Kapitel 4.2) finden zweidimensionale Rauheitsparameter von Oberflächentexturen ihre Verwendung. So wurden die Flächenrauheitsparameter erstmals im Jahre 2005 standardisiert und erhielten 2008 mit der DIN EN ISO 25178-2 [26] ihre Fortschreibung. Hierin werden insgesamt drei Klassen von Flächenparametern unterschieden, die wiederum hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten aufgeteilt werden können [2]. Flächenhafte Rauheitsparameter werden mit S abgekürzt, während die Parameter von eindimensionalen Profilen mit R abgekürzt und äquivalent zu den folgenden Formeln lediglich über die Profillänge berechnet werden.

Zur Klasse der klassischen Höhenparameter gehört die mittlere arithmetische Texturhöhe

$$S_a = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} |h(x, y)| dx dy \quad (4.18)$$

mit der Texturgröße $L_x \cdot L_y$ sowie die mittlere quadratische Höhe der Textur

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} h^2(x, y) dx dy}. \quad (4.19)$$

$h(x, y)$ sind dabei die Höhenwerte der Texturhöhenmatrix. Die Parameter S_a und S_q - auch als Root Mean Square (RMS) bekannt - stellen lediglich ein grobes Maß für die Rauheit der Textur dar und können nicht zur Differenzierung von Spitzen, Tälern und Abständen der verschiedenen Texturmerkmale herangezogen werden. So ist es möglich, dass Oberflächen mit komplett unterschiedlichen räumlichen Eigenschaften nahezu gleiche mittlere (quadratische) Höhen besitzen [2,105]. Dennoch können die Parameter S_a und S_q verwendet werden, um signifikante Abweichungen in den Textureigenschaften zu unterscheiden.

Die Schiefe S_{sk} ist der Quotient der mittleren dritten Potenz der Texturhöhen und der dritten Potenz von S_q :

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left(\frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} h^3(x, y) dx dy \right). \quad (4.20)$$

Die Kurtosis S_{ku} wird nahezu identisch berechnet, lediglich der Grad der Potenz der Texturhöhen und S_q beträgt 4:

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left(\frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} h^4(x, y) dx dy \right). \quad (4.21)$$

Die Schiefe S_{sk} stellt den Symmetriegrad über die mittlere Ebene einer Textur dar und kann anhand des Vorzeichens den Nachweis erbringen, ob die Struktur der Oberfläche vorwiegend von Hügeln ($S_{sk} > 0$) oder Tälern ($S_{sk} < 0$) dominiert ist. Mit S_{ku} lässt sich die Existenz übermäßig hoher Hügel bzw. tiefer Täler nachweisen ($S_{ku} > 3$). Sind diese nicht vorhanden, beträgt $S_{ku} < 3$. S_{sk} kann daher zur Beurteilung von Poliereffekten der Gesteinsoberflächen herangezogen werden, während S_{ku} Defekte durch übermäßige Hügel oder Täler anzeigen kann. [2]

Einfachster Höhenparameter ist die maximale Texturhöhe S_z als Differenz aus der größten Spitzenhöhe S_p und der größten Senkenhöhe S_v der gesamten Texturfläche:

$$S_z = S_p - S_v = h_{max} - h_{min}. \quad (4.22)$$

Diese Extremwertparameter sind jedoch nicht repräsentativ, da die numerischen Werte von Textur zu Textur stark variieren können [105]. Sind jedoch einzelne Ausreißer nach oben oder nach unten ausgeschlossen, erhält man mit dem S_z -Wert einen ersten Anhaltspunkt über die größten Amplituden einer Textur, die wiederum Einfluss auf die Generierung des eindimensionalen Profils in der Reduktionsmethode (siehe Kapitel 6) und damit auf die dazugehörige Haftreibung durch die Simulation (siehe Kapitel 7) besitzt.

Der Klasse der Hybridparameter gehört der mittlere quadratische Gradient der Oberfläche an, der Texturamplituden und Abstände koppelt:

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \left[\left(\frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial h(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (4.23)$$

S_{dq} ist ein genereller Wert zur Abschätzung von Steigungen, die eine Oberfläche enthält und wird hauptsächlich zur Differenzierung von Texturen mit ähnlichem Mittenrauwert S_a verwendet. Eine Erweiterung von S_{dq} stellt

$$S_{dq6} = \frac{1}{(N-6)(M-6)} \sum_{K=3}^{N-3} \sum_{L=3}^{M-3} \Delta^2(x_k, y_l) \quad (4.24)$$

dar. S_{dq6} ähnelt S_{dq} , bezieht aber mehr benachbarte Texturhöhen in die Berechnung der Steigungen ein. Der Parameter S_{dr} zeigt das Verhältnis des Zuwachses der Übergangsfläche der Textur:

$$S_{dr} = \frac{1}{L_x L_y} \left[\int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \left(\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial h(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]} - 1 \right) dx dy \right]. \quad (4.25)$$

Mit Hilfe des S_{dr} -Wertes lassen sich Texturen mit ähnlichen Amplituden und Mittenrauwerten weiter unterscheiden. Unabhängig vom Mittenrauwert steigt S_{dr} mit zunehmender räumlicher Texturkomplexität und ist ebenfalls, sowohl von den Texturamplituden, als auch von der Distanz zwischen den Höhenwerten abhängig. Bei einer ebenen Oberfläche beträgt $S_{dr} = 0$.

Die Zehn-Punkt-Höhe S_{10z} einer Oberfläche ist die Summe des Mittelwertes der Höhen der fünf Spitzen mit der größten globalen Spitzenhöhe und des Mittelwertes der Höhen der fünf Senken mit der größten globalen Senkenhöhe:

$$S_{10z} = \frac{\sum_{k=1}^5 |Sp_i| + \sum_{k=1}^5 |Sv_i|}{5}. \quad (4.26)$$

Die Klasse der funktionalen Parameter leitet sich aus der flächenhaften Materialanteilkurve [20] als kumulative Häufigkeitsfunktion der Texturordinatenwerte ab. Die Materialanteilkurve ist auch als *ABBOTT-FIRESTONE*-Kurve bekannt. Aus dem Rauheitsprofil wird ein

Histogramm erstellt, welches eine Näherung der Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion der Amplitudenwerte der Textur darstellt. Aus dem Histogramm wird die Summenwahrscheinlichkeit gebildet, deren Kurve die Materialanteilkurve ergibt.

Der „Materialanteil“ ist ein Maß für die Tragfläche einer Textur, welche in Kontakt zu einer anderen Oberfläche steht. Je geringer die Neigung der Materialanteilkurve im Kernbereich ist, desto höher ist der Anteil des Materials gegenüber den Texturtälern und desto höher ist der Widerstand gegenüber einer mechanischen Belastung der Oberfläche, wie z. B. durch die Auflast beim Reifen-/Fahrbahnkontakt. Die Materialanteilkurve zeigt des Weiteren den prozentualen Anteil der maximal möglichen Kontaktfläche bei einer bestimmten relativen Texturtiefe, wobei der Materialanteil an der tiefsten Stelle der Textur 100 % beträgt (siehe Abbildung 4.17).

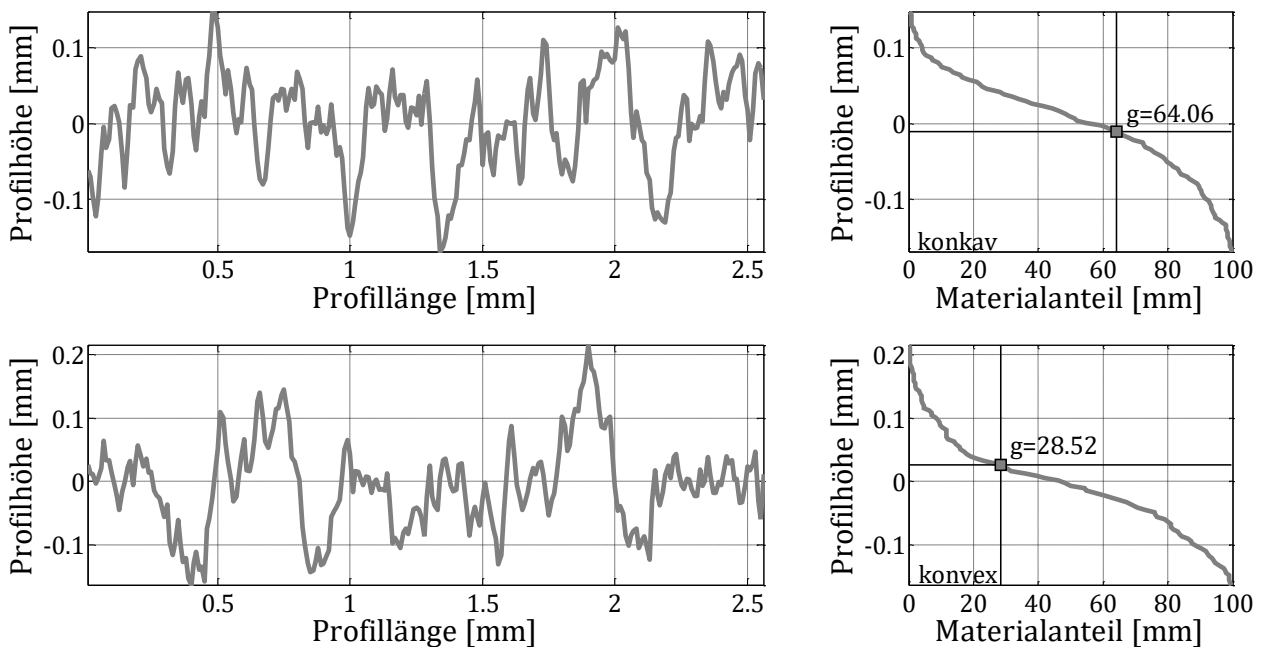


Abbildung 4.17: Exemplarische Materialanteilkurven zweier Profile mit konkaver (hoher Gestaltfaktor) und konvexer Gestalt (niedriger Gestaltfaktor) generiert aus Mikrotexurdaten

In der vorliegenden Arbeit, werden die funktionalen Rauheitsparameter nicht im Einzelnen betrachtet. Vielmehr werden die Parameter und ihr Aussagewert hinsichtlich der Griffbarkeit mithilfe der Gestalt einer Textur quantitativ beschrieben und zusammengefasst. So lässt sich aus der Materialanteilkurve nach [11] u. a. für die Betrachtung der akustischen Eigenschaften von Deckschichten der Gestaltfaktor g ableiten. Der Gestaltfaktor kann zur Definition der Form einer Textur herangezogen werden, indem der Materialanteil bei der halben maximalen Texturhöhe $S_z/2$ abgegriffen wird. Texturen gewalzter Deckschichten sind dabei tendenziell konkav geformt mit Gestaltfaktoren zwischen 60 % und 90 %, wogegen Texturen abgestreuter Deckschichten eher konvexe Gestalt mit Gestaltfaktoren

zwischen 20 % und 60 % besitzen (siehe Abbildung 4.17). Diese Definition bezieht sich im Wesentlichen auf Makrotexturen. Dieser Wellenlängenbereich ist für akustische Untersuchungen ausreichend; der Gestaltfaktor kann jedoch sinngemäß auf die Mikrotextur, also die kurzwelligen Anteile einer Textur, angewendet werden, wobei die Aussagekraft für die funktionale Eigenschaft Griffigkeit noch untersucht wird (siehe Kapitel 8.3). Daher werden von den gemessenen Texturen diverser Asphaltdeckschichten (siehe Kapitel 4.2) die Rauheitsausprägungen der Mikrotextur herausgefiltert (siehe Kapitel 4.3.3) und anschließend deren Gestaltfaktoren anhand der Materialanteilkurve ermittelt. Die aus diesen Texturen gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass bei Mikrotexturen vornehmlich konkave Texturgestalt dominierend ist.

In Untersuchungen zur Charakterisierung einer Textur im Straßenwesen, z. B. in [58], wird häufig auch der MPD-Wert (Mean Profil Depth) herangezogen. Er ist auch als mittlere Profiltiefe bekannt und wird innerhalb einer definierten Grundlinie als der Abstand zwischen der höchsten Profilschuppe und dem Mittelwert aller Profilhöhen gewonnen. Der MPD-Wert kann mithilfe der empirischen Umrechnungsvorschrift $ETD = 0,2 + 0,8 \cdot MPD$ in den ETD-Wert (Estimated Texture Depth) umgerechnet werden. Der ETD-Wert ist eine Näherung der nunmehr flächenhaften mittleren Texturtiefe und entspricht der Messmethode des Sandflächenverfahrens [61], auch als volumetrisches Verfahren bekannt, zur Beurteilung des Drainagevermögens von Fahrbahnoberflächen. [24,25]

Sowohl der MPD- als auch der ETD-Wert werden jedoch im weiteren Verlauf dieser Arbeit aus nachfolgenden Gründen nicht weiter betrachtet. Zum einen bezieht sich die mittlere Profiltiefe nach DIN ISO 13473 [24,25] lediglich auf die mittlere Tiefe der Makrotextur des Fahrbahnbelags und liefert keine Aussage über die Beschaffenheit der Mikrotextur der Fahrbahn. Zum anderen werden bei diesem Parameter lediglich einzelne Profile betrachtet. Dies steht dem Ziel der Arbeit entgegen, flächenhaft Mikrotexturen zu beurteilen. Es ist jedoch denkbar den MPD-Wert sinngemäß auch auf Mikrotexturen anzuwenden. Korrelationsuntersuchungen in [58] haben ergeben, dass mit einem Bestimmtheitsmaß von $r \approx 1$ Zusammenhänge mit dem bereits erwähnten Parameter S_q zu verzeichnen sind. Der MPD-Wert erfährt dadurch indirekt eine Mitbetrachtung bei der Herstellung von Zusammenhängen der Texturgeometrie und dem Haftreibungsniveau (siehe Kapitel 8.3).

4.4.1.2 Funktionale Ableitungen aus diskreten Texturdaten

Ergänzend zu den klassischen Flächenrauheitsparametern lassen sich aus der Textur mit ihren spezifischen Höhendaten $h(k, l)$ im äquidistanten Raster innerhalb eines Messfeldes zusätzliche Informationen ableiten. So werden beispielsweise in den Geowissenschaften Neigung, Exposition und Krümmung von Oberflächen mithilfe von Ableitungen ermittelt.

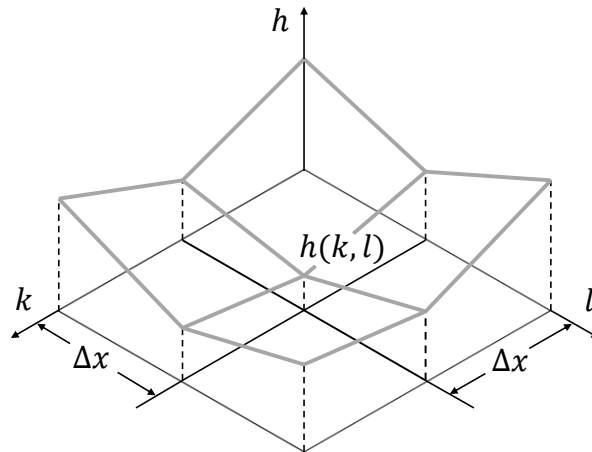


Abbildung 4.18: 3x3 Höhengsubmatrix nach [110]

Neigung

Zur Abschätzung von Hangneigungen führt *HORN* [55] ein Verfahren auf Basis von finiten Differenzen ein, das für die vorliegenden Texturen adaptiert wird. Ausgehend von einem diskreten Texturhöhenpunkt mit der Koordinate $h(k, l)$ (siehe Abbildung 4.18) werden anhand der Höhenpunkte in der 3×3 -Nachbarschaft jeweils in die lotrechten Richtungen k und l mit

$$m_{k,l} = \arctan \sqrt{(m_k)^2 + (m_l)^2} \quad (4.27)$$

der lokale Gradient berechnet, mit

$$m_k = \frac{(h(k+1,l+1)-h(k-1,l+1))+2(h(k+1,l)-h(k-1,l))+h(k+1,l-1)-h(k-1,l-1))}{8 \cdot \Delta x}, \quad (4.28)$$

$$m_l = \frac{(h(k-1,l+1)-h(k-1,l-1))+2(h(k,l+1)-h(k,l-1))+h(k+1,l+1)-h(k+1,l-1))}{8 \cdot \Delta x}. \quad (4.29)$$

Der Mittelwert aller lokalen Gradienten wird als weiterer Texturparameter für die nachfolgenden Betrachtungen herangezogen.

Exposition

Die Exposition ist definiert als die Richtung des steilsten Gefälles der Tangentialebene einer Oberfläche. Zur Berechnung der Exposition werden die Ableitungen in x - und y -Richtung entsprechend der Gleichungen (4.28) und (4.29) herangezogen:

$$Exposition = \arctan \left(\frac{m_k^2}{m_l^2} \right). \quad (4.30)$$

Je nachdem, ob die Ableitungen negativ, null oder positiv sind, wird die Expositionsermittlung noch von einer Fallunterscheidung nach [55] ergänzt.

Kurvatur

Als Kurvatur bezeichnet man die Krümmung einer Oberfläche an einem Punkt mit der Höhe h . Dabei wird in die Profilkurvatur (Krümmung in Richtung des steilsten Gefälles) und in die Plankurvatur (Krümmung in Richtung einer horizontal konstanten Höhe) unterschieden. In [110] wird eine numerische Berechnungsmethode der Kurvatur vorgestellt, die auf einem Polynom vierten Grades basiert, das die 9-Punkt-Nachbarschaft entsprechend Abbildung 4.18 beschreibt. $A-E$ stellen dabei die Koeffizienten des Polynoms dar. Da das komplette Polynom für die Berechnung nicht notwendig ist, wird an dieser Stelle auf die Darstellung verzichtet und stattdessen auf [110] verwiesen.

Die Ermittlung der Kurvaturwerte erfolgt mit

$$\text{Profilkurvatur} = \frac{-2(AD^2 + BE^2 + CDE)}{(D^2 + E^2)}, \quad (4.31)$$

$$\text{Plankurvatur} = \frac{-2(AE^2 + BD^2 + CDE)}{(D^2 + E^2)}, \quad (4.32)$$

wobei

$$A = \frac{\frac{h(k,l-1)+h(k,l+1)}{2} - h(k,l)}{L^2}, \quad (4.33)$$

$$B = \frac{\frac{h(k-1,l)+h(k+1,l)}{2} - h(k,l)}{L^2}, \quad (4.34)$$

$$C = \frac{-h(k-1,l-1)+h(k-1,l+1)+h(k+1,l-1)-h(k+1,l+1)}{L^4}, \quad (4.35)$$

$$D = \frac{-h(k,l-1)+h(k,l+1)}{2L}, \quad (4.36)$$

$$E = \frac{h(k-1,l)-h(k+1,l)}{2L}. \quad (4.37)$$

Konvexe Texturen zeichnen sich tendenziell durch negative Kurvaturwerte aus, während konkave Texturen eher positive Kurvaturwerte erzeugen. [4]

4.4.2 Texturbetrachtung im Frequenzraum

4.4.2.1 Spektrale Leistungsdichte und Autokorrelation

Neben der ortsräumlichen Betrachtung der Texturhöhen, können die Amplitudenwerte der Textur auch frequenzräumlich betrachtet werden, d. h. die scheinbar regellose Oberfläche einer Textur kann mathematisch als eine Addition zahlreicher Sinus-Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen und Amplituden beschrieben [71] und, wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, in einem Wellenlängenspektrum zusammengefasst werden (siehe

Abbildung 4.19). Die Zerlegung der Textur in Sinus-Wellen unterschiedlicher Frequenzen erfolgt auf Basis einer diskreten Fourier-Transformation (siehe Kapitel 4.3.1).

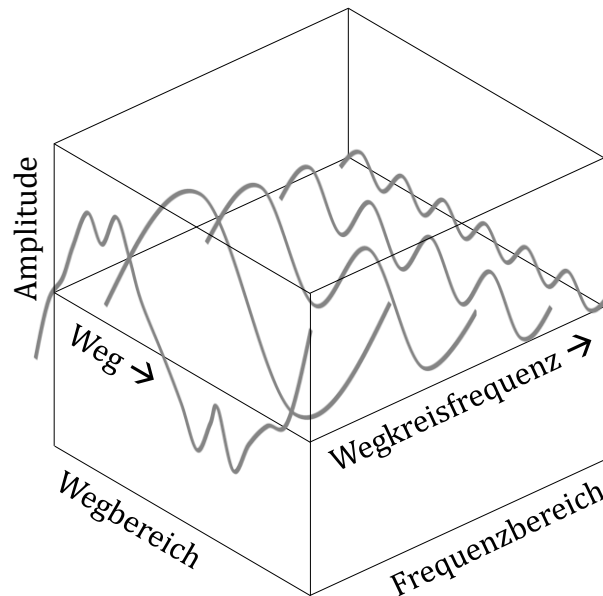


Abbildung 4.19: Überlagerung von Sinus-Wellen unterschiedlicher Wellenlängen und Amplituden zur frequenzräumlichen Betrachtung eines Profils nach [71]

Im Falle isotroper normalverteilter Texturausprägungen, die bei Asphaltdeckschichten in der Regel vorliegen, lassen sich für tribologische Problemstellungen Abhängigkeiten, z. B. zwischen der Verteilung der Höhen oder der Dichte von Oberflächenunebenheiten sowie den durchschnittlichen Steigungen und Krümmungen, beobachten [75]. Diese Abhängigkeiten sind hauptsächlich bestimmt vom Leistungsdichtespektrum $C_{2D}(\vec{q})$ der Oberflächentopografie und werden u. a. eingeführt in [46,83] als

$$C_{2D}(\vec{q}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \langle h(\vec{x})h(\vec{0}) \rangle e^{-i\vec{q}\cdot\vec{x}} d^2x. \quad (4.38)$$

Dabei bezeichnen $h(\vec{x})$ die Amplitudenwerte der Textur, ausgehend vom Mittelwert der Texturhöhen. Daraus folgt, dass $\langle h \rangle = 0$ ist, wobei $\langle \dots \rangle$ für eine Mittelung über ein statistisches Ensemble steht.

Unter der Annahme, dass die Texturhöhen invariant gegenüber einer Translation und isotrop sind, lässt sich die Oberfläche mit ihren kartesischen Höhenkoordinaten $h(x_1, y_1)$ alternativ mittels ihrer Autokorrelationsfunktion (AKF) durch

$$\lim_{L_1 \rightarrow \infty, L_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{4L_1L_2} \int_{-L_1}^{L_1} \int_{-L_2}^{L_2} h(x_1, y_1) \cdot h(x_1 + x, y_1 + y) dx_1 dy_1 \quad (4.39)$$

beschreiben. L_1 und L_2 entsprechen hierbei den Seitenlängen der zu betrachtenden Textur bzw. des aufgenommenen Messfeldes. $h(x, y)$ ist eine ebene Bezugsebene, die auf Zufallsvariablen basiert. Es ist erkennbar, dass für $(x, y) = 1$ die AKF der Varianz $\tilde{\sigma}^2$ der

Texturhöhen entspricht [75]. Dieser Zusammenhang wird zur Validierung der in Kapitel 6.2 folgenden Reduktionsmethodik verwendet. Nach dem *WIENER-CHINTSCHIN*-Theorem kann mittels Fourier-Transformation die AKF stochastischer Texturhöhen in das dazugehörige Leistungsdichtespektrum überführt werden, dessen Ergebnis dann wieder dem Ergebnis der Gleichung (4.38) entspricht [83]. Das bedeutet, dass mithilfe der Fourier-Transformierten die AKF in den Spektralraum überführt werden kann.

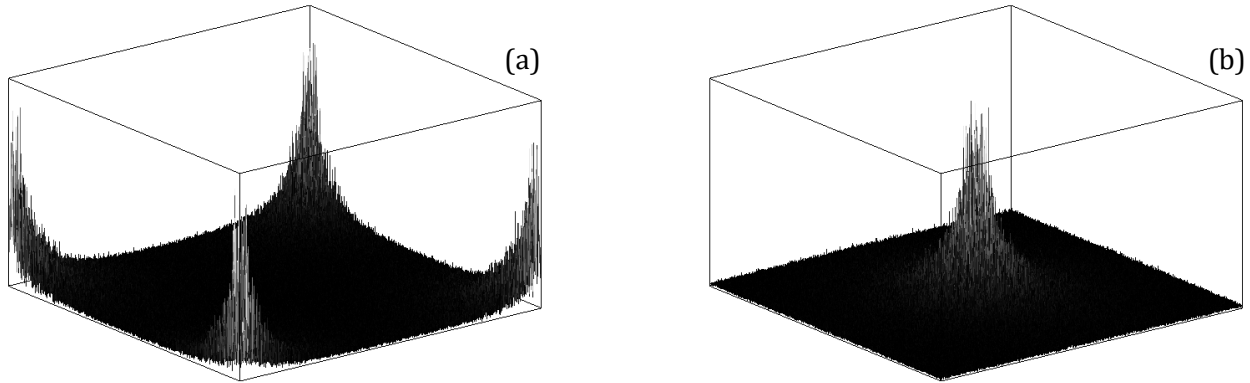


Abbildung 4.20: Zweidimensionale qualitative Darstellung des Leistungsdichtespektrum einer Mikrotexur; (a) zeigt das Ergebnis nach der Durchführung der 2D-DFT mit dem Ursprung in der Ecke (Bereich der niedrigen Frequenzen wiederholt sich aufgrund der Periodizität des Spektrums in allen Ecken), (b) zentrierte Ansicht der DFT durch paarweises Tauschen der vier Quadranten (hohe Wellenzahlen liegen nun im Zentrum) [16]

Bei dieser Vorgehensweise hängt das Leistungsspektrum $C_{2D}(\vec{q})$ lediglich vom Betrag des Wellenvektors \vec{q} ab [83]. Der Wellenvektor \vec{q} ist dabei für jede Oberfläche je nach vorliegendem Wellenlängenspektrum spezifisch. Er liegt zwischen einem langwelligen Abrollwellenvektor q_0 und einem kurzwelligen Grenzwellenvektor q_1 [79,83]. Der Wellenvektor entspricht der Wegkreisfrequenz der Textur und wird mittels $q = 2\pi/\lambda$ ermittelt, hängt also von der Texturwellenlänge λ ab, welche die laterale Abmessung von Amplitudenschwankungen einer Textur darstellt (siehe Kapitel 2.1.1). Dabei besitzt der Wellenvektor die definierten Grenzen (siehe Abbildung 4.21)

$$\frac{2\pi}{L} = q_L < \frac{2\pi}{\lambda_0} = q_0 < \frac{2\pi}{\Delta x} = q_1. \quad (4.40)$$

Der kleinstmögliche Wellenvektor ist bestimmt durch die Texturseitenlänge bzw. die Messfeldgröße L . Leicht zu spezifizieren ist auch der Abrollvektor q_0 , der sowohl bei flexiblen als auch bei starren Fahrbahndeckschichten $q_0 = 2\pi/\lambda_0$ der Ordnung 1000 m^{-1} beträgt. Dies entspricht in etwa der größten Siebweite $\lambda_0 \approx 1 \text{ cm}$ von Asphalt- oder Betonzusammensetzungen. Der größte Wellenvektor q_1 ist abhängig von Δx , dem Diskretisierungsabstand der Textur (Abstand der Gitterpunkte). Der Diskretisierungsabstand hängt bei optisch gemessenen Texturen von der lateralen Auflösung des Messgerätes ab (siehe

Kapitel 4.2.2), bei numerisch generierten Texturen mittels GripViewer kann Δx frei bestimmt werden (siehe Kapitel 5.2). [83]

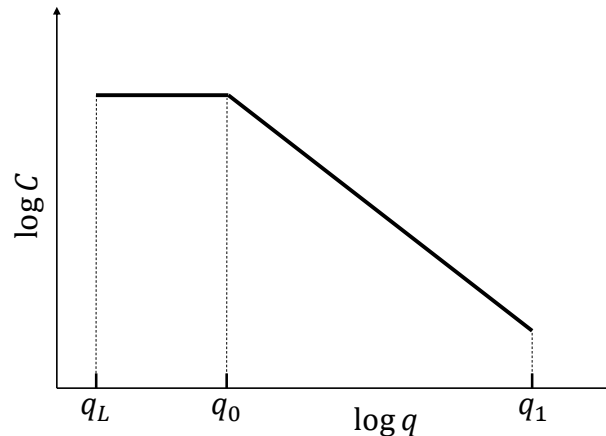


Abbildung 4.21: Qualitative Darstellung eines gemittelten zweidimensionalen Leistungsdichtespektrums der Textur einer Asphaltdeckschicht nach [83]

Zur Vermeidung von Diskontinuitäten im Randbereich der Textur durch Phasenverschiebungen bei der Durchführung der DFT werden vorab die Texturhöhen mittels einer zweidimensionalen Fensterfunktion multipliziert. Diese Bedingung wird in [63] eingeführt. Für die Fensterung wird das *TUKEY*-Fenster nach [51] verwendet, das sich dadurch auszeichnet, im Randbereich graduell gegen Null zu verlaufen und im Zentralbereich der Oberfläche konstant ist [63]. Dies ist dann der Fall, wenn der Parameter α_T , auf dem die Kosinus-Fensterfunktion basiert, gegen Null strebt. Dann stellt die Funktion eine Kosinusfunktion mit gekappter Spitze (siehe Abbildung 4.22) dar. Für $\alpha_T = 1$ entspricht die Funktion einem *HANN*-Fenster.

Die Anwendung der Fensterung führt allerdings zu einer leichten Datenglättung, die in einer Abnahme der Varianz im Leistungsdichtespektrum resultiert. Dieser Effekt wird jedoch in Kauf genommen, um Phasenverschiebungen zu vermeiden und dadurch eine kontinuierliche Datengrundlage zu erhalten.

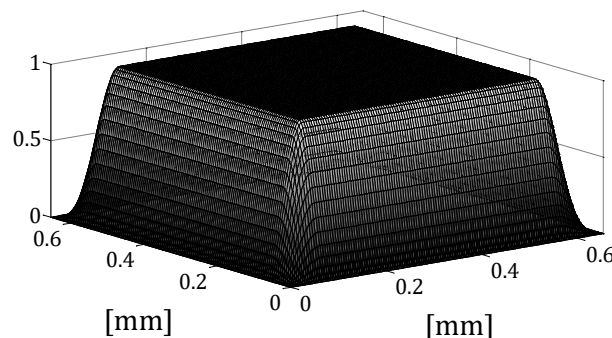


Abbildung 4.22: Darstellung der Funktion des verwendeten zweidimensionalen *TUKEY*-Fensters bei der Ermittlung der Leistungsspektren von Texturen mit $\alpha_T = 1$ nach [51]

Des Weiteren muss beachtet werden, dass sich aufgrund der Periodizität des Leistungsdichtespektrums einer Textur der Größe $N \times N$ die Frequenzen wiederholen (siehe Abbildung 4.20), weshalb das endgültige Leistungsspektrum lediglich über die Hälfte aller Perioden $N/2$ aufgetragen wird (siehe z. B. Abbildung 4.23). [63] Wird, wie im vorliegenden Fall, für die Ermittlung des Leistungsspektrums ein numerischer FFT-basierter Schätzer S mit den Fourierkoeffizienten K eingesetzt, ist das Leistungsspektrum lediglich für $N/2 + 1$ Frequenzen definiert:

$$S(0) = \frac{1}{N^2} |K_0|^2 \quad (4.41)$$

$$S(f_k) = \frac{1}{N^2} [|K_k|^2 + |K_{N-k}|^2] \quad (4.42)$$

$$S(f_c) = S(f_{N/2}) = \frac{1}{N^2} |K_{N/2}|^2, \quad (4.43)$$

wobei f_k lediglich für 0 und die positiven Frequenzen definiert ist:

$$f_k = 2f_c \frac{k}{N} \quad k = 0, \dots, N - 1. \quad (4.44)$$

Gleichung (4.42) liegt dabei in normierter Form vor, weshalb die Summe aller $N/2 + 1$ Werte von S den mittleren quadratischen Amplitudenwerten der Fourierkoeffizienten der Texturhöhenwerte entspricht. [89,108]

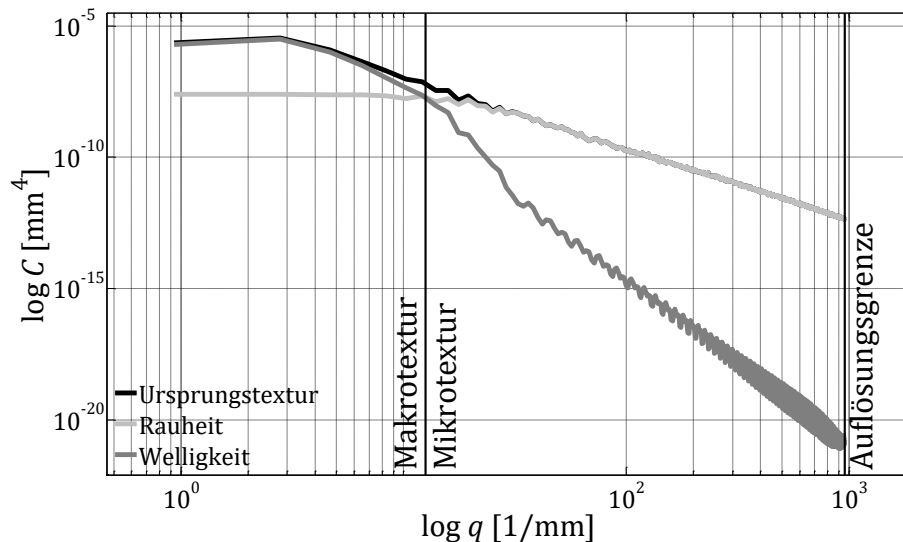


Abbildung 4.23: Leistungsdichtespektren der Textur einer Asphaltdeckschicht vor und nach der Trennung der makroskopischen und mikroskopischen Anteile

In der vorliegenden Arbeit wird die Methodik zur Berechnung des Leistungsspektrums verwendet, um zu überprüfen, ob die Trennung der Makrotextrur mit ihren langwelligen Texturanteilen und der Mikrotextrur mit ihren kurzwelligen Anteilen korrekt vollzogen wurde; d. h. hiermit kann validiert werden, ob die experimentell ermittelte Grenzwellenlänge $\lambda_{xc,yc}$, wie sie in Kapitel 4.3.3 eingeführt wird, korrekt gewählt wurde. Wenn dies der

Fall ist, liegt der Schnittpunkt der Spektren aus Makro- und Mikrotextur direkt auf der Wegkreisfrequenz $q = 2\pi/\lambda$ mit $\lambda = 0,5 \text{ mm}$, die per Definition u. a. in [25,104] die beiden Texturbereiche voneinander trennt (siehe Abbildung 4.23).

Auswertungen zahlreicher berechneter Leistungsspektren von gemessenen sowie numerisch erzeugten (künstlichen) Texturen (siehe Kapitel 5.2) und die dazugehörigen Spektren der Makro- und Mikroanteile haben ergeben, dass die Leistungsdichtespektren einer Textur, so wie in Abbildung 4.24 folgend, qualitativ dargestellt werden können.

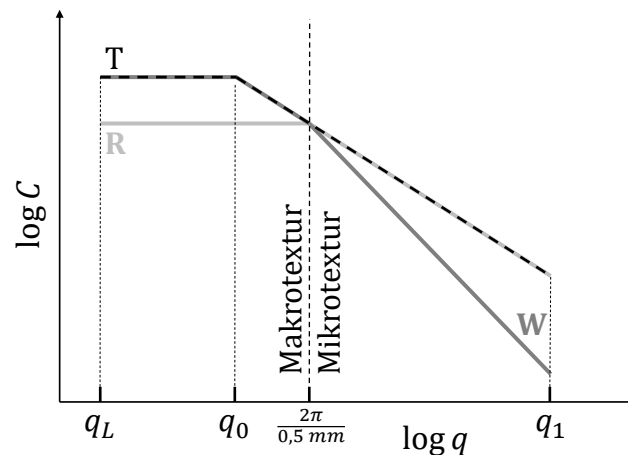


Abbildung 4.24: Qualitative Darstellung der Leistungsdichtespektren einer Textur (T) sowie den dazugehörigen Rauheits- (R) und Welligkeitsanteilen (W) nach der Trennung der Wellenlängenbereiche

4.4.2.2 Höhendifferenzkorrelation

Die Höhendifferenzkorrelation (HDK), auch als Variogramm bekannt, ist eine weitere Möglichkeit, Höhenpunkte einer Textur räumlich zu beschreiben [52]. Die HDK ermöglicht die Charakterisierung des räumlichen Zusammenhangs bzw. der Rauheit einer Textur mithilfe einer repräsentativen grafischen Darstellung und anhand diverser Deskriptoren [8]. Ein Vergleich von Rauheiten unterschiedlicher Texturhöhendatensätze lediglich auf Basis einfacher statistischer Kennwerte, wie sie in Kapitel 4.4.1.1 eingeführt werden, ist häufig nicht ausreichend. Dies liegt daran, dass diese Rauheitsparameter, insbesondere die Höhenparameter, oft die gleiche Größenordnung besitzen, obwohl die räumliche Verteilung der Texturhöhen stark unterschiedlich ist. Die Ermittlung der HDK, als Werkzeug der quantitativen deskriptiven Statistik, ermöglicht die Beschreibung der Struktur von Texturhöhenpunkten im Raum, die durch ihre Lage innerhalb des Messfelds ortsabhängig sind [52].

Die intrinsische Hypothese [6] der räumlichen Statistik lautet:

- Die Varianz zwischen zwei Höhenpunkten ist lediglich von der Distanz zwischen denselben und nicht von ihrem Ort abhängig,
- die Varianz ist konstant
- und die Messdaten dürfen keinen räumlichen Trend aufweisen (Mittelwert = 0).

Die HDK, die, basierend auf diskreten Messpunkten, auch als experimentelles Variogramm bezeichnet wird, ist definiert zu [52,62,98]

$$\Gamma_h(\lambda) = 2\gamma_h(\lambda) := \left\langle (z(x) - z(x + \lambda))^2 \right\rangle. \quad (4.45)$$

Eine HDK koppelt laterale Abstände λ_i zwischen allen Höhenpunkten einer zweidimensionalen Textur mit ihren quadratischen Höhendifferenzen Δh_i^2 . Dazu wird von jedem Höhenpunkt $H_{x,y}$ der Textur aus der laterale Abstand

$$\lambda_i = \sqrt{((x+i) - x)^2 + ((y+i) - y)^2} \quad (4.46)$$

zu allen anderen in der Texturmatrix enthaltenen Höhenpunkten berechnet [48]. Mehrfach vorkommende Abstandswerte werden eliminiert. Der auf diese Weise entstehende Betrag des Abstandsvektors wird zusammen mit den quadratischen Höhendifferenzen Δh_i^2 aufgetragen (siehe Abbildung 4.25), wobei gilt

$$\Delta h_i = z(x) - z(x + \lambda_i). \quad (4.47)$$

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der HDK und der dazugehörigen AKF. Ist in der empirischen HDK kein monotoner Anstieg, wie z. B. in Abbildung 4.25, zu verzeichnen, kann auch keine Autokorrelation der Textur nachgewiesen werden. Im Normalfall ist die HDK jedoch eine monoton wachsende Funktion.

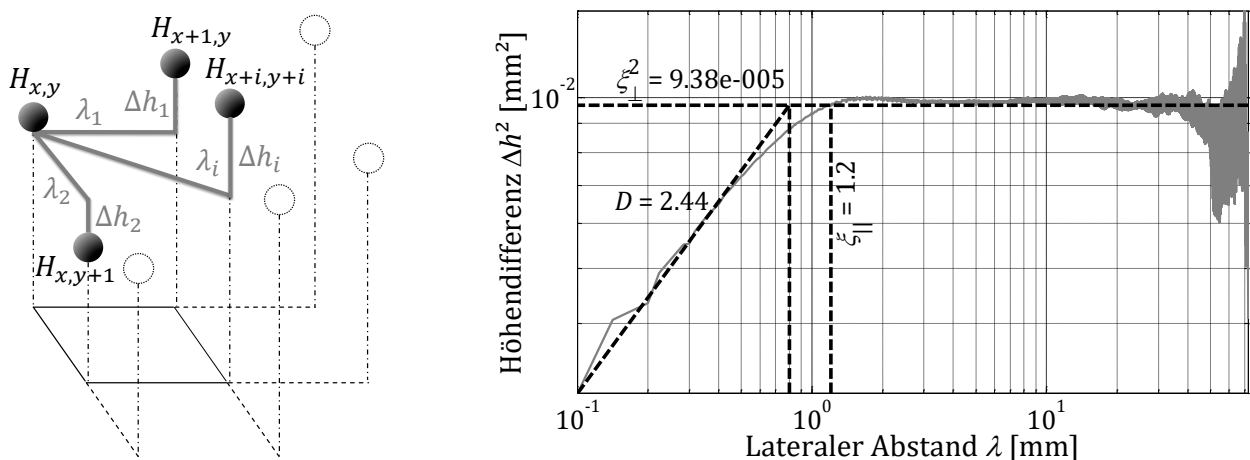


Abbildung 4.25: Prinzip zur Entwicklung des Algorithmus für die Berechnung der HDK (links) und exemplarische HDK einer Mikrotextrur mit abgeleiteten Deskriptoren (rechts)

Mit zunehmendem Abstand zwischen zwei Texturhöhenpunkten, nimmt auch die Varianz der Differenz der beiden Höhen zu. Dabei erreicht die HDK asymptotisch einen Schwellenwert (Sill), der der doppelten Varianz aller Texturhöhen ($\xi_{\perp}^2 = 2\tilde{\sigma}^2$) entspricht. Dies ermöglicht gleichzeitig eine simple Validierung der experimentellen HDK. [9,52,62] Die Aussageweite (Range) ξ_{\parallel} ist der Abstand, bei der die HDK ξ_{\perp}^2 erreicht. Über die Steigung der Ausgleichsgeraden zwischen dem Ursprung der HDK und $2/3 \xi_{\parallel}$ lässt sich der *HURST*-Exponent H berechnen, mit dessen Hilfe die fraktale Dimension D_f einer Textur bestimmt werden kann (siehe Kapitel 5.1). Jenseits der Aussageweite ξ_{\parallel} beträgt die Autokorrelation null (Korrelationslänge). [15]

In [62] wird ausgeführt, dass, entsprechend dem bereits in Kapitel 4.4.2.1 erwähnten *WIENER-CHINTSCHIN*-Theorem, mittels diskreter Fourier-Transformation die HDK in die spektrale Leistungsdichte $C(\vec{q})$ überführt werden kann:

$$\Gamma_h(\lambda) = \int_{q_0}^{\infty} C(\vec{q}) e^{i\vec{q}x} dx. \quad (4.48)$$

Dabei entspricht die kleinste in der Textur vorhandene Frequenz dem Reziprokwert von ξ_{\parallel} . Das Leistungsspektrum ist in diesem Fall definiert zu

$$C_{2D}(\vec{q}) = k \left(\frac{q}{q_0} \right)^{-\beta}, \quad (4.49)$$

wobei der Vorfaktor k Topothese genannt wird. Die Topothese ist eine Maß für die Rauheit einer Oberfläche und wird auf Grundlage der aus der HDK der Textur abgeleiteten Deskriptoren berechnet:

$$k = H \xi_{\perp}^2 \xi_{\parallel}. \quad (4.50)$$

Der Exponent $\beta = 2H + 1$ ermöglicht eine Beschreibung von selbstaffinen Texturen, deren Grundlagen und Verwendungsmöglichkeiten in Kapitel 5.1 detaillierter diskutiert werden. [62]

5 Modellierung der Texturgeometrie

Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt, sind der optischen Messtechnik bei der Aufnahme von großflächigen und hochaufgelösten Texturen technische Grenzen gesetzt. Die Simulation der Haftreibung und die Feststellung der Zusammenhänge von Texturparametern sowie dem dazugehörigen Griffigniveau setzen jedoch voraus, dass eine Vielzahl verschiedenartiger Texturen dem vorliegenden Verfahren zugeführt wird. Daher werden bei der vorliegenden Arbeit, neben der optischen Erfassung von Texturen, Verfahren eingesetzt, die es ermöglichen, mithilfe numerischer Verfahren künstliche Texturen zu generieren. Um die unendlichen Möglichkeiten dieser künstlichen Texturen etwas einzuschränken und, um eine möglichst realitätsnahe Datengrundlage zu erhalten, werden die geometrischen und statistischen Eigenschaften gemessener Texturen verwendet, um einen Rahmen bei der Erzeugung von Texturen zu bilden. Die numerische Generierung künstlicher Texturen ermöglicht eine einfache Variation einer Vielzahl von Texturen ohne messtechnischen Aufwand und vereinfacht somit das Verfahren hinsichtlich der Haftreibungssimulation. Zunächst wird jedoch auf die grundsätzliche Eigenschaft einer Vielzahl technischer Oberflächen, der Selbstaffinität, eingegangen, was für das grundlegende Verständnis dieser Arbeit essentiell ist.

5.1 Fraktale Geometriebetrachtung von selbstaffinen Asphaltoberflächen

Viele in der Natur und Technik vorkommende Oberflächen werden näherungsweise als stochastisch selbstaffin (oder auch selbstähnlich) angesehen [72]. Abbildung 5.1 zeigt am Beispiel eines Profils, dass sich bei selbstaffinen Oberflächen grobe Rauheitsmerkmale bei einer anisotropen vertikalen Transformation als feine Rauheitsmerkmale fortsetzen, während die statistischen Eigenschaften der Oberfläche, wie beispielsweise die Höhenverteilung, unverändert bleiben.

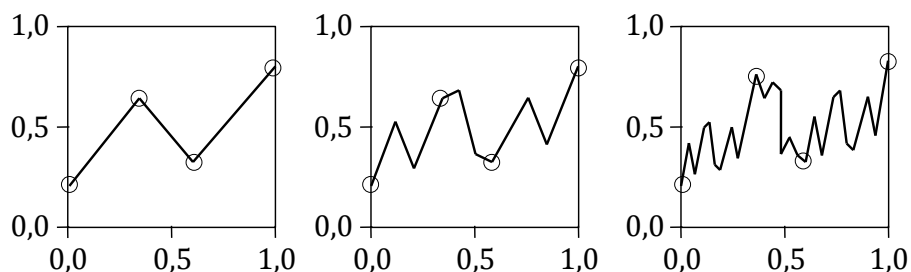


Abbildung 5.1: Rauheit eines selbstähnlichen Profils auf verschiedenen Längenskalen nach [26]

Selbstaffine Oberflächen besitzen eine fraktale Struktur, wobei man unter einem Fraktal eine Struktur versteht, die kein kleinstes Merkmal besitzt, sondern auf allen Skalen strukturelle Einzelheiten aufweist. u. a. [60,72,98] Keine reale Oberfläche kann sich jedoch über unendliche Wellenlängenbereiche hinweg selbstaffin verhalten, weil jede Oberfläche eine aus dem Herstellungsprozess der Oberfläche hervorgehende endliche Wellenlänge besitzt [105]. Bei einer Transformation ζ (siehe Abbildung 5.2) selbstaffiner Texturen gilt

$$x \rightarrow \zeta x, \quad y \rightarrow \zeta y, \quad z \rightarrow \zeta^H z, \quad (5.1)$$

wobei H der *HURST*-Exponent darstellt. Dieser steht über die Rechenvorschrift $D_f = 3 - H$ mit $0 < H < 1$ mit der fraktalen Dimension D_f in einem Zusammenhang. Je größer der Wert für H , desto ebener ist die Textur einzustufen. Umgekehrt lässt ein kleiner Wert für H auf eine zerklüftete, eher raue Oberflächenmorphologie schließen [48]. In [90] wurde nachgewiesen, dass sich innerhalb eines bestimmten Wellenlängenbereichs auch Texturen von Asphaltdeckschichten näherungsweise selbstaffin verhalten (siehe Kapitel 4.4.2.1). Für Asphaltoberflächen beträgt $D_f \approx 2,2 - 2,5$ [77].

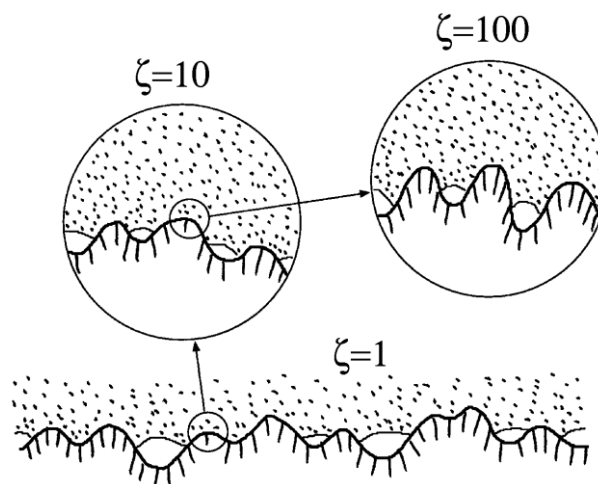


Abbildung 5.2: Ein Elastomer in Kontakt mit einer Textur; das Elastomer tritt auf allen Skalen in Kontakt mit der Textur. Eine unvergrößerte Betrachtung erweckt den Eindruck, dass alle makroskopischen Bereiche in Kontakt sind. Eine zunehmende Vergrößerung macht jedoch deutlich, dass in Wirklichkeit nur partiell Kontakt auftritt (siehe Kapitel 7.2.4) [80]

Das Leistungsdichtspektrum selbstaffiner Oberflächen lässt sich alternativ zu Gleichung (4.38) mithilfe des Exponenten H und der Topothese k (siehe Kapitel 4.4.2)

$$C_{2D}(\vec{q}) = k \left(\frac{q}{q_0} \right)^{-2(H+1)} \quad (5.2)$$

berechnen. u. a. [83,88] Die Ermittlung der fraktalen Dimension und des dazugehörigen *HURST*-Exponenten erfolgt in der vorliegenden Arbeit über die Steigung der HDK. Der selbstaffine Charakter einer Textur zeigt sich in vertikaler Richtung bis zum Schwellenwert

ξ_{\perp}^2 und in lateraler Richtung bis zur Aussageweite ξ_{\parallel} der HDK (siehe Kapitel 4.4.2.2). Nach [12,76] stellt sich zwischen der HDK von selbstaffinen Texturen und dem dazugehörigen *HURST*-Exponenten folgender Zusammenhang ein:

$$\Gamma_h(\lambda) = \xi_{\perp}^2 \left(\frac{\lambda}{\xi_{\parallel}} \right)^{2H} \quad \text{für } \lambda < \xi_{\parallel}. \quad (5.3)$$

5.2 Numerische Erzeugung von Mikrotexturgeometrien

5.2.1 Selbstaffine Texturen

Zur Generierung selbstaffiner Texturen, deren Hintergrund in Kapitel 5.1 eingehender untersucht wird, wird ein Verfahren verwendet, das im Bereich der Geophysik in [18] vorgestellt wird. Das Verfahren ermöglicht eine numerische Erzeugung sowohl von isotropen Texturen als auch von gerichteten anisotropen zweidimensionalen Texturen (siehe Kapitel 4.1) mit unterschiedlichen *HURST*-Exponenten H in den beiden lotrechten Richtungen einer Ebene.

Der künstlichen Erzeugung von Texturen liegt eine Methode zugrunde, die es ermöglicht Matrizen nachzubilden, die *GAUSS*sche Zufallsfelder Z unterschiedlicher Skalierung auf einem zweidimensionalen Gitter abbildet [18]. Hierbei sei E_H eine richtungsabhängige Matrix mit den Inversen von H . Dazu wird in [13] das Leistungsdichtespektrum eines *GAUSS*feldes definiert zu

$$\phi(x, y) = \rho(x, y)^{-2H - \text{Spur}(E_H)} \quad (5.4)$$

mit $\rho(x, y) = \sqrt{|x|^{2H_{\parallel}} + |y|^{2H_{\perp}}}$ als die zu den Eigenwerten von E gehörende Pseudonorm [18]. Nach [14] wird die richtungsabhängige Matrix E_H für beide lotrechte Richtungen einer Ebene erweitert, um mithilfe der Exponenten H_{\parallel} und H_{\perp} $\{H_{\parallel/\perp} \in \mathbb{R} \mid 0 < H_{\parallel/\perp} < 1\}$ die selbstaffinen Eigenschaften einer Oberfläche (siehe Kapitel 5.1) in x - und y -Richtung darzustellen:

$$E_H = \begin{pmatrix} 1/H_{\parallel} & 0 \\ 0 & 1/H_{\perp} \end{pmatrix}. \quad (5.5)$$

Dies ermöglicht neben der numerischen Erzeugung selbstaffiner isotroper Texturen, wie sie bei Asphaltdeckschichten (Makrotextur) oder Gesteinsoberflächen (Mikrotextur) auftreten, auch die Erzeugung anisotroper Strukturen, wie z. B. die Makrotextur einer Betonoberfläche mit ihrer gerichteten Oberflächenstruktur (siehe Kapitel 4.1, Abbildung 4.2). Bei isotropen Texturen gilt $H_{\parallel} = H_{\perp}$, im anisotropen Fall $H_{\parallel} \neq H_{\perp}$.

Aus den Gleichungen (5.4) und (5.5) folgt für das Leistungsdichtespektrum des Zufallszahlenfeldes:

$$\phi(x, y) = \rho(x, y)^{1+1/2H_{\parallel}+1/2H_{\perp}}. \quad (5.6)$$

Mittels Fourier-Transformation (siehe Kapitel 4.3.1) des GAUSSschen Zufallsfeldes werden nun die Fourierkoeffizienten ermittelt und mit ϕ normiert. Der Realteil der inversen Fourier-Transformation dieser Werte ergibt die künstlich erzeugte Texturhöhenmatrix. Die laterale Auflösung Δx , in diesem Fall der Abstand der Matrixgitterpunkte, sowie die Skalierung der Amplitudenwerte der Textur, können je nach Anforderung frei gewählt werden. Die Validierung dieser Methode zur numerischen Erzeugung von selbstaffinen Texturen erfolgt durch die Berechnung der dazugehörigen HDK und des daraus abgeleiteten Exponenten H . Dabei herrscht bei den untersuchten Texturen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem vorgegebenen Wert für H als Grundlage für die Texturerzeugung und dem Wert für H , der sich aus der Berechnung der HDK ergibt.

5.2.2 Zufällig verteilte Texturen

Als Input für eine erweiterte Untersuchung von Texturen mittels Haftreibungssimulation werden nach den in Kapitel 5.2.1 vorgestellten selbstaffinen Texturen auch zufällig raue Texturen (siehe Abbildung 5.3) nach [45] generiert. Sie besitzen im Gegensatz zu den selbstaffinen Texturen keinen fraktalen Charakter, der sich über mehrere Skalen hinweg fortsetzt, sondern lediglich zufällig verteilte Texturspitzen. Die Methode zur Erstellung solcher Texturen basiert auf dem Verfahren, das auch zur Reduktion einer Textur auf ein eindimensionales Profil für die Simulation in Kapitel 6.2 eingeführt wird.

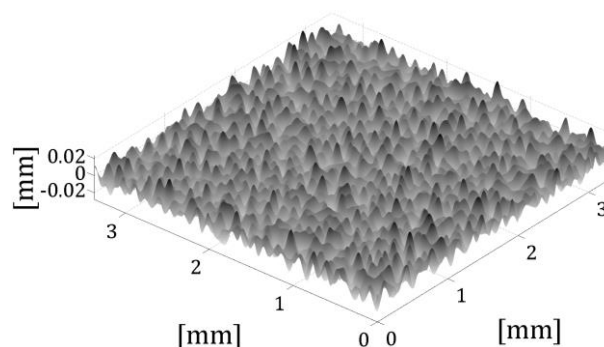


Abbildung 5.3: Beispiel einer numerisch erzeugten, zufällig rauhen Mikrotextrur im Wellenzahlbereich $[0,01 \ 0,4]$

Entsprechend Kapitel 5.2.1 werden an dieser Stelle Zufallszahlen $\phi(\vec{q}) = -\phi(\vec{q})$ generiert, die vom Wellenvektor \vec{q} (siehe Kapitel 4.4.2.1) abhängig und im Intervall $[0, 2\pi)$ gleichverteilt sind.

Die Texturhöhen werden dann berechnet zu

$$h(\vec{x}) = \sum_q B_{2D}(\vec{q}) e^{i(\vec{q} \cdot \vec{x} + \phi(\vec{q}))}, \quad (5.7)$$

wobei die Amplituden des Leistungsspektrums C_{2D} (siehe Gleichung (4.38)) mithilfe

$$B_{2D}(\vec{q}) = \frac{2\pi}{L} \sqrt{C_{2D}(\vec{q})} \quad (5.8)$$

berechnet werden. Die Länge L entspricht dabei der Anzahl der Gitterpunkte N . Im Gegensatz zur analytischen Lösung von Gleichung (5.7), ermöglicht eine schnelle Berechnung mittels inverser FFT (siehe Kapitel 4.3.1) einen deutlichen Zeitgewinn bei der Berechnung der künstlichen Textur, da lediglich der reelle Teil des komplexen Ergebnisses in das Ergebnis einfließt. [45]

6 Reduktion der Dimension des Kontaktproblems

Die Betrachtung des dreidimensionalen Kontaktfalls Reifen-Fahrbahn ist sehr komplex. Im tribologischen Sinn stellt dieser Fall das Kontaktproblem eines Elastomers auf rauer Oberfläche dar, was einen analytischen Ansatz rechentechnisch ineffizient macht. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie mithilfe einer Reduktionmethodik die Dimension des komplexen dreidimensionalen Systems auf ein eindimensionales System reduziert werden kann, ohne die kontaktmechanischen Eigenschaften des dreidimensionalen Systems zu verändern. Dazu wird definiert, welche Grundvoraussetzungen gelten müssen, um die elastischen Eigenschaften und die Trägheitseigenschaften auf ein eindimensionales tribologisches System übertragen zu können.

6.1 Eigenschaften des tribologischen Systems

Vier grundlegende Voraussetzungen müssen gelten, um ein komplexes dreidimensionales Kontaktproblem in ein vereinfachtes tribologisches System zu überführen. Diese basieren auf den Erkenntnissen von *POPOV* und *HESS* und werden im Folgenden zusammengefasst [54,87,88]. Der Einsatz dieser Methodik ist an die Gesetzmäßigkeit der trockenen Reibung gebunden, d. h. die Normalkraft sollte annähernd proportional zur Reibkraft sein (siehe Kapitel 3).

Quasistationarität

Das klassische Kontaktproblem Reifen-Fahrbahn spielt sich normalerweise in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis maximal 50 m/s ab. Dieser Bereich liegt somit weit unterhalb der Schallgeschwindigkeit. Vor diesem Hintergrund lässt sich das vorliegende Kontaktproblem als quasistatisch betrachten. *POPOV* geht davon aus, dass selbst bei instationären Gesamtsystemen für die Mikrokontakte, die in der vorliegenden Arbeit insbesondere betrachtet werden, quasistationäre Verhältnisse herrschen. Diese Voraussetzung ermöglicht die Anwendung von Gleichgewichtsbedingungen der statischen Kontaktmechanik zur Ermittlung von Deformationen.

Elastische Energie als lokale Eigenschaft

Die nominelle Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn ist in der Regel sehr viel kleiner als die reale Kontaktfläche. Dies liegt daran, dass sich die beiden Reibpartner lediglich in einzelnen Mikrokontakten berühren (siehe Kapitel 7.2.4). Einzelne Kontaktpunkte werden als unabhängig voneinander betrachtet, d. h. die potentielle Energie ist eine lokale Eigenschaft, die Kraft-Verschiebungsverhältnisse sind unabhängig von der Form oder Größe des Reifens und nur abhängig von der statistischen Konfiguration der Mikro-

kontakte der Textur. Diese Voraussetzung basiert auf den Erkenntnissen des in Kapitel 3.3.1 eingeführten *GREENWOOD* und *WILLIAMSON*-Modells.

Kinetische Energie als globale Eigenschaft

Anders verhält sich die kinetische Energie, die sich auf die Form und Größe des Reifens bezieht und somit keine Abhängigkeiten zu den Mikrokontakten aufweist. Dies bedeutet eine Entkopplung der Trägheitseigenschaften des dreidimensionalen Systems (Reifen) von dessen Kontakteigenschaften. Dadurch lassen sich Reibungskräfte als Oberflächenkräfte in die Systemdynamik des Reifens einleiten.

Reduktion der Dimensionalität von Kontaktproblemen

Für diese Bedingung wird vorausgesetzt, dass sich die dreidimensionale Kontaktsteifigkeit proportional zum Radius des Kontaktes verhält. Auf dieser Grundlage lässt sich der Kontakt eines dreidimensionalen rotationssymmetrischen Körpers mithilfe des Kontaktes eines eindimensionalen Schnittes mit halbem Krümmungsradius ersetzen. Die Größe des Krümmungsradius ist dabei unbedeutend. Unter Berücksichtigung dieser Bedingung lässt sich eine Analogie zur Ermittlung des Kontaktradius und der Belastung im Einzelkontakt nach der *HERTZ*schen Theorie (siehe Kapitel 3.1) herstellen. Identisch verhält es sich auch mit den tangentialen Steifigkeiten des dreidimensionalen Kontaktes. *POPOV* folgert daher, dass diese Bedingungen auch für zufällig raue Oberflächen gelten müssen und die kontaktmechanischen Eigenschaften dreidimensionaler Körper sich annähernd in eindimensionalen Systemen wiedergeben lassen.

6.2 Reduktionsmethodik

Die in [45–47,87] entwickelte Dimensionsreduktionsmethode und die Aufbereitung dieser in [66] bilden die Grundlage für die darauffolgende Haftreibungssimulation (siehe Kapitel 7). Des Weiteren werden in [88] die experimentellen und analytischen Grundlagen der Methode der Dimensionsreduktion und deren Möglichkeiten zur Erweiterung intensiv diskutiert.

Unter Einhaltung der in Kapitel 6.1 eingeführten Bedingungen, ermöglicht die Methode die Reduktion des komplexen dreidimensionalen Kontaktproblems Reifen-Fahrbahn in ein vereinfachtes eindimensionales Ersatzsystem, das die identischen Kontakteigenschaften aufweist, wie das dreidimensionale tribologische System.

Aufbauend auf den Erkenntnissen u. a. von *PERSSON* [77–79,83], wird in [45–47,87] vorausgesetzt, dass die Morphologie einer Oberfläche eindeutig durch ihr zweidimensionales Leistungsdichtespektrum $C_{2D}(\vec{q})$ beschrieben werden kann (siehe Kapitel 4.4.2.1).

Dadurch erfahren die Erkenntnisse des GW-Modells (siehe Kapitel 3.3.1) in der implementierten Methodik eine Berücksichtigung, da lediglich die Verteilung der Texturhöhen und nicht ihre exakte Lage bzw. Konfiguration berücksichtigt werden. Die Ermittlung des zwei-dimensionalen Leistungsspektrums erfolgt durch

$$C_{2D}(\vec{q}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \langle h(\vec{x})h(\vec{0}) \rangle e^{-i\vec{q}\cdot\vec{x}} d^2x \quad (6.1)$$

wobei gilt

$$C_{2D} = \begin{cases} c & \text{für } q_0 \leq q \leq q_1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (6.2)$$

$h(\vec{x})$ sind die optisch erfassten oder numerisch erzeugten Höhen der Texturgitterpunkte, ausgehend vom mittleren Texturhöheniveau, sodass $\langle h \rangle = 0$ ist. Unter der Voraussetzung, dass die Textur isotrop (siehe Kapitel 4.1) und invariant gegenüber Translation (siehe Kapitel 5.1) ist [83], lassen sich mittels

$$h(\vec{x}) = \sum_q B_{2D}(\vec{q}) e^{i(\vec{q}\cdot\vec{x} + \phi(\vec{q}))} \quad (6.3)$$

mit den Texturamplitudenwerten $B_{2D}(\vec{q})$ zu

$$B_{2D}(\vec{q}) = \sqrt{\frac{2\pi}{L} C_{2D}(\vec{q})} \quad (6.4)$$

die Texturhöhen aus dem Leistungsspektrum wiederherstellen. Dabei sind $\phi(\vec{q}) = -\phi(\vec{q})$ normalverteilte Zufallszahlen im Intervall $[0, 2\pi)$ (siehe Kapitel 5.2.2). Aus Gleichung (6.4) ist bereits erkennbar, dass die Fourier-Transformierte der Texturhöhen und die dazugehörigen Amplitudenwerte proportional zueinander sind. [45,87]

Weitere numerische Variationen in [83] ergeben daher für

$$C_{2D}(\vec{q}) = \frac{(2\pi)^2}{A} \langle |h_A(\vec{q})|^2 \rangle \quad (6.5)$$

mit A als Grundfläche der Textur und $h_A(\vec{q})$ als Integral für die Fourier-Transformierte der Texturhöhen $h(\vec{x})$, die als eine diskrete Summe mit $n_{x/y} = 1, 2, \dots, N$ approximiert werden kann:

$$h_A(q) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int h(\vec{x}) e^{-iqx} d^2x \approx \frac{\Delta x^2}{(2\pi)^2} \sum_n h_n e^{-i \frac{2\pi}{N(m_x n_x + m_y n_y)}}. \quad (6.6)$$

m_x und m_y beziehen sich dabei auf die Wellenlängenteile der Textur, die kleiner sind als die laterale Auflösung Δx der Texturhöhenmatrix. Weil jedoch die Auflösung Δx im Ortsraum endlich ist, können diese Anteile vernachlässigt werden. Daher gilt:

$$h_A(q) = \frac{\Delta x^2}{(2\pi)^2} H_m. \quad (6.7)$$

H_m ist das Ergebnis der zweidimensionalen DFT von h_n , das wiederum effizient mithilfe einer FFT (siehe Kapitel 4.3.1) ermittelt werden kann. Wie bereits in Kapitel 4.4.2.1 ausgeführt, wird zur Ermittlung des Leistungsspektrums mittels DFT eine Fensterung durchgeführt, um Diskontinuitäten im Randbereich der Textur durch Phasenverschiebungen zu vermeiden. Das so erzeugte zweidimensionale Leistungsspektrum lässt sich anschließend anhand der Umrechnungsvorschrift

$$C_{1D}(\vec{q}) = \pi \vec{q} C_{2D}(\vec{q}) \quad (6.8)$$

in ein eindimensionales Leistungsspektrum überführen, das dann die geforderte Äquivalenz der Kontakteigenschaften aufweist [45–47,87,88]. Entsprechend den obigen Ausführungen lassen sich dann die Profilhöhen aus dem eindimensionalen Leistungsdichtespektrum $C_{1D}(\vec{q})$ generieren:

$$h(\vec{x}) = \sum_q B_{1D}(\vec{q}) e^{i(\vec{q} \cdot \vec{x} + \phi(\vec{q}))}. \quad (6.9)$$

Dazu werden die ebenfalls im Intervall $[0, 2\pi)$ gleichverteilten Amplitudenwerte $B_{1D}(\vec{q})$ mittels inverser FFT in das äquivalente eindimensionale Höhenprofil retransformiert.

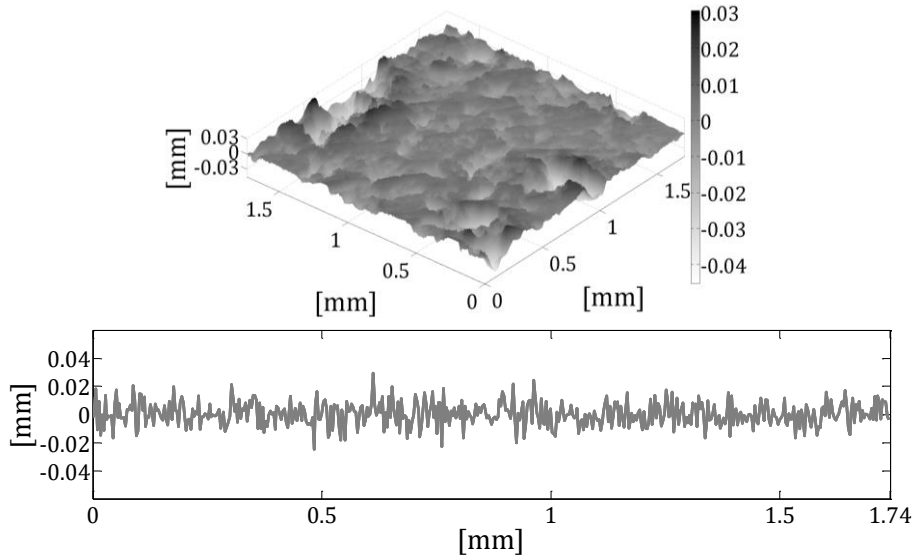


Abbildung 6.1: Zweidimensionale Mikrotextur der Größe $1,74 \times 1,74 \text{ mm}^2$ und einer lateralen Auflösung $\Delta x = 3,4 \text{ }\mu\text{m}$ (oben), dazugehöriges eindimensionales Profil nach Dimensionsreduktion (unten); die Länge des Profils entspricht der Seitenlänge der Textur, die quadratischen Mittenrauwerte betragen $\langle h^2 \rangle_{1D} = \langle h^2 \rangle_{2D} = 8,3 \text{ }\mu\text{m}$

6.3 Validierung der Reduktion

In [45] wird ermittelt, dass, ausgehend von einer Normalverteilung der Texturhöhen, die quadratischen Mittenrauwerte im ein- und zweidimensionalen Fall als charakteristisch gelten und zusammenfallen müssen. Zur Validierung der vorgestellten Reduktionsmethodik (siehe Kapitel 6.2) muss daher unter Einhaltung der Gleichung (6.8) die Bedingung $\langle h^2 \rangle_{1D} = \langle h^2 \rangle_{2D}$ gelten. Die quadratischen Mittenrauwerte können mithilfe des jeweiligen Leistungsspektrums ermittelt werden:

$$\langle h^2 \rangle_{1D} = \iint_{-\infty}^{\infty} C_{2D}(q) d^2q = 2\pi \int_0^{\infty} q C_{2D}(q) dq, \quad (6.10)$$

$$\langle h^2 \rangle_{2D} = \int_{-\infty}^{\infty} C_{1D}(q) dq = 2 \int_0^{\infty} C_{1D}(q) dq. \quad (6.11)$$

Daraus ist erkennbar, dass insbesondere die in einer Textur vorhandenen Amplituden für das Niveau der Haftreibung, das in der folgenden Simulationsroutine gewonnen wird, ausschlaggebend ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Validierung der Reduktionsmethodik wird in der Überprüfung der Wiederholgenauigkeit einer Reduktion und der darauf basierenden Haftreibungssimulation (siehe Kapitel 7) gesehen. Die Länge der in der vorliegenden Arbeit gewonnenen eindimensionalen Profile (siehe Kapitel 6.2) entsprechen der Seitenlänge der Ursprungstextur. Zudem wird die Bedingung $\langle h^2 \rangle_{1D} = \langle h^2 \rangle_{2D}$ eingehalten. Numerische Experimente in [45] ergaben jedoch, dass das eindimensionale System die gleiche Anzahl an Kappen besitzen sollte, wie die dreidimensionale Textur, um im kontaktmechanischen Sinne Äquivalenz zwischen dem Profil und der Textur herzustellen. Ein Profil dieser Länge konterkariert das Bestreben einer Vereinfachung des komplexen tribologischen Systems Reifen-Fahrbahn. Daher wird in [45] empfohlen, lediglich einen Teil des äquivalenten Profils zu verwenden und die in der Simulation berechneten Kräfte entsprechend zu skalieren.

Um zu prüfen, ob die Verwendung einer Profillänge, die einer Seitenlänge der dazugehörigen Textur entspricht, ausreichend ist, werden bei einer Vielzahl von Texturen jeweils 30 Reduktionen durchgeführt und auf dieser Basis Simulationen der Haftreibung mit unterschiedlichen Normalkräften (0,5 – 3,5 N) und Geschwindigkeiten (1 -50 m/s) durchgeführt. Mithilfe der ermittelten Konfidenzintervalle der simulierten Haftreibungskoeffizienten μ kann festgestellt werden, dass bei Simulationsgeschwindigkeiten bis 30 m/s unabhängig von der Normalkraft 20 Reduktionswiederholungen notwendig sind, damit 95 % aller μ -Werte in dem jeweiligen Vertrauensbereich liegen. Je geringer die Simulationsgeschwindigkeit, desto weniger Reduktionen sind notwendig.

Es gilt in weiterführenden Arbeiten zu überprüfen, inwieweit die Profillänge optimiert werden kann, damit weniger Reduktionen für die numerische Ermittlung eines statistisch verlässlichen Haftreibungskoeffizienten notwendig sein werden, ohne jedoch die Bedingung $\langle h^2 \rangle_{1D} = \langle h^2 \rangle_{2D}$ zu verletzen und die Rechenzeiten der in GripViewer implementierten Simulationsmethodik (siehe Kapitel 7) zu verlängern.

7 Tribosimulation des Reifen-/Fahrbahnkontaktes

Auf der Grundlage der Dimensionsreduktion der Textur im vorhergehenden Kapitel können die Randbedingungen eines eindimensionalen Ersatzmodells bestimmt werden. Dieses Ersatzmodell bildet den Rahmen der numerischen Haftreibungssimulation, die es ermöglichen soll, einen Zusammenhang des Haftreibungsniveaus zur geometrischen Gestalt der jeweilig betrachteten Textur herzustellen. In diesem Kapitel wird das verwendete dynamische Simulationsverfahren eingeführt. Mithilfe der detaillierten Beschreibung des Simulationsablaufs und dessen Implementierung in das Tool GripViewer wird auf die Ermittlung der einzelnen Kraftkomponenten eingegangen, die im komplexen tribologischen System Reifen-Fahrbahn maßgebend sind und schließlich in einem Haftreibungskoeffizienten münden, der letztendlich eine Beurteilung der Griffigkeit in Abhängigkeit der Texturparameter zulässt.

7.1 Eindimensionales Ersatzmodell

Das eindimensionale Ersatzmodell, das eine vereinfachte Simulation der Haftreibung ermöglichen soll, setzt sich aus dem in Kapitel 6 eingeführten reduzierten eindimensionalen Profil der gemessenen Textur und einem vereinfachten Profil für das Reifenelastomer zusammen (siehe Abbildung 7.1). Das Profil der starren Oberfläche besitzt die Höhen h_i und ist in lateraler Richtung über die Koordinate x_i diskretisiert.

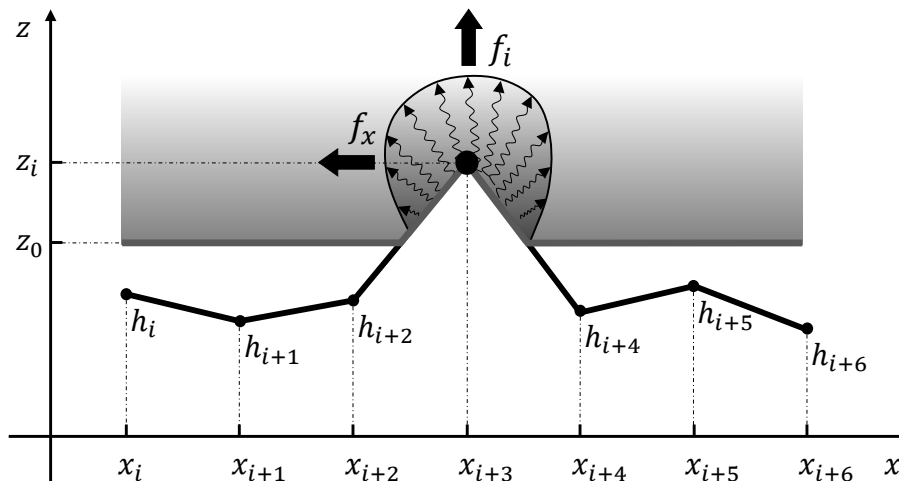


Abbildung 7.1: Vertikale und laterale Diskretisierung des eindimensionalen Ersatzmodells nach [87]

Bei der Reibung zwischen einem Elastomer und einer starren Oberfläche, wird der Rauheit des Elastomers nur ein kleiner Anteil beigemessen. Sie wird hauptsächlich durch die Rauheit der starren Oberfläche bestimmt (siehe Abbildung 7.2).

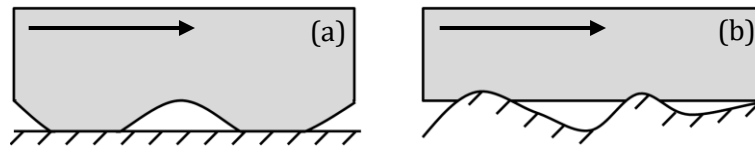


Abbildung 7.2: Raues Elastomerelement auf glatter starrer Oberfläche (a), glattes Elastomerelement auf rauher starrer Oberfläche (b) nach [87,88]

In [87,88] wird dazu aufgezeigt, dass beim Kontakt zwischen einer starren Oberfläche und einem Elastomer nur durch die Deformation des Elastomers Energie dissipiert wird. Betrachtet man einen gleitenden rauhen Gummiblock auf glatter starrer Ebene, wird man keine zeitliche Änderung des Deformationszustandes des Elastomers feststellen (a). Da dadurch keine Verlustleistung auftritt, ist die Reibung gleich null. Umgekehrt verhält es sich bei einem glatten Gummiblock auf einer rauhen starren Ebene (b). Der lokale Deformationszustand des Elastomers ist nun zeitabhängig. Energie wird dissipiert, Reibung ist vorhanden. Aus diesen Gründen wird für das eindimensionale Ersatzmodell der Reifen lediglich als ebenes Profil vereinfacht dargestellt. Werden die beiden Profile nun in gegenseitigen Kontakt gebracht, entsteht mit z_0 die Nulllinie des ungestörten Elastomers, während z_i die vertikale Koordinate im Falle eines Kontaktes im Punkt i darstellt. Auf dieser Grundlage wird im Folgenden beschrieben, wie für jeden Kontaktpunkt der Effekt der Hysterese (siehe Abbildung 7.1) mittels der Normalkraft- und Tangentialkraftkomponente numerisch approximiert werden kann.

7.2 Dynamische Simulation der Haftreibung

7.2.1 Normalkraftkomponente

Ausgehend von einer Interaktion der beiden Reibpartner ist die Reibgeschwindigkeit des Elastomers gegenüber der starren Oberfläche als die Simulationsgeschwindigkeit v definiert. Bewegt sich die starre Oberfläche nun mit der Geschwindigkeit v und der absoluten Anzahl der Zeitschritte n nach links, so gilt für jeden Diskretisierungspunkt

$$h_i(t_n) = h(i\Delta x + v n \Delta t) \quad (7.1)$$

mit der festen Bedingung $\Delta t = \Delta x/v$. Δx entspricht dabei dem Diskretisierungsabstand der Textur, der sich wiederum aus der lateralen Auflösung der Textur, die der Simulation zugrunde liegt, hervorgeht (siehe Kapitel 4). Die Eingangsgeschwindigkeit für die Simulation ist frei wählbar.

Treten die beiden Reibpartner nun in Kontakt, so wird das viskoelastische Material durch die starre Oberfläche verdrängt. Das bedeutet, dass am diskreten Höhenpunkt $z_i \leq h_i$ gilt. Die Verschiebung Δz_i berechnet sich dann zu $z_i - z_0$, wobei z_0 die Nulllinie des ungestörten

Elastomers darstellt (siehe Abbildung 7.1). Die induzierte Geschwindigkeit des Punktes ist $\Delta\dot{z}_i$. Daraus resultiert die auf einen Diskretisierungspunkt wirkende Normalkraft f_i in allgemeiner Form in Abhängigkeit des Schubmoduls G und der Viskosität η des dreidimensionalen Elastomers (siehe Kapitel 3.2):

$$f_i = 4G\Delta x\Delta z_i + 4\eta\Delta x\Delta\dot{z}_i. \quad (7.2)$$

Da der Haftreibungsanteil der Adhäsion (siehe Kapitel 2.1.2) im Modell nicht berücksichtigt wird, kann die Kraft f_i nicht negativ sein.

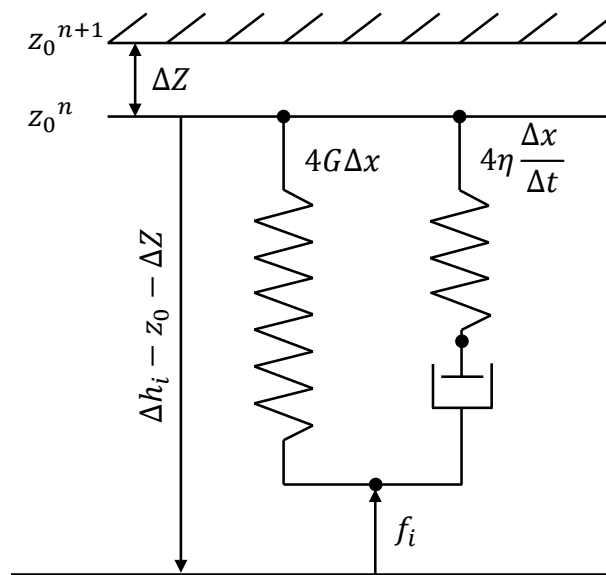


Abbildung 7.3: Rheologisches Modell eines Mikrokontaktpunktes nach [63]

Initialisierungsschritt

Im initialen Diskretisierungsschritt der Simulation treten die beiden Profile erstmals in Kontakt. z_0 beträgt dabei in etwa $2/3$ der maximalen Texturhöhe S_z (siehe Kapitel 4.4.1.1). Kontakt besteht dann an den Punkten, die der Bedingung $h_i \geq z_0$ genügen. Nach der Abfrage dieser Bedingung kann für die zutreffenden Punkte die wirkende Normalkraft $f_i = 4G(h_i - z_0)$ ermittelt werden. Die gesamte auf das viskoelastische Material wirkende Kraft ist dann

$$F = \sum_{\text{Kontakt-}} f_i = 4G\Delta x \sum_{\text{punkte}} (h_i - z_0). \quad (7.3)$$

Dabei ist anzumerken, dass die Normalkraft im Initialisierungsschritt lediglich aus dem Anteil in Abhängigkeit des Schubmoduls G besteht. Da noch keine laterale Bewegung stattgefunden hat, ist der zeitabhängige Viskoseanteil gleich 0.

Zeitschritte

Wie oben bereits erwähnt, gilt für einen Zeitschritt die Bedingung

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v}. \quad (7.4)$$

Nun wird in jedem Zeitschritt, für den das System jeweils um den Wert Δx lateral verschoben wird, die Bedingung $h_i(t_{n+1}) \geq z_i$ abgefragt. Somit können die Punkte, die neu in Kontakt treten, identifiziert werden. Die Kraft, die auf diese Punkte wirkt, wird mithilfe

$$f_i(t_{n+1}) = 4G\Delta x(h_i(t_{n+1}) - z_0) + \frac{4\eta\Delta x((h_i(t_{n+1}) - z_i(t_n)))}{\Delta t} \quad (7.5)$$

ermittelt. Da sich das System nun gegeneinander bewegt, setzt sich die Normalkraft neben dem Anteil aus Schubspannung auch aus dem zeitlich abhängigen Anteil aus der Elastomerviskosität zusammen. Nun wird angenommen, dass die Kontaktpunkte aus dem vorhergehenden Zeitschritt in Kontakt bleiben. Ihre Koordinaten wechseln somit von $z_i(t_n) = h_i(t_n)$ zu $z_i(t_{n+1}) = h_i(t_{n+1})$. Die nun wirkende Kraft wird ebenfalls mithilfe der Gleichung (7.5) ermittelt. Das Vorzeichen der Kraft drückt aus, ob der Punkt in Kontakt bleibt (+) oder, ob Kontaktverlust eintritt (-). Im zuletzt genannten Fall beträgt $f_i(t_{n+1}) = 0$.

Die neuen Koordinaten der Punkte ohne Kontakt können anhand der Dauer der Elastomerrelaxation berechnet werden. Die Gleichgewichtsbedingung lautet dann

$$G \cdot (z_i(t_n) - z_0) + \eta \frac{z_i(t_{n+1}) - z_i(t_n)}{\Delta t} = 0, \quad (7.6)$$

woraus

$$z_i(t_{n+1}) = z_i(t_n) - \frac{G}{\eta} \cdot \Delta t (z_i(t_n) - z_0) \quad (7.7)$$

folgt.

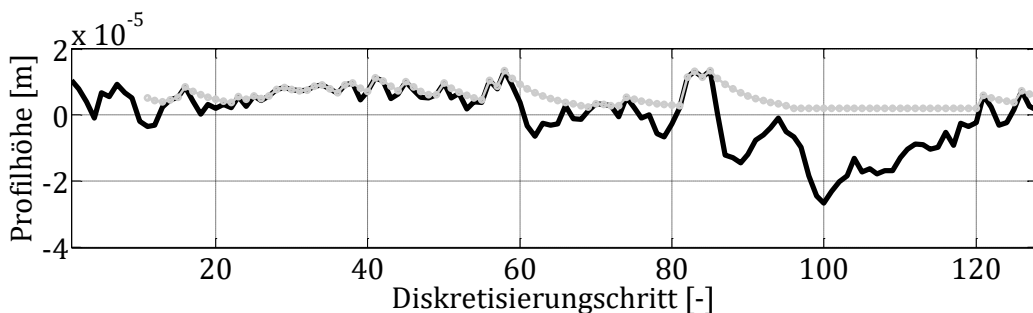


Abbildung 7.4: Exemplarischer Simulationsschritt; der Reifen (grau) gleitet nach links über die Textur (schwarz). In Abhängigkeit der Geschwindigkeit und der Materialparameter stellt sich ein „Nachzieheffekt“ (Hysterese) im Elastomer ein

Somit wird innerhalb der Simulation dem Effekt der Hysterese, der in Kapitel 2.1.2 eingeführt wird, Rechnung getragen. Hierbei spielt sowohl das Schubmodul G , als auch die Viskosität η eine Rolle. In Abhängigkeit der Geschwindigkeit relaxiert das Elastomer mehr oder weniger schnell in seinen Ausgangszustand, das entspricht in dieser Methode der Nulllinie z_0 , zurück. Dieser Effekt beeinflusst daher die Anzahl der Punkte, die mit der starren Unterlage in Kontakt treten und damit das Niveau der Haftreibung in großem Maße. (siehe Abbildung 7.4)

Die Gesamtkraft als Mittelung über alle Diskretisierungsschritte beträgt dann

$$F = \sum_i f_i(t_{n+1}) = \sum_i 4G\Delta x(h_i(t_{n+1}) - z_0) + \frac{4\eta\Delta x(h_i(t_{n+1}) - z_i(t_n))}{\Delta t}. \quad (7.8)$$

Diese Vorgehensweise impliziert jedoch, dass sich die Normalkraft nach jedem Zeitschritt verändert. Diese ist in Wirklichkeit aber konstant, wenn man keine dynamischen Radlasten annimmt und entspricht bei ebener Fläche der (anteiligen) Gewichtskraft. Deshalb wird in jedem Zeitschritt mithilfe der Verschiebung ΔZ die Nulllinie z_0 so verändert, dass die Gesamtnormalkraft $F_N = \text{const}$ ist. Die daraus resultierende Normalkraftkomponente ΔF ist gleich

$$\Delta F = -\Delta Z \sum_i \left(4G\Delta x + \frac{4\eta\Delta x}{\Delta t} \right) = -\Delta Z N \left(4G\Delta x + \frac{4\eta\Delta x}{\Delta t} \right) \quad (7.9)$$

mit N als die Anzahl der Kontaktpunkte innerhalb eines Zeitschrittes.

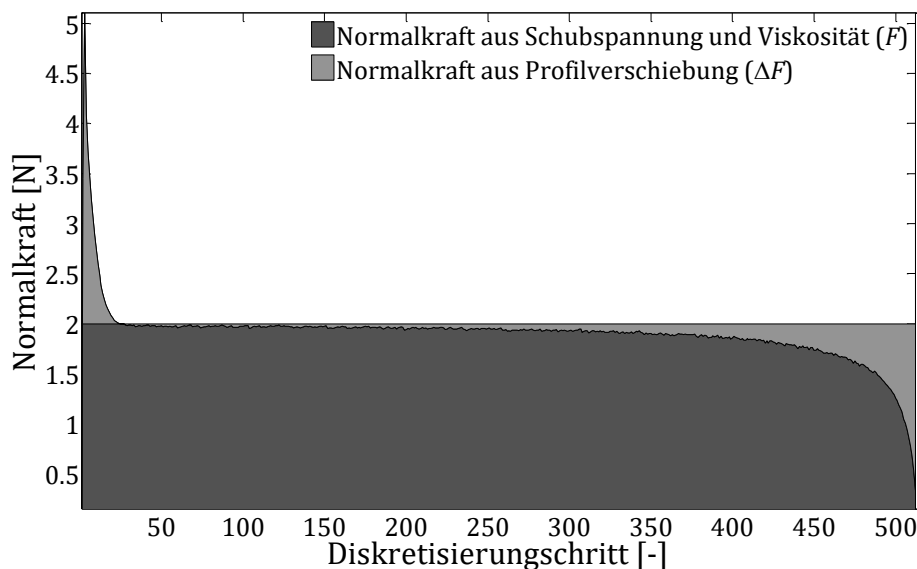


Abbildung 7.5: Typischer Verlauf der Normalkraftanteile aus Schubspannung und Viskosität sowie der Normalkraftanteile, die sich aus der Profilverschiebung ergeben; der Peak von ΔF zu Simulationsbeginn entsteht durch den Ausgleich beim Aufbau des „Nachzieheffekts“ der Hysterese; die Gesamtnormalkraft F_N bleibt konstant

Aus den Gleichungen (7.8) und (7.9) resultiert für die Berechnung der Gesamtnormalkraft

$$F_N = F + \Delta F = F - \Delta Z N \left(4G\Delta x + \frac{4\eta\Delta x}{\Delta t} \right). \quad (7.10)$$

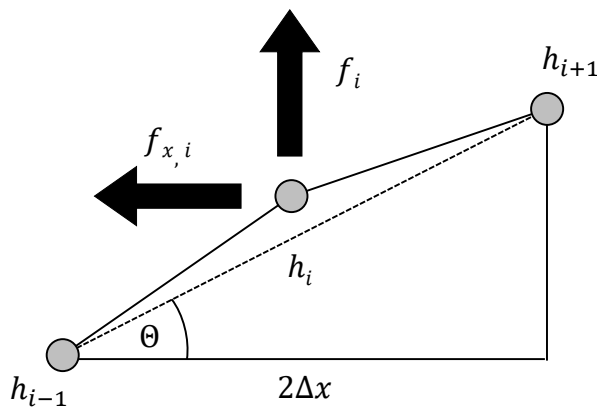
Die Verschiebung ΔZ kann nun berechnet werden, da F_N als Eingangsgröße für die Simulation frei wählbar ist. Der Wertebereich für F_N , der innerhalb der Simulation verwendet werden soll, richtet sich nach der betrachteten Textur. Je kleiner die laterale Auflösung und das betrachtete Messfeld, und je kleiner die mittleren Texturamplituden, desto kleiner muss F_N gewählt werden. Für die Berechnung der Verschiebung ΔZ gilt

$$\Delta Z = \frac{F - F_N}{N \left(4G\Delta x + \frac{4\eta\Delta x}{\Delta t} \right)}. \quad (7.11)$$

Vor diesem Hintergrund wird nach jedem Zeitschritt die Verschiebung ΔZ berechnet und im darauffolgenden Zeitschritt die Nulllinie entsprechend $z_0(t_{n+1}) = z_0(t_n) + \Delta Z$ korrigiert.

7.2.2 Tangentialkraftkomponente

Die für die Bestimmung des Haftreibungskoeffizienten benötigte Tangentialkraftkomponente wird ebenfalls für jeden Kontaktpunkt bestimmt. Diese ist abhängig von der Profilsteigung im jeweilig betrachteten Punkt. Die Profilsteigung wird mithilfe des Tangens des Winkels zwischen der Höhendifferenz der angrenzenden Profilpunkte h_{i-1} sowie h_{i+1} und des doppelten Diskretisierungsabstands Δx , wie Abbildung 7.6 zeigt, numerisch approximiert.



$$f_{x,i} = f_i \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2\Delta x} \quad (7.12)$$

Abbildung 7.6: Numerische Ermittlung der Tangentialkraft

Die Gesamtkraft F_x ergibt sich aus der Summe aller Tangentialkräfte $f_{x,i}$ an den jeweiligen Kontaktpunkten über alle Zeitschritte hinweg:

$$F_x = \sum_{\text{Kontakt-}} f_i \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2\Delta x}. \quad (7.13)$$

punkte

Je nachdem, wie sich die geometrischen Ausprägungen der Textur vor der Reduktion (siehe Kapitel 6) gestalten, werden im eindimensionalen Profil die Profilsteigungen, also die Kantenschärfe, über das Maß der vorhandenen Profilamplituden bestimmt. Durch Verwendung der Profilsteigungen innerhalb des Simulationsverfahrens wird die Kantenschärfe bei der Ermittlung des Haftreibungskoeffizienten berücksichtigt. Je steiler die Flanken der Texturspitzen sind, desto größer werden die darauf wirkenden Tangentialkräfte. Ist das Niveau der mittleren Tangentialkraft im Simulationslauf hoch, resultiert daraus ein höherer Haftreibungskoeffizient (siehe Kapitel 7.2.3). Dies bestätigt die Aussage vergleichbarer Arbeiten, u. a. [27,28,99], dass die Kantenschärfe, ausgedrückt durch die Gradienten der einzelnen Texturspitzen, als eines der entscheidenden Kriterien bei der Beurteilung der Griffigkeit von Texturen gilt. Bestätigt wird diese Aussage auch dadurch, dass Texturen mit höheren Texturparameterwerten, die die Oberflächensteigungen berücksichtigen, bei der Simulation höhere Haftreibungskoeffizienten erzielen (siehe Kapitel 8.3).

7.2.3 Haftreibungskoeffizient

Der resultierende Haftreibungskoeffizient μ_{SIM} ergibt sich aus dem Quotient der mittleren Tangentialkraft und der mittleren Normalkraft, wie sie in der Simulation ermittelt werden:

$$\mu_{SIM} = \left| \frac{F_x}{F_N} \right| \quad (7.14)$$

Es wird darauf hingewiesen, dass der mithilfe der Simulation ermittelte Haftreibungskoeffizient für die verwendete Simulationsmethodik und die damit simulierte Texturgröße spezifisch ist. Eine quantitative Vergleichbarkeit zu, z. B. unterschiedlich messtechnisch erfassten Haftreibungskoeffizienten (siehe Kapitel 2.3.1), gilt aufgrund der verschiedenen Randbedingungen zum jetzigen Stand als ausgeschlossen.

7.2.4 Effektive Kontaktfläche zwischen den Reibpartnern

In der Tribologie werden verschiedene Kontaktflächen unterschieden. Unter der nominalen Kontaktfläche A_0 wird die Berührfläche zweier Körper verstanden, die jeweils eine ideal glatte Oberfläche besitzen. In der Realität besitzen die Oberflächen von Körpern, wie

auch im Falle von Fahrbahndeckschichten, Abweichungen von dieser ideal glatten Oberfläche in Form von Texturrauhheiten auf unterschiedlichen Skalen (siehe Kapitel 2.1.1). Es kann daher kein gleichmäßiger Kontakt zwischen der Textur und dem Reifenelastomer eintreten und nur einzelne Texturbereiche können die Haftreibungskräfte auf die Reibpartner übertragen. Die Summe dieser Bereiche bildet die effektive bzw. reale Kontaktfläche A_{2D} . [64]

Abbildung 7.4 zeigt, dass der hier eingeführte Algorithmus der Haftreibungssimulation dieser Erkenntnis automatisch bis zur Untergrenze der Diskretisierungsauflösung Rechnung trägt. Daher lässt sich im Simulationsablauf die Kontaktfläche mithilfe der zusammenhängenden Kontaktlängen l_i des eindimensionalen Ersatzmodells berechnen:

$$A_{1D} = \frac{\pi}{4} \sum_i l_i^2. \quad (7.15)$$

Dabei nimmt die eindimensionale effektive Kontaktfläche A_{1D} mit der in der Simulation aufbrachten Normalkraft (siehe Kapitel 7.2.1) linear zu. Numerische Versuche haben gezeigt, dass die effektive Kontaktfläche A_{1D} der eindimensionalen Approximation nahezu mit der flächenhaften effektiven Kontaktfläche A_{2D} , die in Vergleichsrechnungen ermittelt wurden, übereinstimmt. [46,87]

Bei Vorliegen großflächiger Makrotexturen im Vorfeld der Haftreibungssimulation sind diejenigen Bereiche zu identifizieren, die makroskopisch tatsächlich mit dem Reifen in Kontakt treten und daher für eine mikroskopische Haftreibungssimulation geeignet sind. Für diesen Fall ist in GripViewer eine Funktion implementiert, die sich die statistischen Eigenschaften einer Textur anhand der Materialanteilkurve (siehe Kapitel 4.4.1.1) zu Nutze macht. (siehe Abbildung 7.7)

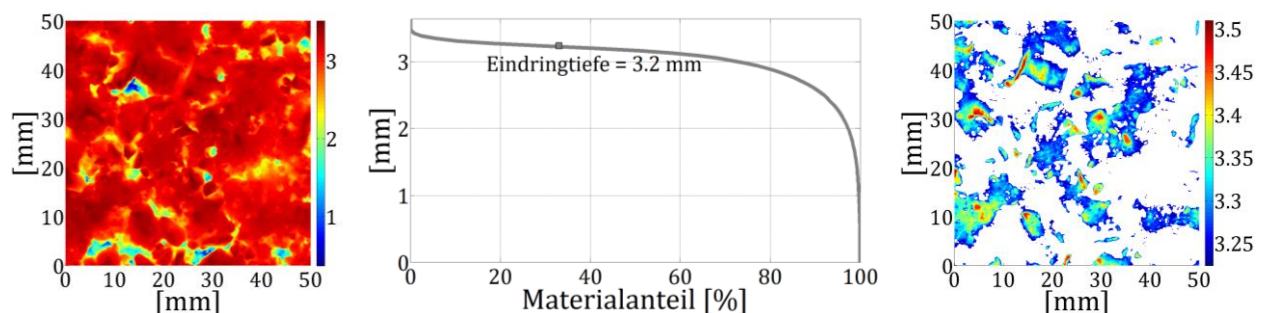


Abbildung 7.7: Ergebnis der messtechnischen Aufnahme einer $50 \times 50 \text{ mm}^2$ großen Textur (links); Eindringtiefe bei 33 % Materialanteil (Mitte); Texturbereiche in Kontakt mit dem Reifen nach Elimination der darunterliegenden Texturhöhen (rechts)

Dazu wurde in [99] mithilfe von Probekörpern unter quasistatischen Bedingungen und einer konstanten Normalkraft die Eindringtiefen eines Messgummis empirisch an einem

Prüfstand ermittelt. Basierend auf diesen Eindringtiefen wurde anhand der jeweiligen Materialanteilkurven der dazugehörige Materialanteil bestimmt. Eine Mittelung der Ergebnisse ergab einen durchschnittlichen Materialanteil von 33 %. Oberhalb dieser Grenze tritt der makroskopische Reifenkörper mit der Fahrbahn in Kontakt. Dieser Bereich macht durchschnittlich lediglich ca. 20 % der ganzen Texturfläche aus. Wie bereits ausgeführt, ist der Anteil der effektiven Kontaktfläche mikroskopisch betrachtet noch wesentlich kleiner (siehe Abbildung 5.2). Bereiche unterhalb eines Materialanteils von 33 % gehören dem Drainagebereich einer Textur an. Da diese Bereiche keine Polierbeanspruchung gegenüber der Mikrotextur besitzen, können sie für die Simulation eliminiert werden.

7.3 Validierung der Simulationsergebnisse

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden mit unterschiedlichem Erfolg zwei Wege eingeschlagen. Zum einen wurden Texturen künstlich so verändert, dass qualitativ eine Aussage darüber getroffen werden kann, wie sich der Haftreibungskoeffizient voraussichtlich verändern wird. Beispielsweise wurden bei Texturen feine Rauheitsanteile entsprechend Kapitel 4.3.3 schrittweise herausgefiltert, da es für diesen Fall als unbestritten gilt, dass dadurch der wirksame Haftreibungskoeffizient abnehmen muss. Aus dieser Vorgehensweise ist die im folgenden Kapitel beschriebene Parametervariation entstanden, die nunmehr nicht nur Zusammenhänge zwischen Texturparametern und dem Haftreibungsniveau zulässt, sondern auch eine qualitative Validierung der Ergebnisse aus der Simulation liefert. Weiterer Aufschluss über die Validität der Methodik ergibt sich daher aus Kapitel 8.

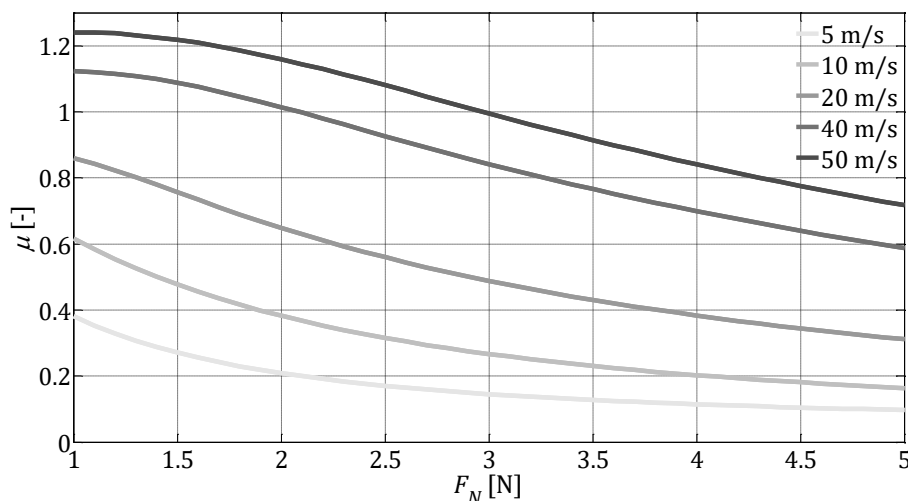


Abbildung 7.8: Zusammenhang des Haftreibungskoeffizienten μ mit der simulierten Gesamtnormalkraft F_N für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche

Ein zusätzliches Indiz für die Güte der Ergebnisse, die die Simulation der Haftreibung unter Berücksichtigung einer qualitativen Betrachtung liefert, ist der Zusammenhang zwischen der Normalkraft, die in den Simulationsablauf eingeht, und den daraus ermittelten Haftreibungskoeffizienten. Wie bereits in Kapitel 3.1 diskutiert, sollte der Haftreibungskoeffizient mit zunehmendem Kontaktdruck sinken. Die Auswertung der Simulationsergebnisse der in Kapitel 8 folgenden Parametervariation bestätigt in aller Regel diese Aussage (siehe Abbildung 7.8). Lediglich im Bereich sehr geringer Normkraftbelastungen ist tendenziell ein Anstieg der Koeffizienten zu verzeichnen. Dies lässt sich damit begründen, dass der Berechnungsalgorithmus des simulierten eindimensionalen Ersatzsystems (siehe Kapitel 7.2) bei ausgesprochen niedrigen Belastungen mehrere Diskretisierungsschritte benötigt, bis stabile Ergebnisse erzielt werden.

Zum anderen ist in Ergänzung der Parametervariation der Versuch unternommen worden, mittels definierten Sandpapieren unterschiedlichster Körnungen Korrelationen zwischen den numerischen Simulationsergebnissen und dem mittels SRT-Pendelgerät (siehe Kapitel 2.3.1.1) gemessenen Haftreibungsniveau herzustellen. Da in der vorliegenden Arbeit lediglich Mikrot Texturen betrachtet werden, wurden daher Sandpapiere verschiedener Feinstkörnungen ausgewählt (siehe Anhang A) und dem Simulationsverfahren samt vorgelagerter optisch hochaufgelöster Aufnahme, Datenvorverarbeitung und Dimensionsreduktion zugeführt. Als Ergebnis wurden die jeweiligen Haftreibungskoeffizienten bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h simulativ ermittelt. Diese Geschwindigkeit wird bei der SRT-Messung vom durchschwingenden Pendel erreicht [39]. Parallel dazu wurden die Sandpapiere auf Holzplatten verklebt und der Versuch unternommen, den dazugehörigen SRT-Wert zu ermitteln. Die in [39] vorgeschriebene Wiederholgenauigkeit bei mehreren Pendeldurchgängen konnte jedoch aufgrund der stark abrasiven Wirkung der Sandpapiere auf den Gummigleitkörper nicht eingehalten werden. Dies führte zu einer Abnahme des dazugehörigen SRT-Wertes bei jedem Pendeldurchgang. Obwohl qualitative Tendenzen zu einer Korrelation zwischen dem SRT-Wert des jeweils ersten Pendeldurchganges und dem numerisch bestimmten Haftreibungskoeffizienten zu verzeichnen waren, wird aufgrund mangelnder, statistisch verlässlicher Basis von dieser Vorgehensweise zur Validierung Abstand genommen.

8 Parametervariation und die Auswirkungen auf das Haftreibungsniveau

In Kapitel 7 wird detailliert die Methodik der numerischen Haftreibungssimulation beschrieben. Aufbauend darauf, zeigt Kapitel 8 mittels einer Parameterstudie einige Anwendungsfälle für die eingeführte Simulationsmethodik und einen diesbezüglichen Vergleich der Simulationsergebnisse untereinander. Im vorliegenden Kapitel wird daher exemplarisch anhand einer Textur dargestellt, welche qualitativen Ergebnisse die Haftreibungssimulation liefert. Insbesondere wird darauf eingegangen, inwieweit Texturen vergleichend betrachtet werden können, indem die Geometrie dieser Textur definiert künstlich variiert wird und anschließend die Simulationsergebnisse analysiert werden. Das Ergebnis dieser Variationsanalyse wird verwendet, um mithilfe einer Regressionsanalyse Rückschlüsse auf die Zusammenhänge zwischen den simulativ ermittelten Haftreibungskoeffizienten und den dazugehörigen geometrischen bzw. statistischen Texturparametern zu ziehen.

8.1 Randbedingungen der Variationsanalyse

8.1.1 Allgemeines

Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von großflächigen Mikrotexturdaten (siehe Kapitel 4.2) und eines Reibprüfstands für vergleichende Versuche ist eine direkte Validierung der in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Simulationsmethodik (siehe Kapitel 7) momentan nicht möglich. Um trotz dieser Umstände eine Abschätzung der Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse zu erhalten, wird im Folgenden anhand einer exemplarischen Mikrotextur (siehe Kapitel 8.1.2) eine Parametervariation durchgeführt und im Anschluss daran die Ergebnisse der Variationen hinsichtlich des Haftreibungsniveaus analysiert. Dies bedeutet, dass die geometrischen Parameter der Textur schrittweise eine gezielte Veränderung erfahren (siehe Kapitel 8.1.3) und im Anschluss jeweils unter identischen Randbedingungen hinsichtlich Texturgröße, Belastung, Geschwindigkeit und Elastomereigenschaften der Haftreibungssimulation zugeführt werden.

Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass auf diese Weise eine übersichtliche Gestaltung der Darstellungen von Simulationsergebnissen und der Vergleich untereinander, um eine Aussage über die Zusammenhänge zwischen der Texturgeometrie und der ermittelten Haftreibungskoeffizienten treffen zu können, ermöglicht wird. Aufgrund der großen Datenmengen, die bei Texturhöhenmatrizen anfallen (siehe Kapitel 4.2.3), ist dies normalerweise nur in bedingtem Maße möglich. Des Weiteren gilt es anzumerken, dass alle im Rahmen der Parametervariation erlangten Erkenntnisse durch parallele Vergleichssimulationen auf

Grundlage alternativer Mikrotexturen in ihrer qualitativen Aussage bestätigt werden können.

8.1.2 Beschreibung der verwendeten Mikrotextur

Im Fokus der durchgeführten Variationsanalyse steht eine Textur, die aus dem Probekörper einer Deckschicht in Splittmastixasphalt-Bauweise gewonnen wurde. Der Probekörper wurde der österreichischen Autobahn A 21, der Wiener Außenring-Autobahn, entnommen. Auf einem Messfeld der Größe $6,76 \times 6,76 \text{ mm}^2$ (siehe Abbildung 8.1) wurden die dazugehörigen Texturhöhen mittels eines Doppeltriangulationslasers mit einer lateralen Auflösung von $6,6 \mu\text{m}$ detektiert (siehe Kapitel 4.2.1). Somit ist gewährleistet, dass ein umfassender Anteil der Mikrotextur abgedeckt ist (siehe Kapitel 4.2.2). Die dazugehörige Texturhöhenmatrix besitzt auf dieser Grundlage bereits über 1 Mio. Einträge.

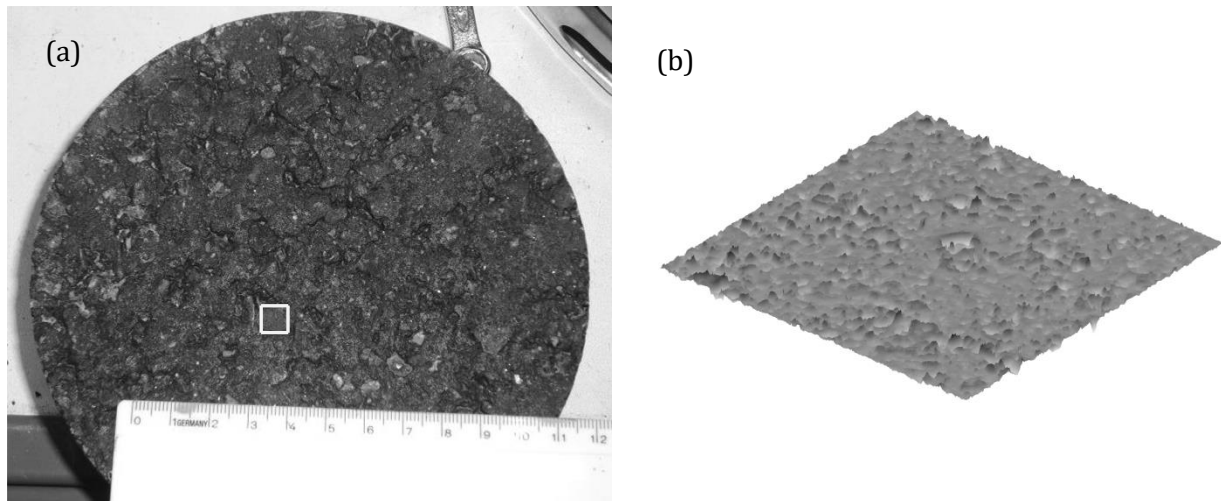


Abbildung 8.1: Für die Variationsanalyse verwendeter Probekörper (Splittmastixasphalt) mit Darstellung des Messfeldes (a), dazugehörige Mikrotexturdaten (Messfeldgröße $6,76 \times 6,76 \text{ mm}^2$) (b)

Höhenparameter		Hybridparameter		Fraktale Parameter		Erweiterte Parameter	
S_a [m]	$9,284e^{-06}$	S_{dq} [m/m]	0,713	D [-]	2,433	Gradient [-]	0,318
S_q [m]	$1,341e^{-05}$	S_{dq6} [m/m]	0,644	ξ_{\perp}^2 [m ²]	$1,897e^{-05}$	Exposition [-]	360,185
S_{sk} [-]	-0,373	S_{dr} [%]	0,204	ξ_{\parallel} [m]	$1,545e^{-04}$	Profil-kurvatur [-]	-342,181
S_{ku} [-]	5,971	S_{Ioz} [m]	$1,796e^{-04}$	k [-]	$1,662e^{-09}$	Plan-kurvatur [-]	419,415
S_z [m]	$1,831e^{-04}$					g [-]	89,634

Tabelle 8.1: Übersicht über die statistischen bzw. geometrischen Parameter der in der Analyse verwendeten Mikrotextur

Im Anschluss an die Messung erfolgte entsprechend des in Kapitel 4.3 vorgestellten Datenverarbeitungsprozesses die Aufbereitung der Texturhöhenmatrix. Die von der nun vorliegenden Mikrotextrur abgeleiteten Parameter zur Charakterisierung der Textur (siehe Kapitel 4.4) sind der Tabelle 8.1 zu entnehmen.

8.1.3 Festlegung der Variationsfaktoren

Es existieren prinzipiell zwei Möglichkeiten, um die geometrischen Eigenschaften der in Kapitel 8.1.2 vorgestellten Mikrotextrur künstlich auf definierte Weise zu variieren. Zum einen lassen sich die Wellenlängenanteile der verwendeten Textur durch Filterverfahren regulieren. Zum anderen können mithilfe von konstanten Faktoren die Amplitudenwerte der Texturhöhenmatrix verändert werden. Auf dieser Grundlage gehen insgesamt vier Variationen in die Untersuchung ein, die jeweils in zwölf Schritten durchgeführt wird. Die Veränderungen der Texturparameter, die sich aus dieser Vorgehensweise gegenüber den Parametern der Tabelle 8.1 ergeben, sind in Anlage B als Intervall dargestellt. Aufgrund einer besseren Übersichtlichkeit sind die geometrischen Auswirkungen der Variationen in den folgenden beiden Abbildungen jeweils als Profile (Texturschnitte) dargestellt.

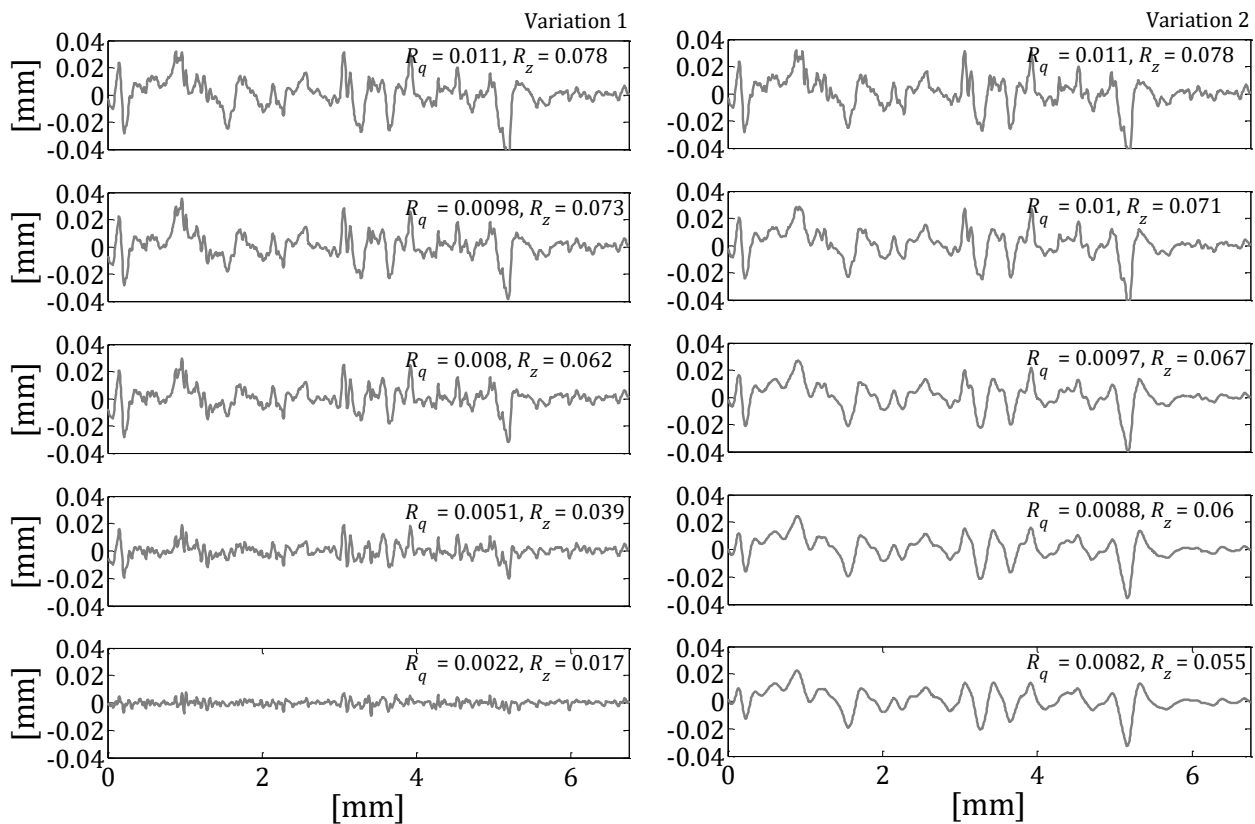


Abbildung 8.2: Variationen der Mikrotextrur zur Validierung der Simulationsmethodik am Beispiel von Profilen (fünf von zwölf Variationsschritten sind dargestellt); Variation 1: Reduktion der zunehmend langwelligen Mikrotextruranteile, Variation 2: Reduktion der zunehmend kurzwelligen Mikrotextruranteile

Im Zuge von Variation 1 werden durch einen Hochpassfilter, wie er in Kapitel 4.3.3 zur Trennung von Mikro- und Makrotextur eingesetzt wird, die zunehmend langwelligen Mikrotexturanteile schrittweise herausgefiltert und eliminiert. Diese Vorgehensweise zieht zusätzlich eine Reduzierung der Amplitudenausprägung der Textur nach sich. Es bleiben lediglich die feinstraunen Anteile der Mikrotextur mit niedrigen Amplituden- und Wellenlängenanteilen übrig. Im Gegensatz dazu werden bei Variation 2 schrittweise die kurzen Wellenlängen der Textur eliminiert. Die Textur wird dadurch vermeintlich glatter, weil die Feinrauhheitsanteile abnehmen. Qualitativ betrachtet, bleiben hierbei die Amplituden der Textur nahezu konstant. Die Höhen werden lediglich um das geringe Maß der eliminierten Feinrautiefe reduziert. (siehe Abbildung 8.2)

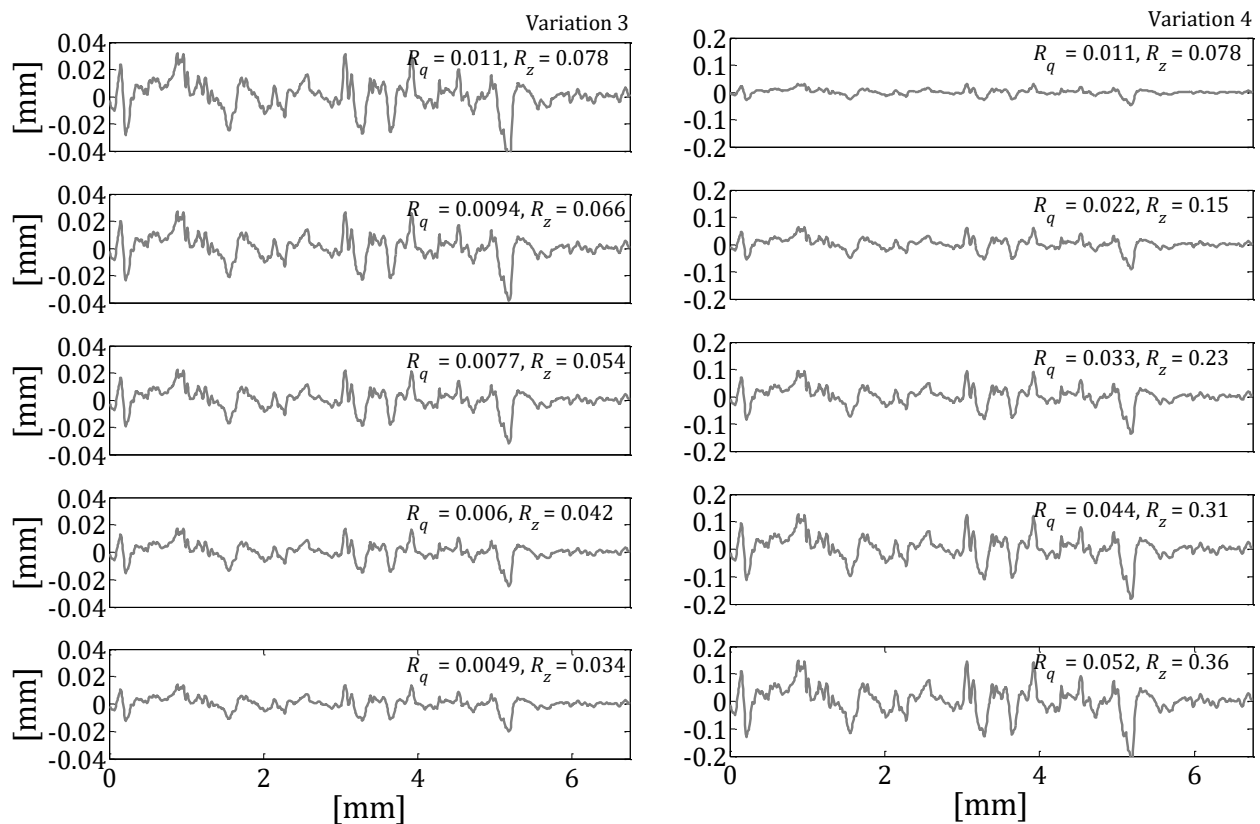


Abbildung 8.3: Variationen der Mikrotextur zur Validierung der Simulationsmethodik am Beispiel von Profilen (5 von 12 Variationsschritten sind dargestellt); Variation 3: Reduktion der Amplitudenausprägung, Variation 4: Zunahme der Amplitudenausprägung

Bei Variation 3 werden die Amplituden schrittweise auf die Hälfte der ursprünglichen maximalen Texturhöhe S_z (siehe Kapitel 4.4.1.1) verringert. Umgekehrt werden die Texturhöhen bei Variation 4 kontinuierlich auf ein doppeltes Maß von S_z erhöht. Dadurch bleiben zwar bei beiden Variationen die Wellenlängen konstant, es werden jedoch vor allem die Flankensteigungen der einzelnen Texturspitzen verändert. (siehe Abbildung 8.3) Bei Variation 3 äußert sich dies in einer Abnahme der die Steigungen betreffenden Texturparameter, wie beispielsweise die Parameter S_{dq} und S_{dq6} sowie der mittlere Textur-

gradient (siehe Kapitel 4.4.1). Im Gegensatz dazu werden diese Parameter bei Variation 4 durch die stetige Vergrößerung der Amplituden größer. (siehe Anlage B)

Neben den Veränderungen der geometrischen Parameter der verwendeten Mikrotextur lassen sich ergänzend auch die Eigenschaften des Reifenelastomers (siehe Kapitel 3.2) gezielt variieren. Dies stellt eine weitere Methode dar, um die Verlässlichkeit der eingesetzten Haftreibungssimulation abschätzen zu können. So besteht zum einen die Möglichkeit zur Variation des Schubmoduls G des Reifenelastomers. Da die Grenzen von G für die in der Reifenproduktion verwendeten Elastomere nicht bekannt sind, wird an dieser Stelle die Shore Härte A (H_a) als Kennzahl für die Werkstoffhärte herangezogen. Entsprechend der Umrechnungsvorschrift:

$$G = 0,086 \cdot 1,045^{H_a} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \triangleq \text{MPa} \right] \quad (8.1)$$

lässt sich nach [10] die Shore Härte in einen Wert für das Schubmodul überführen. Je nach Hersteller und Reifenart (Sommer- oder Winterreifen) besitzen Reifenelastomere eine Shore Härte A von 50 - 70. Daraus folgen die Grenzen für die Variation von G zu 0,78 MPa - 1,87 MPa innerhalb derer eine Abstufung in 5 Schritten erfolgt.

Zusätzlich kann die dynamische Viskosität η des Reifenelastomers [87] variiert werden (siehe Kapitel 7.2.1). Die dynamische Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit einer Materie und wird in der Regel in $\text{Pa} \cdot \text{s}$ angegeben. Sie ist stark abhängig von der Temperatur. Je höher die Viskosität, desto weniger fließfähig ist ein Material. Bei Feststoffen, wie z. B. bei Elastomeren, wird auch häufig der Begriff Duktilität verwendet. Die Viskosität beeinflusst in Abhängigkeit von der Simulationsgeschwindigkeit die ermittelten Werte für die Normalkraftkomponenten bei der Haftreibungssimulation (siehe Kapitel 7.2.1). Da keine verlässlichen Werte für Viskosität von Reifenelastomeren aus der Literatur ableitbar sind, werden die bisherigen Simulationen im Rahmen der Variationsanalyse mit dem Default-Wert 0,01 aus [63] durchgeführt. Um darüber hinaus die Auswirkungen auf den Haftreibungskoeffizienten bei einer Veränderung der Viskosität ermitteln zu können, wird die Viskosität schrittweise um 0,01 erhöht, was bedeutet, dass die Zähigkeit des Elastomers mit jedem Variationsschritt zunimmt.

8.2 Durchführung und Ergebnisse der Variationsanalyse

Aufgrund der in Kapitel 8.1 beschriebenen Vorgehensweise bei der Parametervariation erhält man für die vier Variationen jeweils zwölf Mikrotexturen, auf deren Grundlage die Haftreibungssimulation entsprechend Kapitel 7 durchgeführt wird. Für die Simulation ist der Geschwindigkeitsbereich auf 0 - 50 m/s festgelegt. Die Gesamtnormalkraft F_N variiert bei allen Simulationen von 0,5 - 3,5 N. Alle weiteren Simulationsparameter sind Anlage B

zu entnehmen. Das Ergebnis der Simulation ist auf der einen Seite der Zusammenhang zwischen der simulierten Reibgeschwindigkeit und dem wirksamen Haftreibungskoeffizienten μ_{SIM} (siehe Kapitel 7.2.3). Auf der anderen Seite erhält man die Darstellung der Abhängigkeit der über alle Zeitschritte der Simulation aufsummierten Kontaktpunkte (Anzahl N) von der Reibgeschwindigkeit. N repräsentiert aufgrund der hohen lateralen Auflösung der verwendeten Textur und des daraus resultierenden eindimensionalen Ersatzmodells qualitativ die geschwindigkeitsabhängige Veränderung der effektiven Kontaktfläche zwischen den beiden Reibpartnern. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf Simulationen, die mit einer Belastung von $F_N = 2 \text{ N}$ durchgeführt wurden. Zu Gunsten einer übersichtlichen Darstellung entfallen die Zwischenschritte jeweils, weshalb lediglich die Ergebnisse von sechs der zwölf Variationsschritte dargestellt sind. Die Ergebnisse aller Variationsschritte sind jedoch in der Anlage B aufgeführt.

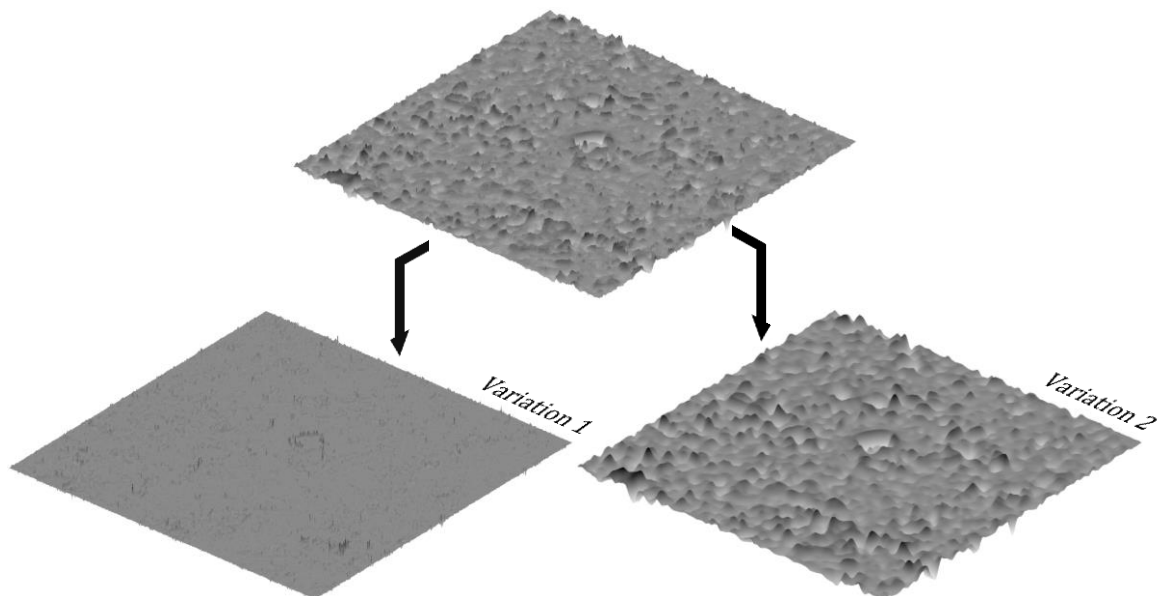


Abbildung 8.4: Dreidimensionale Darstellung der durch die Parametervariationen hervorgerufenen Veränderungen der verwendeten Mikrotextrur; Variation 1: Reduktion der zunehmend langwelligeren Mikrotextruranteile, Variation 2: Reduktion der zunehmend kurzwelligen Mikrotextruranteile

Variation 1

Die schrittweise Eliminierung der langwelligeren Mikrotextruranteile führt bei Variation 1 zur Reduktion der Texturamplituden, was in einer Abnahme der mittleren quadratischen Texturhöhen S_q und der maximalen Texturhöhen S_z (siehe Kapitel 4.4.1.1) mündet. In der Abbildung 8.5 (b) ist ersichtlich, dass bei den durchgeführten Simulationen die Anzahl der Kontaktpunkte schrittweise zunimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund der geringeren Amplitudenwerte der Textur das Reifenelastomer tiefer in die Textur eindringen kann. Trotzdem sinkt das Niveau der Haftreibung in allen Geschwindigkeitsbereichen (siehe Abbildung 8.5 (a)), was darauf schließen lässt, dass eine weitere „Verfein-

erung“ der Texturrauhheit, trotz der einhergehenden Vergrößerung der Kontaktfläche, nicht zu einer Erhöhung der dazugehörigen Haftreibungskoeffizienten führt.

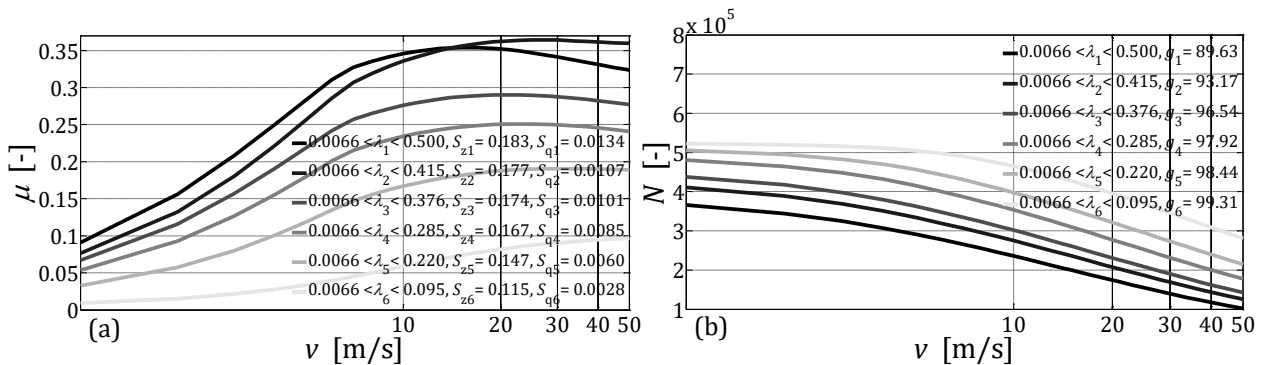


Abbildung 8.5: Ausreißerbereinigte Reibkurven in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextrur mit abnehmendem Langwellenanteil λ_i [mm] durch Filterung (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation 1 (b)

Die Reibkurve steigt mit zunehmender Geschwindigkeit an und fällt im höheren Geschwindigkeitsbereich wieder ab. Dieses Ergebnis der Simulation repräsentiert den Effekt der Hysterese; der Peak allerdings liegt unterhalb der in der Realität auftretenden Maximalgeschwindigkeit für die hysteresewirksame Haftreibung (siehe Kapitel 2.1.2). Dies lässt sich dadurch begründen, dass in der vorliegenden Arbeit lediglich die Mikrotextrur betrachtet wird, ohne die Wirkungen des gesamten Wellenlängenspektrums einer Deckschichttextur (siehe Kapitel 2.1.1) zu berücksichtigen.

Variation 2

Im Gegensatz zum vorhergehenden Schritt führt die Variation 2 durch die Filterungen zur schrittweisen Abnahme der Feinrauhheitsanteile der Mikrotextrur, was näherungsweise der Nachbildung des Poliereffekts entspricht, der sich durch die Überrollungen des Verkehrs einstellt (siehe Kapitel 2.2.1).

Erwartungsgemäß nimmt auch in diesem Fall das mittlere Haftreibungsniveau der Textur ab, allerdings in geringerem Maße als bei Variation 1. Identisch verhält es sich mit der Anzahl der Kontaktpunkte. Durch die Abnahme der Feinrauhheit nimmt die Anzahl der Irregularitäten der Textur ab, die das Elastomer verdrängen. Die Kontaktfläche wird dadurch vergrößert. Anzumerken ist, dass sowohl bei Variation 1 als auch bei Variation 2 mit zunehmender Geschwindigkeit die Anzahl der Kontaktpunkte abnimmt. Dies bedeutet, dass im verwendeten Simulationsverfahren der von der Hysterese induzierte „Nachzieheffekt“ (siehe Kapitel 7.2.1, Abbildung 7.4) Berücksichtigung findet. (siehe Abbildung 8.6)

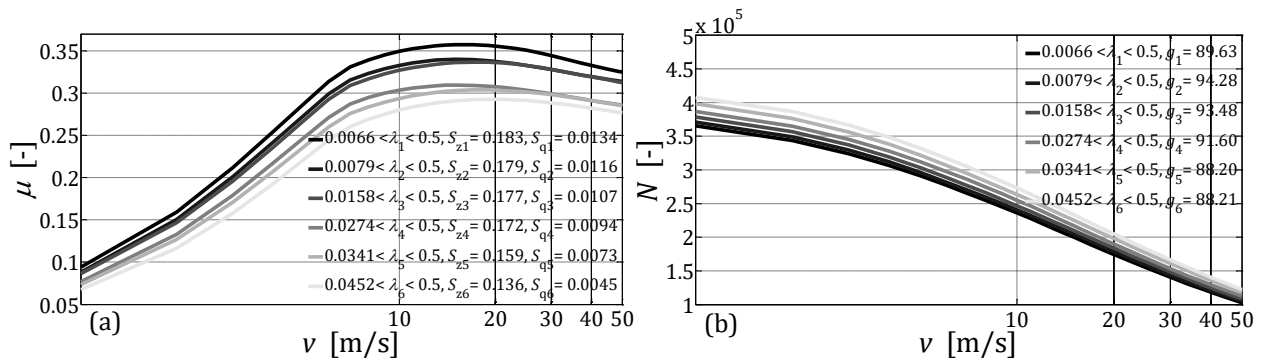


Abbildung 8.6: Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextur mit abnehmender Feinrauheit durch Filterung (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation 2 (b)

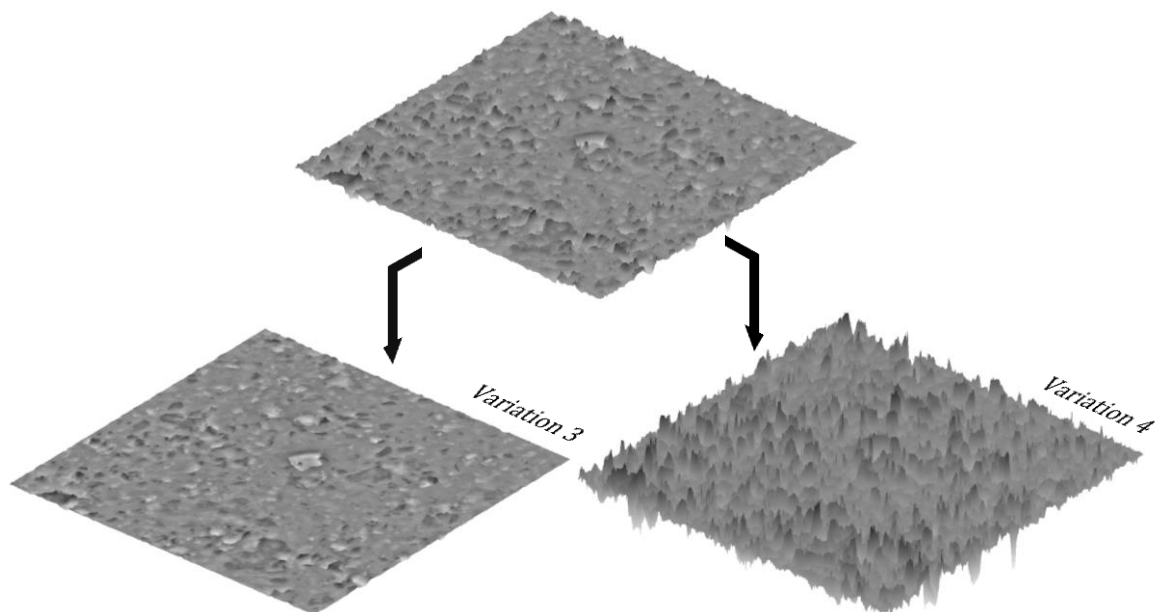


Abbildung 8.7: Dreidimensionale Darstellung der durch die Parametervariationen hervorgerufenen Veränderungen der verwendeten Mikrotextur; Variation 3: Reduktion der Amplitudenausprägung, Variation 4: Zunahme der Amplitudenausprägung

Variation 3

Unter Berücksichtigung konstanter Wellenlängen und einer stufenweisen Reduktion der Texturamplituden zeigt Variation 3 ebenfalls eine starke Abnahme des Haftreibungsniveaus (siehe Abbildung 8.8 (a)). Abnehmende Texturamplituden führen zu geringeren Flankensteigungen der Texturspitzen. Entsprechend Gleichung (7.12) sinkt dadurch die wirksame Tangentialkraft und der Haftreibungskoeffizient (siehe Kapitel 7.2.3) nimmt ab. Identisch der vorangehenden Variationen nimmt auch hier die Größe der Kontaktfläche zu (siehe Abbildung 8.8 (b)).

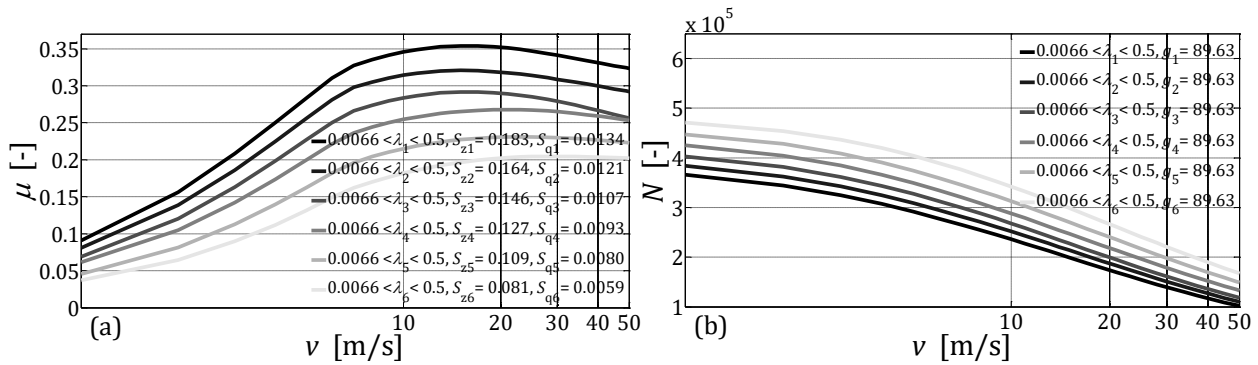


Abbildung 8.8: Reibkurven in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextrur mit abnehmender Texturamplitude (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation 3 (b)

Variation 4

Exakt umgekehrt verhält es sich bei Variation 4. Die größeren Amplitudenwerte führen zu einer Zunahme der Gradienten der Texturspitzen, da die Wellenlängen konstant bleiben. Die Tangentialkraftkomponente wird dadurch dominanter und das Haftreibungsniveau steigt (siehe Abbildung 8.9 (a)). Dieser Effekt tritt ein, obwohl die Anzahl der Kontaktpunkte zwischen den Reibpartnern aufgrund der geringeren Eindringtiefe des Elastomers abnimmt (siehe Abbildung 8.9 (b)).

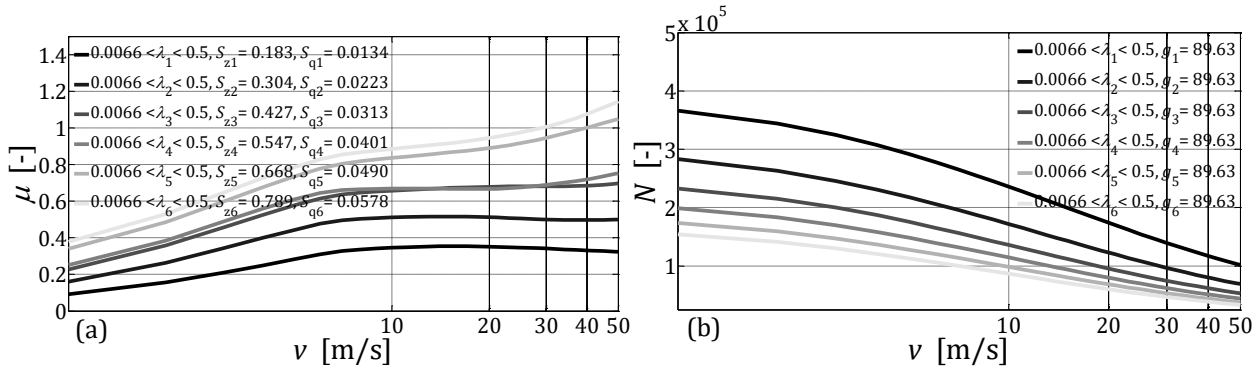


Abbildung 8.9: Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextrur mit zunehmender Texturamplitude (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation 4 (b)

Variation G

Durch die Variation von G erfolgt eine schrittweise Abstufung der Härte des Elastomers. Abbildung 8.10 (a) zeigt, dass die Veränderung des Schubmoduls bei sehr niedrigen Simulationsgeschwindigkeiten kaum Auswirkungen auf den Haftreibungskoeffizienten besitzt. Erst ab Geschwindigkeiten von ca. 10 m/s steigt das Haftreibungsniveau mit abnehmendem Schubmodul. Je weicher der Reifen ist, desto höher liegt der maximal

wirksame Haftreibungskoeffizient. Die Anzahl der Mikrokontaktpunkte steigt dabei nur minimal. (siehe Abbildung 8.10 (b))

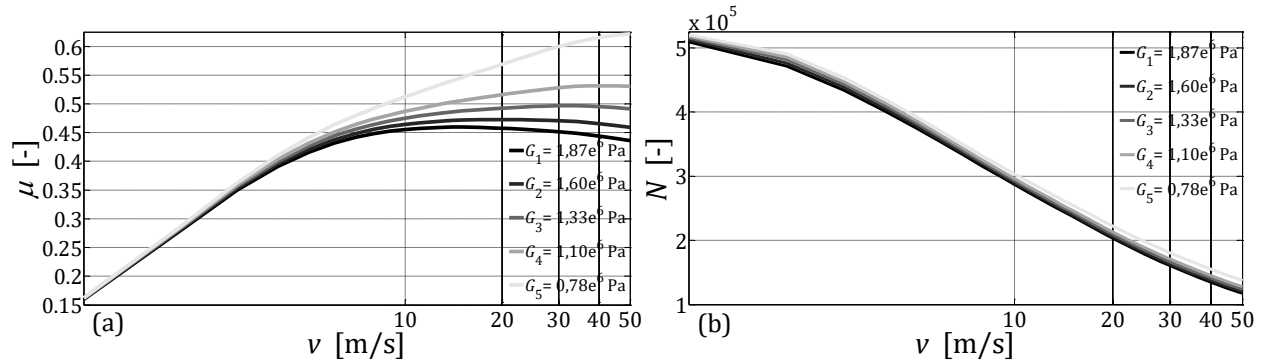


Abbildung 8.10: Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextrur mit abnehmendem Schubmodul G_i (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation G (b)

Variation η

Durch die zunehmende Viskosität erfolgt eine Verschiebung der Reibkurve in Richtung einer niedrigeren Geschwindigkeit (siehe Abbildung 8.11 (a)). Das bedeutet, dass bei einer hohen Viskosität des Elastomers bereits bei niedrigeren Geschwindigkeiten ein hohes Haftreibungsniveau aktivierbar ist. Hier macht sich bemerkbar, dass ein viskoses Material mit zunehmender Zähigkeit die Fähigkeit verliert, sich nach der Kompression durch die Texturunebenheiten in seinen Ausgangszustand zurück zu dehnen (siehe Kapitel 3.2). Die Auswirkungen dieses Effektes äußern sich ebenfalls in Abbildung 8.11 (b). Die höhere Zähigkeit des Materials führt zu einer starken Abnahme der Anzahl von Kontaktpunkten zwischen den beiden Reibpartnern.

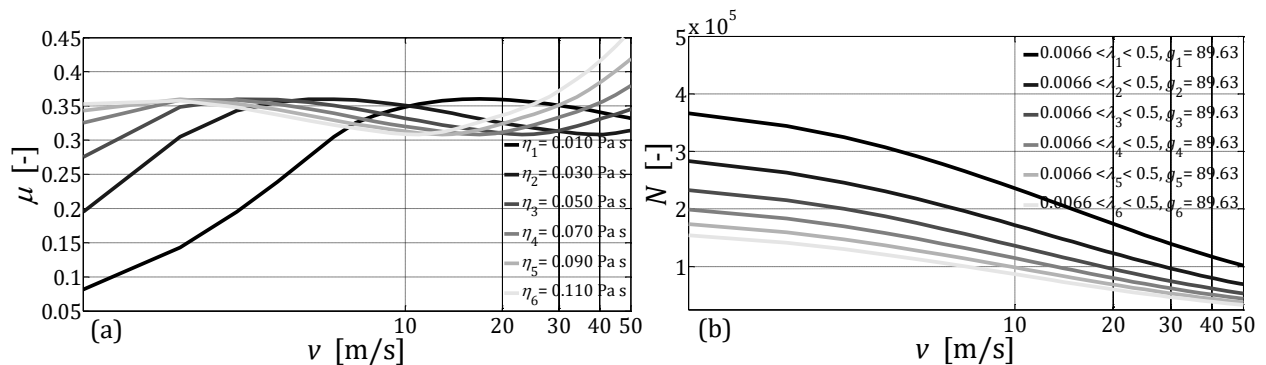


Abbildung 8.11: Haftreibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für eine Mikrotextrur mit zunehmender Viskosität η_i (a); Summe aller Mikrokontaktpunkte N über alle Simulationsschritte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Textur der Variation η_i (b)

8.3 Wirksamkeit der Parametervariation

Die in Kapitel 8.2 durchgeführte Analyse der Parametervariation zeigt, dass die Ergebnisse der Simulation dem heutigen Kenntnisstand im Bereich der Kontaktmechanik entsprechende Ergebnisse liefert und sich auf dieser Basis die Veränderungen aufgrund der Variationen der geometrischen Parameter der Textur plausibel begründen lassen. Um in der vorliegenden Arbeit den Kreis zu schließen, kann nun der Zusammenhang der in der Simulation ermittelten Haftreibungskoeffizienten und der entsprechend Kapitel 4.4 gewonnenen Texturparametern hergestellt werden. Dazu werden die Simulationsergebnisse, also die Reibkurven aller in Kapitel 8.2 durchgeführten Parametervariationen, einer multivariaten nichtlinearen Regressionsanalyse nach [92] unterzogen. Dabei wird die Regression der Haftreibungskoeffizienten mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate numerisch approximiert. Als Ergebnis dieser Regressionsanalyse erhält man die Abhängigkeiten der Texturgeometrie, repräsentiert durch die Texturparameter, vom Haftreibungskoeffizienten und der simulierten Geschwindigkeit. Dieser multivariate Zusammenhang lässt sich mathematisch mit einer Fläche in einem dreidimensionalen Diagramm darstellen. Die ermittelte Polynominalfläche besitzt die Form

$$P(x, y) = \sum_{i=0, j=0}^{n, m} p_{ij} x^i y^j, \quad (8.2)$$

wobei die Fläche mit einem Polynom 5. Grades in x -Richtung (Geschwindigkeit) und 1. Grades in y -Richtung (Texturparameter) die beste Anpassung erfährt. Die zu den jeweiligen Texturparametern gehörenden Bestimmtheitsmaße (Regressionskoeffizienten R^2) und die Grenzen der 95 %-Konfidenzintervalle (Ermittlung nach [13]) sind in Anhang C tabellarisch dargestellt. Die Güte der Regression lässt sich, neben den Regressionskoeffizienten als Maß für die Passung der Polynominalflächen, anhand des Standardschätzfehlers (SSE) und des mittleren quadratischen Vorhersagefehlers (RMSE) abschätzen. Die Berechnungsvorschriften dieser Gütekennwerte lassen sich u. a. [13,30] entnehmen. Mit der Datenbasis von $N = 1242$ Datenpunkten, die in die Regressionsanalyse einfließen, ist - statistisch betrachtet - von einem fundierten Aussagewert für das Ergebnis auszugehen.

Entsprechend dieser Vorgehensweise ergibt sich für diverse Parameter, die zur Charakterisierung von Texturen (siehe Kapitel 4.4) ermittelt wurden, eine ausgezeichnete Korrelation ($R^2 \approx 1$). So ist auf Grundlage der Ergebnisse der Simulationsläufe für die Parametervariation mit zunehmenden Werten für die Höhenparameter S_a und S_q eine Zunahme des Niveaus der wirksamen Haftreibung zu verzeichnen (siehe Abbildung 8.12). Diese Zunahme ist, wie bei allen folgenden Fällen, nahezu konstant über alle Geschwindigkeitsbereiche zu verzeichnen. Wie bereits in Kapitel 4.4.1.1 diskutiert, sollten die Höhenparameter S_a und S_q , zumindest für eine alleinige Griffigkeitsbetrachtung, nicht her-

angezogen werden. Aufgrund der starken Mittelwertbildung in den dazugehörigen Berechnungsvorschriften ist es möglich, dass Texturen mit sehr unterschiedlichen räumlichen Eigenschaften nahezu gleiche Werte für S_a und S_q besitzen. Daher sollten die Parameter lediglich in Ergänzung der nun folgenden Aussagen anhand anderer Texturparameter bewertet werden.

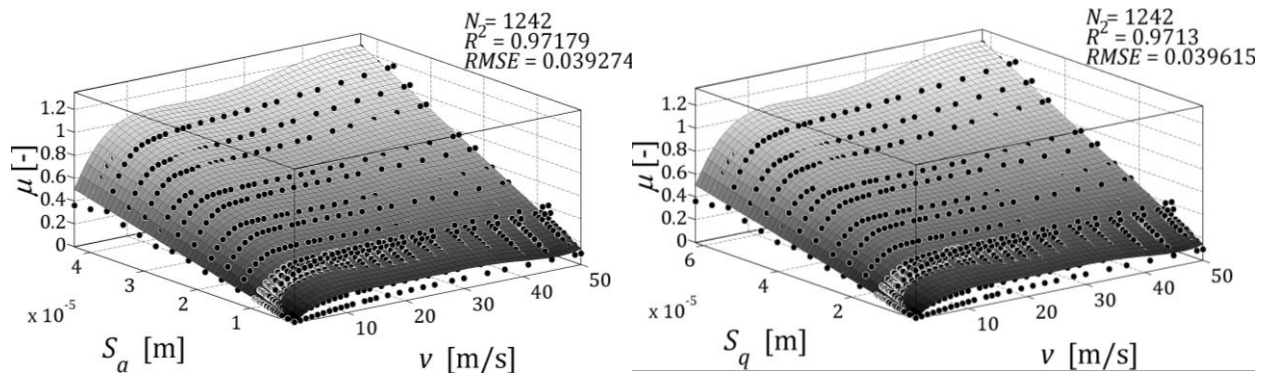


Abbildung 8.12: Regressionsflächen der mittleren arithmetischen Texturhöhe S_a und der mittleren quadratischen Höhe der Textur S_q

Wird davon ausgegangen, dass die für die Simulation verwendeten Texturen bereits entsprechend Kapitel 4.3.2 von Ausreißern befreit sind, weisen auch die Höhenparameter der größten Spitzenhöhe S_p und Senkenhöhe S_v eine hervorragende Regression auf. Je größer die größte Spitzenhöhe und größte Senkenhöhe ist, desto besser ist die damit verbundene Haftreibung (siehe Abbildung 8.13). Identisch verhält es sich mit der maximalen Texturhöhe S_z , da diese aufgrund von Gleichung (4.22) mit S_p und S_v in einem Zusammenhang steht.

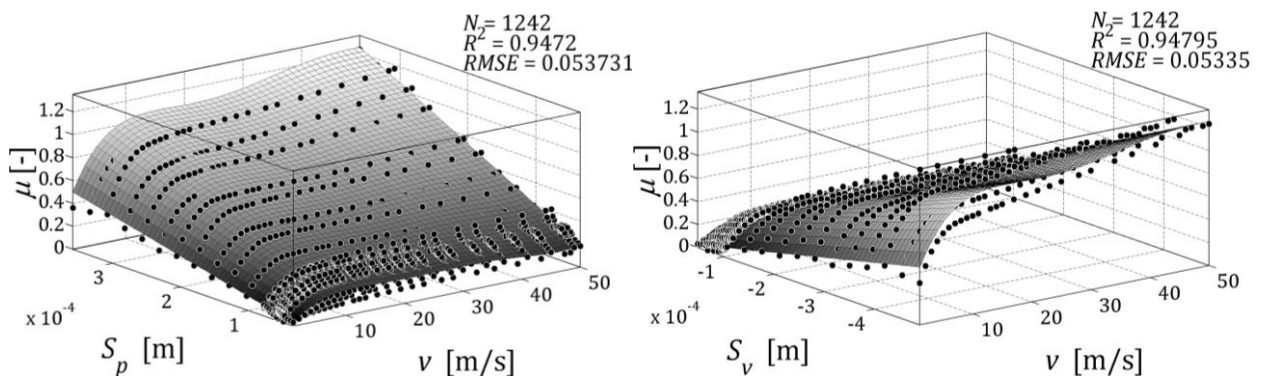


Abbildung 8.13: Regressionsflächen der größten Spitzenhöhe S_p und der größten Senkenhöhe S_v der Textur

Weil in diesem Fall durch die Filterungen im Prozess der Datenvorverarbeitung keine Ausreißer und damit eine homogene Verteilung der Höhenwerte innerhalb der Textur zu erwarten sind, kann davon ausgegangen werden, dass bei großen Werten für S_p , S_v und S_z

ebenfalls die Flankensteigungen der Texturspitzen im Mittel größer sind, wodurch wiederum das Niveau der Haftreibung ansteigende Tendenz aufweist (siehe Kapitel 8.2).

Insbesondere aufgrund der Berücksichtigung dieser Flankensteigungen von Texturspitzen, sind auch die Parameter S_{dq} respektive S_{dq6} und S_{dr} zur Beurteilung der Haftreibung geeignet (siehe Abbildung 8.14).

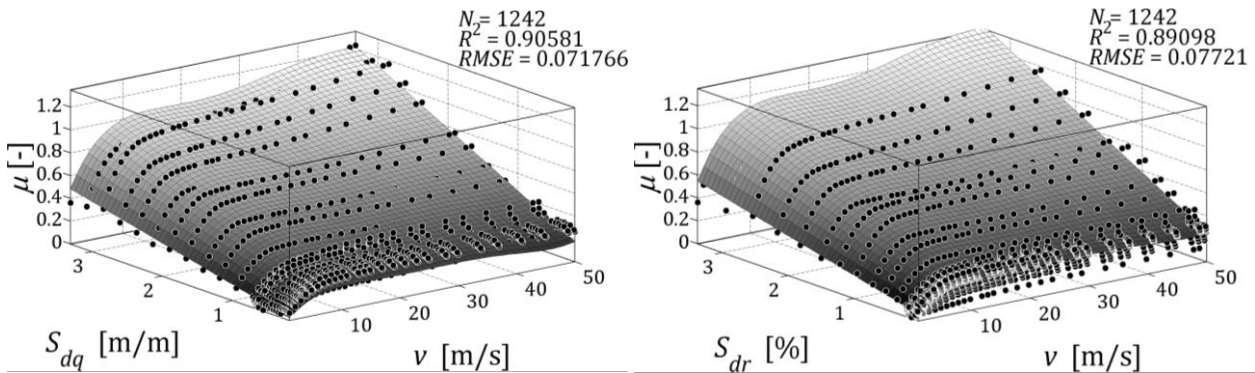


Abbildung 8.14: Regressionsflächen des mittleren quadratischen Gradienten der Textur S_{dq} und des Verhältnisses des Zuwachses der Übergangsfläche der Textur S_{dr}

Die Zehn-Punkt-Höhe S_{10z} stellt die Summe des Mittelwertes der Höhen der fünf Spitzen mit der größten Spitzenhöhe S_p und des Mittelwertes der Höhen der fünf Senken mit der größten Senkenhöhe S_v dar (siehe Gleichung (4.26)). Aufgrund dieses globalen Zusammenhangs mit S_p und S_v muss auch für S_{10z} eine gute Regression zwischen den Parameterwerten und den Haftreibungskoeffizienten herzustellen sein (siehe Abbildung 8.15).

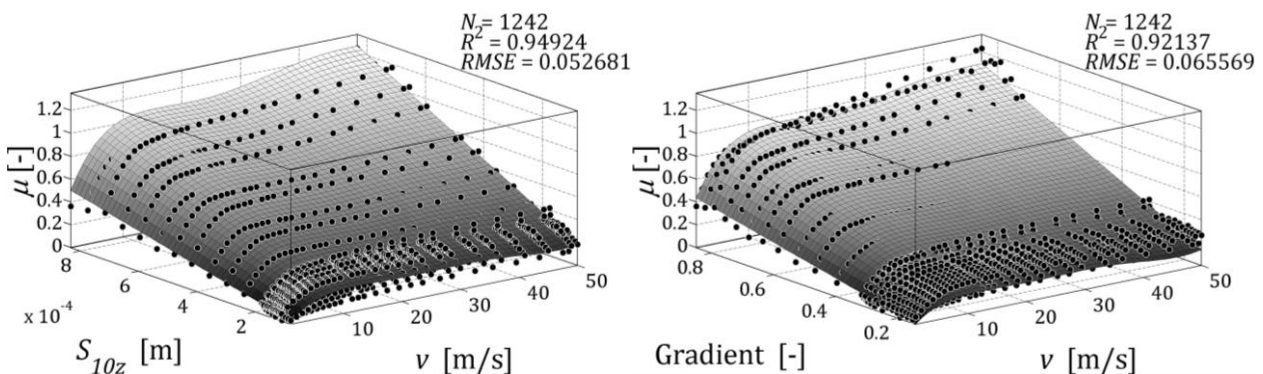


Abbildung 8.15: Regressionsfläche der Zehn-Punkt-Höhe S_{10z} und des Mittelwerts aller lokalen Gradienten der Textur

Wie bereits mehrfach erwähnt, ist das Vorhandensein großer Flankensteigungen der Texturspitzen ein entscheidendes Kriterium für ein hohes Griffigkeitsniveau. So sind innerhalb der Simulation bei Texturen mit tendenziell ansteigenden Werten für den mittleren Texturgradienten (siehe Kapitel 4.4.1.2) höhere Haftreibungskoeffizienten zu erzielen (siehe Abbildung 8.15).

Mit einem hohen Bestimmtheitsmaß von $R^2 \approx 0,97$ ist ein Zusammenhang zwischen dem Schwellenwert ξ_{\perp}^2 , der sich aus der Höhendifferenzkorrelation (HDK) (siehe Kapitel 4.4.2.2) ergibt, und der Reibkurve herzustellen (siehe Abbildung 8.16). ξ_{\perp}^2 entspricht der doppelten Varianz aller Texturhöhen. Da auch für den Vorfaktor des Leistungsspektrums, der Topothese k (siehe Gleichung (4.50)), eine gute Regression zu verzeichnen ist, kann die Erkenntnis aus [62] bestätigt werden, dass den aus der HDK ermittelten Deskriptoren zur Beurteilung der Haftreibung bzw. der Griffigkeit eine große Bedeutung zugewiesen werden kann.

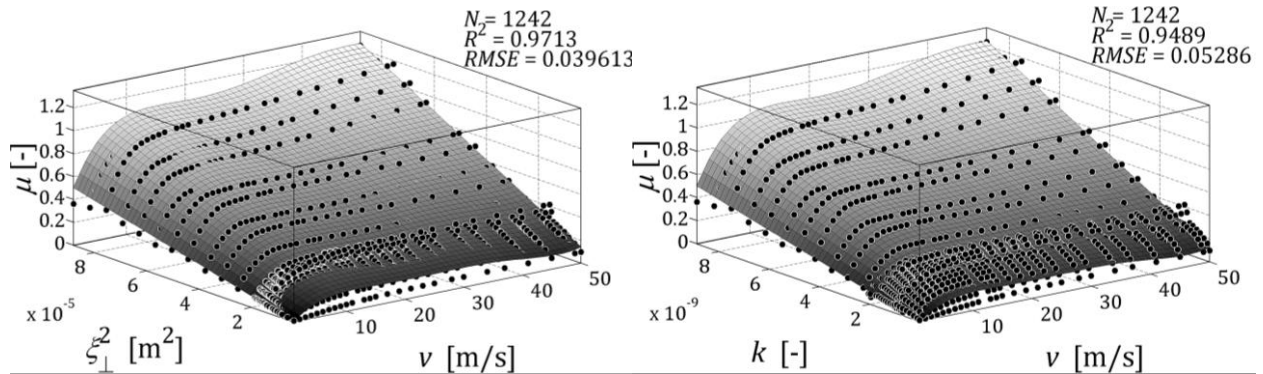


Abbildung 8.16: Regressionsflächen der aus der Höhendifferenzkorrelation (HDK) abgeleiteten Parameter Schwellenwert und Topothese

Keine nachweisbare Korrelation zeigt sich dagegen bei der Schiefe S_{sk} . Da für alle in der Untersuchung verwendete Texturen $S_{sk} < 0$ gilt, kann davon ausgegangen werden, dass die Struktur der verwendeten Oberflächen vorwiegend von Tälern dominiert ist. Dies stellt jedoch kein nachweisbares Kriterium für die Griffigkeit dar. Da trotz Variation der Texturhöhen konstant $S_{ku} > 3$ beträgt, gilt die Existenz übermäßig tiefer Täler innerhalb der verwendeten Mikrotexturen als nachgewiesen. (siehe Kapitel 4.4.1.1) Aufgrund der Tatsache, dass die Talbereiche, insbesondere die übermäßig tiefen Täler einer Textur, mit dem Reifen nicht in Kontakt treten, ist eine nicht vorhandene Regression die plausible Konsequenz daraus. (siehe Abbildung 8.17)

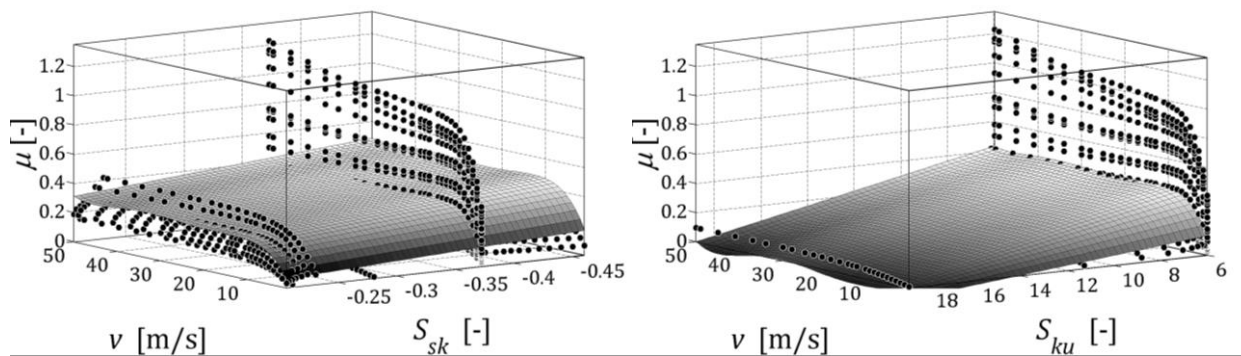


Abbildung 8.17: Regressionsflächen der Höhenparameter Schiefe S_{sk} und Kurtosis S_{ku} einer Textur

Entgegen allen Erwartungen ist auch zwischen dem Gestaltfaktor g und der simulativ bestimmten Haftreibung kein direkter Zusammenhang herzustellen. Dies bedeutet, dass g zumindest für mikroskalige Griffigkeitsbewertungen ohne kombinatorische Betrachtung mit anderen Kennwerten nicht herangezogen werden sollte.

Da die Exposition lediglich eine Richtungsangabe für ein Gefälle (siehe Kapitel 4.4.1.2) und nicht das dazugehörige Maß desselbigen darstellt, ist hier erwartungsgemäß kein Zusammenhang zwischen dem Parameter und dem Haftreibungsniveau aus der Simulation abzuleiten. (siehe Abbildung 8.18)

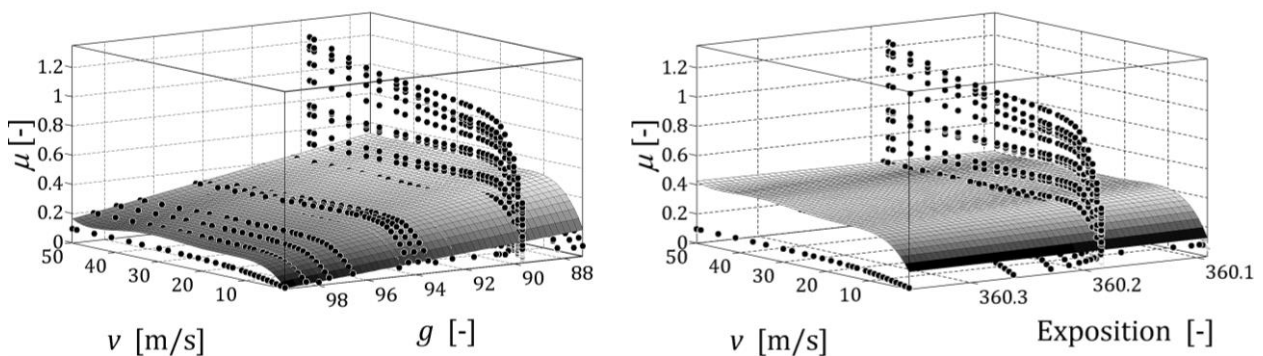


Abbildung 8.18: Regressionsflächen des aus der Materialanteilkurve abgeleiteten Gestaltfaktors g und der Exposition der Textur

Auch bei den in Abbildung 8.19 dargestellten Krümmungswerten Profil- und Plankurvatur ist keine Regression zu ermitteln, obwohl die Krümmung, betrachtet an einem diskreten Höhenpunkt, wiederum die Flankensteigung beeinflussen kann. Dieses nachteilige Ergebnis liegt voraussichtlich in den durchgeführten Mittelwertbildungen über alle Spitzenkrümmungen bei der Parametergenerierung der vorliegenden Arbeit begründet.

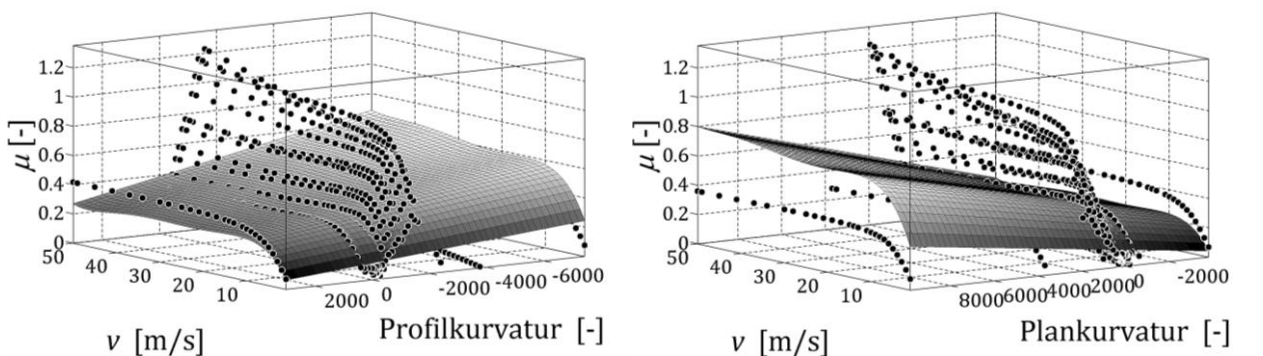


Abbildung 8.19: Regressionsflächen der Profil- und Plankurvatur der Textur

Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den simulativ bestimmten Werten für μ und den oben genannten Texturparametern ist durch die Variationsanalyse nicht nachweisbar. Dies ist jedoch kein abschließendes Ausschlusskriterium für eine weiterführende Betrachtung.

tung dieser Texturparameter. Beispielsweise wird in [62] demonstriert, dass sowohl die Korrelationslänge $\xi_{||}$ als auch die fraktale Dimension D signifikanten Einfluss auf die Haftreibungskurven besitzt. Lediglich die unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Variation, Veränderungen der Wellenlänge auf der einen Seite, Veränderungen der Amplituden auf der anderen Seite, konterkarieren ein regressives Verhalten der Polynomfläche der zuletzt genannten Parameter. Trennt man die Variationen jedoch in die beiden Variationsfälle 1/2 bzw. 3/4 auf, sind partiell Korrelationen erkennbar (siehe u. a. Abbildung 8.20).

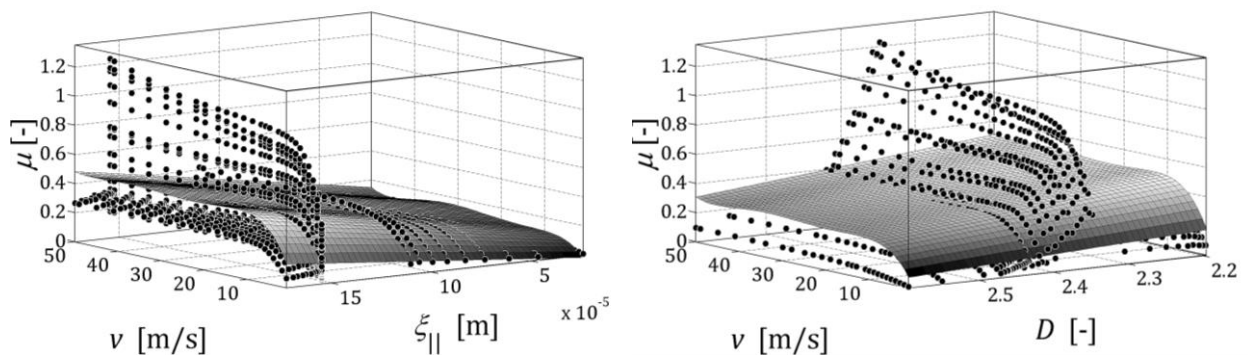


Abbildung 8.20: Regressionsflächen der aus der Höhendifferenzkorrelation (HDK) abgeleiteten Parameter Aussageweite und fraktale Dimension

9 Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben gezeigt, dass die Bestimmung des Griffigkeitsniveaus allein anhand der Texturgeometrie nur unter einer sehr differenzierten Betrachtungsweise möglich ist. Daher können die gewonnenen Erkenntnisse lediglich die ersten Schritte darstellen, um die komplexen Reibprozesse zwischen Reifen und Fahrbahn numerisch beschreiben und hinsichtlich ihrer Griffigkeit bewerten zu können.

Dies liegt auf der einen Seite in den unterschiedlichen Wellenlängenbereichen, die teils gegensätzlichen Einfluss auf die funktionalen Eigenschaften der Fahrbahndeckschicht besitzen, begründet. Auf der anderen Seite hat die Arbeit gezeigt, dass methodisch ein sehr großer Aufwand betrieben werden muss, um auf Grundlage von dreidimensionalen Texturgeometrien Haftreibungskurven numerisch ermitteln zu können. Bereits die Verfügbarkeit großflächiger Texturhöhendaten in einer ausreichenden Auflösung ist aufgrund der aktuellen technischen Möglichkeiten im Bereich der optischen Messtechnik problematisch, kann jedoch teilweise durch die entwickelten Methoden zur Generierung künstlicher Texturen aufgefangen werden. Liegen gemessene Texturen vor, zeigt die Arbeit ebenfalls Möglichkeiten auf, diese im Rahmen der Datenvorverarbeitung für eine weitere Betrachtung verfügbar zu machen. Auch diese Prozesse, wie beispielsweise die Filterverfahren zur Detektion und Elimination von Messausreißern, sind aufwendig, da sie nicht vollständig automatisiert darzustellen sind.

Es existieren im Straßenwesen bereits diverse Modelle, mit dem Ziel auf Grundlage von Texturen die dazugehörige Griffigkeit zu bewerten. Diese Modelle besitzen jedoch häufig die Nachteile, dass sie zum einen empirisch erfolgen und zum anderen lediglich makroskopische Profile mit nachfolgender Mittelwertbildung als Bewertungsgrundlage verwenden. Dadurch werden die Ergebnisse unpräzise. Im Gegensatz dazu berücksichtigt das eingesetzte numerische Simulationsverfahren die flächenhaften Eigenschaften einer Textur auf der Mikroskala. Zwar wird im Rahmen der Reduktionmethodik im Vorlauf der Simulation die dreidimensionale Textur auf ein eindimensionales Profil reduziert; die Ergebnisse der Arbeit zeigen jedoch, dass aufgrund der Art und Weise der Durchführung dieser Dimensionsreduktion die dreidimensionalen Kontakteigenschaften der Textur erhalten bleiben. Durch diese Vorgehensweise wird Informationsverlust vermieden und die Simulation, basierend auf dem gewonnenen eindimensionalen Ersatzmodell, kann ausgesprochen effizient abgebildet werden.

Die Analyse der Texturparametervariation hat gezeigt, dass die eingesetzte numerische Simulationsmethodik nachvollziehbare Ergebnisse liefert. So lassen sich die Reibeffekte, die durch die Komponente Hysterese entstehen, in der Simulation plausibel abbilden. Die wirksame Haftreibung und der damit verbundene Haftreibungskoeffizient steigen in allen durchgeführten Untersuchungen mit zunehmender Geschwindigkeit an. In Abhängigkeit

der Auflast und den viskoelastischen Eigenschaften des Reifenelastomers sinken ab einem nachvollziehbaren Geschwindigkeitsbereich, entsprechend bisheriger Erkenntnisse der Kontaktmechanik, die Reibwerte wieder.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den orts- und spektralräumlich ermittelten Parametern zur Charakterisierung der statistischen Oberflächengeometrie hat ergeben, dass insbesondere die Parameter, die die Flankensteigungen der Texturspitzen berücksichtigen zur Bewertung von Texturgriffigkeiten geeignet sind. Qualitativ betrachtet, sind die Gradienten der Texturspitzen von größerer Bedeutung als die effektive Kontaktfläche, d. h. die absolute Betrachtung der effektiven Kontaktfläche stellt kein Maß für die Haftreibung dar. Diese zentralen Erkenntnisse unterstreichen die Validität des entwickelten Verfahrens. Es ist jedoch nicht nachweisbar, dass ein einzelner Parameter repräsentativ zur Bewertung der Griffigkeit herangezogen werden kann. Daher wird für weiterführende Untersuchungen empfohlen zu überprüfen, inwiefern Parameter kombinatorisch zur Evaluierung von Griffigkeiten herangezogen werden können.

Es gilt anzumerken, dass das Verfahren aus diversen Gründen noch nicht dazu geeignet ist, um quantitative Absolutbewertungen von Fahrbahngriffigkeiten vorzunehmen. Dies liegt vor allem daran, dass lediglich Messfelder der Größe eines Gesteinskorns betrachtet werden können, welche nicht repräsentativ für eine ganze Fahrbahn sein können. In zukünftigen Arbeiten sollte daher untersucht werden, wie homogen die Griffigkeiten einzelner Kornoberflächen über eine Straßenoberfläche verteilt sind, indem großflächig Texturen gemessen werden und die darauf wirksame Haftreibung simuliert wird. Die Variationsanalyse zeigt jedoch, dass bereits eine qualitative Vergleichsbewertung möglich ist. Voraussetzung dafür sind Texturen, die mit demselben Messsystem unter gleichen Messbedingungen aufgenommen werden. So gilt die Methode in seiner jetzigen Form lediglich als Werkzeug zur Identifikation von haftreibungsrelevanten Texturparametern und hat zum Ziel, die aktiven Prozesse bei der Reibung zwischen dem Reifen und der Fahrbahn nachvollziehbar numerisch abzubilden.

Wie bereits erwähnt, werden die Prozesse bei der Reibung zwischen dem Reifenelastomer und der rauen Oberfläche einer Fahrbahndeckschicht von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Daher gilt es für folgende Forschungsbestrebungen auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit die Methodik zu erweitern, um so auch quantitative Aussagen zur Fahrbahngriffigkeit machen zu können und dadurch eine Kalibrierung des Simulationsverfahrens zu ermöglichen. Daher sollten in einem ersten Schritt die Vorgänge der Hysterese auch auf ein makroskopisches System der Textur ausgeweitet werden. Des Weiteren besitzen beim komplexen Reibprozess, neben der Hysterese, auch adhäsive Phänomene und im Falle von nassen Fahrbahnen auch viskose Komponenten einen Einfluss auf das Haftreibungsniveau.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Reduktion des dreidimensionalen Kontaktfalls und zur Simulation der Reibprozesse gilt als flexibel genug, um die genannten Komponenten der Haftreibung, auch auf makroskopischer Ebene, zu ergänzen. Dies eröffnet die Möglichkeit, dem Ziel eines ganzheitlichen numerischen Abbildes der komplexen Vorgänge der Elastomerreibung näher zu kommen.

Literatur

- [1] Online verfügbar unter <http://www.seabeam.com/polish/GritScales.pdf>, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- [2] 3D Surface Texture Parameters - Michigan Metrology. Online verfügbar unter http://www.michmet.com/Texture_parameters.htm, zuletzt geprüft am 18.01.2012.
- [3] An Introduction to Applied Mathematics, MA 325, Lecture 8: Filters in Frequency Domain, Manuskript, NC State University, zuletzt geprüft am 21.06.2013.
- [4] Von räumlichen Analysemethoden zur Entscheidungsfindung, Funktionale Ableitungen aus kontinuierlichen Raumdaten Philipps Universität Marburg, Fachbereich Geographie. Online verfügbar unter http://gisbsc.gis-ma.org/GISBScL7/de/html/VL7a_V_lo2.html, zuletzt geprüft am 08.01.2014.
- [5] Almqvist, A.; Campaña, C.; Prodanov, N.; Persson, B. N. J.: Interfacial separation between elastic solids with randomly rough surfaces: Comparison between theory and numerical techniques. In: Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Jg. 59, H. 11, S. 2355–2369, 2011.
- [6] Anselin, L.: Variogram Analysis, Veranstaltung vom 26.10.2003. Online verfügbar unter <http://sal.agecon.uiuc.edu>, zuletzt geprüft am 22.01.2013.
- [7] Bachmann, T.: Wechselwirkungen im Prozeß der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn, Als Ms. gedr, VDI-Verlag, Düsseldorf, (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, 360), 1998.
- [8] Barnes, R. J.: Variogram Tutorial, Golden Software, Inc.
- [9] Barnes, R. J.: The variogram sill and the sample variance. In: Mathematical Geology, Jg. 23, H. 4, S. 673–678, 1991.
- [10] Battermann, W.; Köhler, R.: Elastomere Federung, elastische Lagerungen, Grundlagen ingenieurmässiger Berechnung und Konstruktion, W. Ernst, Berlin, 1982.
- [11] Beckenbauer, T.: Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Minderungspotential der Straßenoberfläche, Müller-BBM, Planegg.
- [12] Besdo, D.; Klüppel, M.; Kröger, M.; Nackenhorst, U.; Wriggers, P.; Heimann, B.: Elastomere Friction, Theory, Experiment and Simulation, Online-Ausg., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [13] Beucher, O.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit MATLAB, Anwendungsorientierte Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2., bearb. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [14] Biermé, H.: Operator Scaling Stable Random Fields, 2006.
- [15] Bohling, G.: Introduction To Geostatistics And Variogram Analysis, C&PE 940, 2005.
- [16] Burger, W.; Burge, M. J.: Digitale Bildverarbeitung, Eine Einführung mit Java und ImageJ, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [17] Butz, T.: Fouriertransformation für Fußgänger, 5. Auflage, Teubner-Verlag, Wiesbaden, 2007.

- [18] Candela, T.: Characterization of Fault Roughness at Various Scales: Implications of Three-Dimensional High Resolution Topography Measurements.
- [19] Carbone, G.; Bottiglione, F.: Contact mechanics of rough surfaces: a comparison between theories. In: Meccanica, 2010.
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 13565-2: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften, Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve, April 1998.
- [21] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 11562: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren, Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern, September 1998.
- [22] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 13036-3: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen, Prüfverfahren - Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten, Juni 2003.
- [23] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 13036-4: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen, Prüfverfahren - Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: Der Pendeltest, Dezember 2003.
- [24] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 13473-2: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen, Juli 2004.
- [25] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 13473-1: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Bestimmung der mittleren Profiltiefe, Juli 2004.
- [26] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 25178-2: Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen, März 2008.
- [27] Dunford, A.: Measuring skid resistance without contact 2007-2008. Herausgegeben von Transport Research Laboratory Infrastructure and Environment Division, TRL Ltd., 2008.
- [28] Dunford, A.: Measuring skid resistance without contact 2008-2009. Herausgegeben von Transport Research Laboratory Infrastructure and Environment Division, TRL Ltd., 2009.
- [29] Ehrenstein, G. W.: Polymer-Werkstoffe, Struktur - Eigenschaften - Anwendung, 2. Auflage, Hanser-Verlag, München, Wien, 1999.
- [30] Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik, Der Weg zur Datenanalyse, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [31] Faires, J. D.; Burden, R. L.: Numerische Methoden, Näherungsverfahren und ihre praktische Anwendung, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1995.
- [32] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe, M BGriff, 2003.

- [33] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, 2004.
- [34] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, 2009.
- [35] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitsausschuss Erhaltung von Asphaltstraßen, 763: Merkblatt für griffigkeitsverbessernde Maßnahmen an Verkehrsflächen aus Asphalt, 2002.
- [36] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, 2007.
- [37] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen: Merkblatt zur Optimierung der Oberflächeneigenschaften von Asphaltdeckschichten, MOOA, 2010.
- [38] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitsgruppe Asphaltstraßen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen - Asphaltbauweise, Ausgabe 1998/Fassung 2003.
- [39] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, 408/2: Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren (SRT), 2004.
- [40] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Arbeitsanleitung, 411: Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem LFC-Messverfahren (GripTester), 2007.
- [41] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, 408/1: Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), 2007.
- [42] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitsgruppe Sonderaufgaben: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, 2006.
- [43] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen / Arbeitskreis Oberflächeneigenschaften von Asphalt: Merkblatt für den Bau griffiger Asphaltdeckschichten, M BgA, 2004.
- [44] Franke, H.-J.: Griffigkeit von Fahrbahndecken aus Beton. In: Straße und Autobahn, H. 4, S. 218–224, 2004.
- [45] Geike, T.: Theoretische Grundlagen eines schnellen Berechnungsverfahrens für den Kontakt rauer Oberflächen, Dissertation Technische Universität Berlin, 2007.
- [46] Geike, T.; Popov, V. L.: Mapping of three-dimensional contact problems into one dimension. In: Physical Review E, Jg. 76, H. 3, 2007.
- [47] Geike, T.; Popov, V. L.: Reduction of three-dimensional contact problems to one-dimensional ones. In: Tribology International, Jg. 40, H. 6, S. 924–929, 2007.
- [48] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E.: Digital image processing, 3rd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J, 2008.

- [49] Greenwood, J. A.; Williamson, J. B. P.: Contact of Nominally Flat Surfaces. In: Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Jg. 295, H. 1442, S. 300–319, 1966.
- [50] Grosch, K. A.: The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber. In: Royal Society. Proceedings. Series A: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 274, 1963, p. 21-39, 1963.
- [51] Harris, F. J.: On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. In: Proceedings of the IEEE, Jg. 66, H. 1, S. 51–83, 1978.
- [52] Hattermann, F.: Einführung in die Geostatistik (4), Variogrammschätzung, Potsdam. Online verfügbar unter <http://www.pik-potsdam.de>, zuletzt geprüft am 06.09.2013.
- [53] Hering, E.: Photonik, Grundlagen, Technologie und Anwendung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [54] Heß, M.: Über die exakte Abbildung ausgewählter dreidimensionaler Kontakte auf Systeme mit niedrigerer räumlicher Dimension, Dissertation Technische Universität Berlin, 2011.
- [55] Horn, B.: Hill shading and the reflectance map. In: Proceedings of the IEEE, Jg. 69, H. 1, S. 14–47, 1981.
- [56] Huschek, S.: Polierwiderstand und Griffigkeit - Langzeiterfahrungen. In: Straße und Autobahn, H. 9, 2004.
- [57] Huschek, S.; Dames, J.; Rittershofer, M.: Griffigkeitsschwankungen von Fahrbahndecken, Bundesministerium für Verkehr, (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 720), 1994.
- [58] Huschek, S.; Merzoug, D. P.: Zusammenhang zwischen Rauheit und Griffigkeit, Bundesministerium für Verkehr, (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 735), 1997.
- [59] Internationale VDI-Tagung "Reifen - Fahrwerk - Fahrbahn": Reifen - Fahrwerk - Fahrbahn im Spannungsfeld von Sicherheit und Umwelt, 12. internationale VDI-Tagung, Hannover, 20. und 21. Oktober 2009, 2009., Düsseldorf, VDI-Verlag.
- [60] Jahn, R.; Truckenbrodt, H.: Methoden zur Schätzung fraktaler Parameter der Mikrogeometrie von Oberflächen. In: Maschinenbau im Informationszeitalter, S. 311–316, 1999.
- [61] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. In: Straßenbau-Technik, Jg. 1971, Ausgabe 3, S. 131–135.
- [62] Klüppel, M.; Heinrich, G.: Rubber friction on self-affine road tracks. In: Rubber chemistry and technology, Jg. 2000, H. 73, S. 578–606, 2000.
- [63] Korostelev, S.; Dimaki, A.: Rapid two-dimensional surface simulation software, Unter Mitarbeit von Valentin L. Popov und Thomas Geike, Technische Universität Berlin, 2008.
- [64] Kragelski, I. V.; Dobyčín, M. N.; Kombalov, V. S.; Polzer, G.; Wolf, L.: Grundlagen der Berechnung von Reibung und Verschleiß, 1. Auflage, Verlag Technik, Berlin, 1982.
- [65] Kummer, H. W.; Meyer, W. E.: Verbesserter Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn - Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie, Jg. 69, H. 8, S. 245–251, 1967.

- [66] Kurz, S.: Reduktion eines Mehrkontaktproblems für Griffigkeitsbetrachtungen von Straßenoberflächen, Diplomarbeit. Betreut von Markus Weise Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau, 2011.
- [67] Lehné, R.: Griffigkeit von Fahrbahndeckschichten aus Asphalt, Theorie, Anforderungen und Prognose, Veranstaltung vom 07.03.2007, VSVI Berlin/Brandenburg.
- [68] Leister, G.: Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung, Strategie, Methoden, Tools, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [69] Lindner, M.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Gummireibung an Profilklotzen und Dichtungen, Dissertation Universität Hannover, 2005.
- [70] Mackey, G.: Seasonal Influence on Skid Resistance and Equipment Calibration, Road Surface Friction Conference 15.-18.05.2011, Gold Coast, Australia.
- [71] Maerschalk, G.; Heller, S.; Ueckermann, A.: Längsebenheitsauswerteverfahren "Bewertetes Längsprofil", Weiterentwicklung der Längsebenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung, Wirtschaftsverlag N.W., Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 2011.
- [72] Mandelbrot, B. B.: Die fraktale Geometrie der Natur, Birkhäuser-Verlag, Basel, Stuttgart, 1991.
- [73] Masad, E.; Rezaei, A.; Chowdhury, A.; Harris, P.: Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics, Austin, Texas, 2009.
- [74] Moore, D. F.: The Friction and Lubrication of Elastomers, 1972.
- [75] Nayak, P. R.: Random process model of rough surfaces, ASME, New York, (American Society of Mechanical Engineers (Series)), 1971.
- [76] Nettingsmeier, J.; Wriggers, P.: Frictional contact of elastomer materials on rough rigid surfaces. In: PAMM, Jg. 4, H. 1, S. 360–361, 2004.
- [77] Persson, B. N. J.: Theory of rubber friction and contact mechanics. In: The Journal of Chemical Physics, Jg. 115, H. 8, S. 3840, 2001.
- [78] Persson, B. N. J.: Adhesion between an elastic body and a randomly rough hard surface. In: The European Physical Journal E, H. E 8, S. 385–401, 2002.
- [79] Persson, B. N. J.: Contact mechanics for randomly rough surfaces. In: Surface Science Reports, Jg. 61, H. 4, S. 201–227, 2006.
- [80] Persson, B. N. J.: Rubber friction: role of the flash temperature. In: Journal of Physics: Condensed Matter, Jg. 18, H. 32, S. 7789–7823, 2006.
- [81] Persson, B. N. J.: Rubber friction and tire dynamics, 2010.
- [82] Persson, B. N. J.; Albohr, O.; Creton, C.; Peveri, V.: Contact area between a viscoelastic solid and a hard, randomly rough, substrate. In: The Journal of Chemical Physics, Jg. 120, H. 18, S. 8779, 2004.
- [83] Persson, B. N. J.; Albohr, O.; Tartaglino, U.; Volokitin, A. I.; Tosatti, E.: On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. In: Journal of Physics: Condensed Matter, Jg. 17, H. 1, S. R1, 2005.
- [84] Persson, B. N. J.; Tosatti, E.: The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids. In: The Journal of Chemical Physics, Jg. 115, H. 12, S. 5597, 2001.

- [85] Pfeiler, A.: Griffigkeitserhöhung von Asphaltstraßen, Der Einfluss feiner Gesteinskörnung. In: Straße und Autobahn, H. 8, 2005.
- [86] Popov, V. L.: Kontaktmechanik stochastischer Oberflächen, Technische Universität Berlin, 2006.
- [87] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung, Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik, 2. Überarbeitung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [88] Popov, V. L.; Heß, M.: Methode der Dimensionsreduktion in Kontaktmechanik und Reibung, Eine Berechnungsmethode Im Mikro- und Makrobereich, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [89] Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P.: Numerical recipes in FORTRAN, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [90] Rado, Z.: A study of road surface texture and its relationship to friction, Ph. D. Thesis Pennsylvania State University, 1994.
- [91] Rauschenbach, V.: Asphaltdeckschichten mit anforderungsgerechter Griffigkeit, Maßnahmen zur Planung und Ausführung, 2. Auflage. Herausgegeben von Deutscher Asphaltverband e.V., Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. und Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V., Bonn, 2006.
- [92] Ruckstuhl, A.; Stahel, W.: Numerische und statistische Methoden für Chemieingenieure, Zürcher Hochschule Winterthur, ETH Zürich. Online verfügbar unter <http://stat.ethz.ch/~stahel/courses/cheming/nlreg.pdf>, zuletzt geprüft am 28.10.2013, November 2008.
- [93] Sandberg, U.; Ejsmont, J. A.: Tyre/road noise reference book, 1st edition, INFORMEX, Kisa, Sweden, Harg, Sweden, 2002.
- [94] Schallamach, A.: The load dependence of rubber friction. In: Physical Society. Proceedings, Jg. 65, Part 9, H. 393B, S. 657–661, 1952.
- [95] Scharnigg, K.: Aktuelle Entwicklungen bei Griffigkeitsmessverfahren. In: Straße und Autobahn, H. 8, S. 490–498, 2008.
- [96] Schellenberger, M.: Griffigkeit - Stand der Praxis. In: Straße und Autobahn, H. 10, 2005.
- [97] Schmidt, J.: Alternative Anwendung zum Griffigkeitsmessverfahren SKM durch das kombinierte Griffigkeitsmessverfahren mit SRT-Pendel und Ausflussmesser, Bundesministerium für Verkehr, (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 1026), 2009.
- [98] Schramm, E. J.: Reibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen und Beschreibung von Nassbremseigenschaften von PKW-Reifen, Dissertation Universität Regensburg, 2002.
- [99] Schulze, C. K. V.: Ein geometrisch basiertes Modell zur Ableitung von Reibwerten bei Nässe aus der Textur, Dissertation RWTH Aachen, 2011.
- [100] Schwarz, H. R.; Köckler, N.: Numerische Mathematik, 8. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [101] Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W.: Engineering tribology, 3rd edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, Boston, 2005.

- [102] Steinbrecher, R.: Bildverarbeitung in der Praxis, Oldenbourg-Verlag, München, Wien, 2005.
- [103] Su, Y.; Xu, Z.; Jiang, X.: GPGPU-based Gaussian Filtering for Surface Metrological Data Processing. In: Information Visualisation, 2008. IV '08. 12th International Conference, S. 94–99, 2008.
- [104] Technical Committee on Surface Characteristics C.1: International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture And Skid Resistance Measurements, Unter Mitarbeit von J. C. Wambold, C. E. Antle und J. J. Henry et al. Online verfügbar unter <http://www.piarc.org/en/publications/>, zuletzt geprüft am 08.09.2009, 1995.
- [105] Thomas, T. R.: Rough surfaces, 2nd edition, Imperial College Press, London, 1999.
- [106] Trzesniowski, M.: Rennwagentechnik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [107] van der Steen, R.: Tyre/road friction modeling, Literature survey Eindhoven University of Technology; Department of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, 2007.
- [108] Wen, R.; Sinding-Larsen, R.: Uncertainty in fractal dimension estimated from power spectra and variograms. In: Mathematical Geology, Jg. 29, H. 6, 1997.
- [109] Yang, C.; Persson, B. N. J.: Contact mechanics: contact area and interfacial separation from small contact to full contact. In: Journal of Physics: Condensed Matter, Jg. 20, H. 21, 2008.
- [110] Zevenbergen, L. W.; Thorne, C. R.: Quantitative analysis of land surface topography. In: Earth Surface Processes and Landforms, Jg. 12, H. 1, S. 47–56, 1987.

Anhang A

Beschreibung		MMR	MMX	CAMI Scale	ISO-FEPA	Fertigungs- skala	Körnung	Partikel- größe [mm]	Partikel- größe [µm]	
MACROGRITS	Medium			60			0,5	0,268	268	
					P60			0,269	269	
					P80			0,201	201	
	fein			80				0	0,192	192
					P100	A200			0,162	162
				100				2/0	0,141	141
					P120				0,125	125,00
				120		A160		3/0	0,116	116,00
					P150				0,1	100,00
	Sehr fein			150		A130		4/0	0,093	93,00
				180				5/0	0,082	82,00
					P180	A110			0,078	78,00
			220				6/0	0,068	68,00	
				P220	A90			0,066	66,00	
				P240	A75			0,0585	58,50	
			240		A65		7/0	0,0535	53,50	
				P280				0,0522	52,20	
				P320	A60			0,0462	46,20	
		80	280				8/0	0,044	44,00	
MICROGRITS	Extra fein				P360			0,0405	40,50	
			100	320				9/0	0,036	36,00
					P400	A45			0,035	35,00
					P500				0,0302	30,20
			150	360					0,0288	28,80
					P600	A35			0,0258	25,80
	Super fein	1500	180	400		A30		10/0	0,0236	23,60
					P800	A25			0,0218	21,80
				500					0,0197	19,70
					P1000				0,0183	18,30
		1800	240	600					0,016	16,00
					P1200	A16			0,0153	15,30
	Ultra fein				P1500				0,0126	12,60
		2400	320	800					0,0122	12,20
					P2000				0,0103	10,30
				1000					0,0092	9,20
					P2500				0,0084	8,40
		3200	360	1200					0,0065	6,50

Tabelle 9.1: Auszug aus den gängigen Normen für Sandpapier mit der Übersicht der jeweiligen Spezifikationen auf der Mikroskala; Grau hinterlegt: Für die Validierung der Simulation verwendete Sandpapierkörnungen [1]

Anhang B

Variation 1												
Höhenparameter		Hybridparameter			Fraktale Parameter			Erweiterte Parameter				
S_a [m]	9,284e-06 - 1,791e-06	S_{dq} [m/m]	0,713 - 0,566	D [-]	2,433 - 2,594	Gradient [-]	0,318 - 0,195					
S_q [m]	1,341e-05 - 2,763e-06	S_{dq6} [m/m]	0,644 - 0,472	ξ_1^2 [m ²]	1,897e-05 - 3,908e-06	Exposition [-]	360,185 - 360,354					
S_{sk} [-]	-0,373 - -0,281	S_{dr} [%]	0,204 - 0,126	$\xi_{ }$ [m]	1,545e-04 - 2,380e-05	Profil-kurvatur [-]	-342,181 - -3760,404					
S_{ku} [-]	5,971 - 18,779	S_{10z} [m]	1,796e-04 - 1,088e-04	k [-]	1,662e-09 - 3,778e-11	Plan-kurvatur [-]	419,415 - -197,161					
S_z [m]	1,831e-04 - 1,154e-04						g [-]	89,634 - 99,307				
Simulationsergebnisse												
Simulationsparameter: $F_N = 2$ N, $G = 1e^7$ Pa, $\eta = 0,01$ Pa·s, Simulationsdurchgänge: $i = 1, \dots, 12$												
v	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}	μ_{11}	μ_{12}
1	0,0911	0,1222	0,1614	0,0689	0,0762	0,0670	0,0604	0,0534	0,0439	0,0325	0,0209	0,0092
2	0,1561	0,2028	0,2869	0,1253	0,1321	0,1159	0,1053	0,0927	0,0770	0,0573	0,0365	0,0154
3	0,2085	0,2657	0,3924	0,1777	0,1805	0,1569	0,1434	0,1268	0,1063	0,0801	0,0513	0,0217
4	0,2503	0,3144	0,4663	0,2241	0,2217	0,1909	0,1754	0,1558	0,1318	0,1006	0,0652	0,0278
5	0,2837	0,3521	0,5111	0,2611	0,2565	0,2188	0,2020	0,1802	0,1537	0,1188	0,0781	0,0338
6	0,3103	0,3814	0,5418	0,2895	0,2858	0,2416	0,2240	0,2008	0,1725	0,1348	0,0899	0,0395
7	0,3275	0,3996	0,5637	0,3115	0,3069	0,2572	0,2393	0,2154	0,1863	0,1474	0,1001	0,0450
8	0,3356	0,4076	0,5795	0,3288	0,3190	0,2652	0,2473	0,2234	0,1945	0,1555	0,1078	0,0500
9	0,3415	0,4134	0,5912	0,3427	0,3283	0,2713	0,2535	0,2295	0,2008	0,1620	0,1141	0,0546
10	0,3459	0,4176	0,5999	0,3539	0,3357	0,2760	0,2583	0,2343	0,2058	0,1671	0,1193	0,0588
11	0,3490	0,4206	0,6064	0,3630	0,3416	0,2796	0,2620	0,2381	0,2098	0,1712	0,1237	0,0625
13	0,3526	0,4240	0,6148	0,3768	0,3501	0,2846	0,2671	0,2435	0,2156	0,1774	0,1305	0,0686
14	0,3535	0,4247	0,6175	0,3819	0,3532	0,2864	0,2688	0,2453	0,2177	0,1797	0,1332	0,0712
15	0,3539	0,4250	0,6195	0,3863	0,3557	0,2877	0,2701	0,2468	0,2195	0,1817	0,1355	0,0734
17	0,3538	0,4249	0,6219	0,3930	0,3594	0,2893	0,2717	0,2489	0,2221	0,1847	0,1392	0,0774
19	0,3528	0,4242	0,6231	0,3979	0,3617	0,2901	0,2724	0,2501	0,2238	0,1868	0,1421	0,0805
21	0,3511	0,4230	0,6234	0,4016	0,3630	0,2903	0,2726	0,2507	0,2249	0,1883	0,1443	0,0831
23	0,3491	0,4215	0,6232	0,4044	0,3638	0,2901	0,2724	0,2508	0,2255	0,1893	0,1460	0,0853
25	0,3469	0,4197	0,6226	0,4066	0,3642	0,2897	0,2719	0,2507	0,2259	0,1899	0,1473	0,0872
28	0,3435	0,4169	0,6213	0,4092	0,3643	0,2887	0,2710	0,2502	0,2261	0,1905	0,1488	0,0894
30	0,3412	0,4151	0,6203	0,4106	0,3641	0,2878	0,2702	0,2496	0,2260	0,1907	0,1496	0,0906
34	0,3371	0,4117	0,6182	0,4127	0,3630	0,2857	0,2685	0,2482	0,2256	0,1907	0,1507	0,0925
37	0,3341	0,4093	0,6166	0,4139	0,3621	0,2840	0,2670	0,2470	0,2250	0,1906	0,1513	0,0937
41	0,3305	0,4068	0,6146	0,4153	0,3613	0,2817	0,2651	0,2451	0,2240	0,1902	0,1518	0,0949
45	0,3271	0,4052	0,6129	0,4163	0,3605	0,2794	0,2631	0,2433	0,2229	0,1897	0,1522	0,0958
49	0,3242	0,4041	0,6116	0,4171	0,3598	0,2774	0,2614	0,2414	0,2218	0,1891	0,1524	0,0966
50	0,3236	0,4039	0,6114	0,4173	0,3597	0,2769	0,2610	0,2409	0,2215	0,1889	0,1524	0,0968

Tabelle 9.2: Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation 1

Variation 2												
Höhenparameter		Hybridparameter		Fraktale Parameter		Erweiterte Parameter						
S_a [m]	9,284e-06 - 6,971e-06	S_{dq} [m/m]	0,713 - 0,193	D [-]	2,433 - 2,194	Gradient [-]	0,318 - 0,145					
S_q [m]	1,341e-05 - 1,001e-05	S_{dq6} [m/m]	0,644 - 0,193	ξ_{\perp}^2 [m ²]	1,897e-05 - 1,416e-06	Exposition [-]	360,185 - 360,091					
S_{sk} [-]	-0,373 - -0,461	S_{dr} [%]	0,204 - 0,018	ξ_{\parallel} [m]	1,545e-04 - 1,721e-04	Profil- krümmung [-]	-342,181 - -406,858					
S_{ku} [-]	5,971 - 6,061	S_{10z} [m]	1,796e-04 - 1,104e-04	k [-]	1,662e-09 - 1,966e-09	Plan- krümmung [-]	419,415 - 432,215					
S_z [m]	1,831e-04 - 1,114e-04					g [-]	89,634 - 87,537					
Simulationsergebnisse												
Simulationsparameter: $F_N = 2$ N, $G = 1e^7$ Pa, $\eta = 0,01$ Pa·s, Simulationsdurchgänge: $i = 1, \dots, 12$												
ν	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}	μ_{11}	μ_{12}
1	0,0940	0,0928	0,0880	0,0854	0,0862	0,0818	0,0770	0,0789	0,0736	0,0699	0,0676	0,0644
2	0,1591	0,1576	0,1504	0,1471	0,1467	0,1395	0,1331	0,1338	0,1268	0,1206	0,1166	0,1114
3	0,2118	0,2098	0,2009	0,1968	0,1959	0,1864	0,1792	0,1793	0,1710	0,1630	0,1580	0,1513
4	0,2538	0,2516	0,2413	0,2365	0,2355	0,2243	0,2167	0,2164	0,2071	0,1982	0,1925	0,1846
5	0,2873	0,2847	0,2735	0,2679	0,2673	0,2547	0,2470	0,2466	0,2364	0,2270	0,2210	0,2123
6	0,3139	0,3110	0,2990	0,2929	0,2926	0,2790	0,2713	0,2710	0,2601	0,2506	0,2445	0,2351
7	0,3312	0,3281	0,3155	0,3090	0,3091	0,2949	0,2873	0,2872	0,2759	0,2666	0,2606	0,2509
8	0,3393	0,3360	0,3232	0,3165	0,3170	0,3024	0,2947	0,2950	0,2836	0,2744	0,2690	0,2591
9	0,3453	0,3419	0,3287	0,3219	0,3228	0,3080	0,2999	0,3007	0,2893	0,2802	0,2752	0,2652
10	0,3496	0,3462	0,3328	0,3258	0,3270	0,3120	0,3035	0,3050	0,2936	0,2846	0,2800	0,2699
11	0,3527	0,3494	0,3357	0,3286	0,3302	0,3150	0,3061	0,3082	0,2968	0,2878	0,2836	0,2734
13	0,3562	0,3534	0,3390	0,3319	0,3342	0,3187	0,3088	0,3123	0,3009	0,2921	0,2884	0,2782
14	0,3570	0,3545	0,3397	0,3328	0,3354	0,3196	0,3093	0,3136	0,3022	0,2934	0,2898	0,2797
15	0,3574	0,3551	0,3400	0,3333	0,3362	0,3202	0,3095	0,3146	0,3030	0,2943	0,2909	0,2808
17	0,3573	0,3555	0,3396	0,3335	0,3368	0,3204	0,3091	0,3156	0,3038	0,2951	0,2922	0,2821
19	0,3564	0,3551	0,3384	0,3329	0,3365	0,3197	0,3081	0,3160	0,3037	0,2952	0,2926	0,2825
21	0,3549	0,3543	0,3368	0,3319	0,3357	0,3187	0,3067	0,3160	0,3032	0,2947	0,2925	0,2824
23	0,3531	0,3532	0,3349	0,3304	0,3344	0,3174	0,3052	0,3157	0,3023	0,2940	0,2920	0,2819
25	0,3509	0,3519	0,3329	0,3288	0,3329	0,3159	0,3036	0,3152	0,3013	0,2931	0,2912	0,2811
28	0,3471	0,3495	0,3299	0,3260	0,3300	0,3134	0,3010	0,3143	0,2995	0,2915	0,2897	0,2796
30	0,3445	0,3477	0,3280	0,3241	0,3279	0,3117	0,2993	0,3135	0,2982	0,2904	0,2886	0,2783
34	0,3393	0,3443	0,3242	0,3202	0,3241	0,3085	0,2959	0,3118	0,2954	0,2881	0,2861	0,2756
37	0,3359	0,3420	0,3217	0,3177	0,3216	0,3066	0,2935	0,3105	0,2932	0,2863	0,2841	0,2735
41	0,3318	0,3392	0,3188	0,3147	0,3186	0,3045	0,2907	0,3087	0,2904	0,2840	0,2816	0,2707
45	0,3283	0,3368	0,3165	0,3123	0,3158	0,3028	0,2883	0,3071	0,2880	0,2819	0,2794	0,2682
49	0,3255	0,3348	0,3142	0,3106	0,3131	0,3014	0,2864	0,3060	0,2859	0,2798	0,2774	0,2660
50	0,3250	0,3343	0,3137	0,3103	0,3126	0,3011	0,2860	0,3058	0,2855	0,2793	0,2769	0,2655

Tabelle 9.3: Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation 2

Variation 3												
Höhenparameter		Hybridparameter		Fraktale Parameter			Erweiterte Parameter					
S_a [m]	9,284e-06 - 4,094e-06	S_{dq} [m/m]	0,713 - 0,315	D [-]	2,433 - 2,470	Gradient [-]	0,318 - 0,155					
S_q [m]	1,341e-05 - 5,915e-06	S_{dq6} [m/m]	0,644 - 0,284	ξ_{\perp}^2 [m ²]	1,897e-05 - 8,366e-06	Exposition [-]	360,185					
S_{sk} [-]	-0,373	S_{dr} [%]	0,204 - 0,045	ξ_{\parallel} [m]	1,545e-04	Profil- kurvatur [-]	-342,181 - -150,906					
S_{ku} [-]	5,971	S_{10z} [m]	1,796e-04 - 7,092e-05	k [-]	1,662e-09 - 6,851e-10	Plan- kurvatur [-]	419,415 - 184,968					
S_z [m]	1,831e-04 - 8,074e-05					g [-]	89,634					
Simulationsergebnisse												
Simulationsparameter: $F_N = 2$ N, $G = 1e^7$ Pa, $\eta = 0,01$ Pa·s, Simulationsdurchgänge: $i = 1, \dots, 12$												
v	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}	μ_{11}	μ_{12}
1	0,0911	0,0851	0,0807	0,0747	0,0690	0,0671	0,0614	0,0545	0,0458	0,0433	0,0371	0,0307
2	0,1561	0,1465	0,1385	0,1291	0,1204	0,1138	0,1050	0,0947	0,0816	0,0751	0,0647	0,0546
3	0,2085	0,1963	0,1860	0,1746	0,1633	0,1531	0,1422	0,1293	0,1129	0,1034	0,0898	0,0765
4	0,2503	0,2364	0,2247	0,2120	0,1985	0,1856	0,1737	0,1587	0,1398	0,1282	0,1120	0,0963
5	0,2837	0,2684	0,2560	0,2426	0,2271	0,2123	0,1998	0,1834	0,1628	0,1499	0,1317	0,1139
6	0,3103	0,2940	0,2813	0,2675	0,2504	0,2341	0,2215	0,2040	0,1822	0,1687	0,1489	0,1295
7	0,3275	0,3108	0,2978	0,2841	0,2661	0,2490	0,2365	0,2185	0,1962	0,1827	0,1621	0,1418
8	0,3356	0,3188	0,3052	0,2921	0,2738	0,2564	0,2443	0,2264	0,2042	0,1910	0,1703	0,1499
9	0,3415	0,3247	0,3105	0,2980	0,2795	0,2619	0,2501	0,2323	0,2103	0,1975	0,1767	0,1562
10	0,3459	0,3291	0,3143	0,3024	0,2836	0,2661	0,2545	0,2369	0,2151	0,2027	0,1819	0,1613
11	0,3490	0,3324	0,3169	0,3058	0,2867	0,2692	0,2579	0,2404	0,2188	0,2068	0,1860	0,1655
13	0,3526	0,3365	0,3198	0,3102	0,2904	0,2732	0,2626	0,2452	0,2240	0,2129	0,1923	0,1717
14	0,3535	0,3376	0,3205	0,3116	0,2913	0,2744	0,2642	0,2468	0,2258	0,2152	0,1946	0,1740
15	0,3539	0,3382	0,3207	0,3126	0,2918	0,2753	0,2654	0,2479	0,2271	0,2171	0,1966	0,1760
17	0,3538	0,3384	0,3204	0,3139	0,2918	0,2761	0,2669	0,2493	0,2290	0,2200	0,1995	0,1791
19	0,3528	0,3378	0,3192	0,3143	0,2908	0,2761	0,2677	0,2497	0,2301	0,2220	0,2015	0,1812
21	0,3511	0,3368	0,3177	0,3140	0,2893	0,2756	0,2679	0,2494	0,2306	0,2235	0,2029	0,1827
23	0,3491	0,3354	0,3159	0,3134	0,2873	0,2747	0,2677	0,2487	0,2308	0,2245	0,2037	0,1837
25	0,3469	0,3338	0,3139	0,3126	0,2852	0,2735	0,2672	0,2477	0,2308	0,2252	0,2042	0,1843
28	0,3435	0,3311	0,3108	0,3111	0,2816	0,2715	0,2661	0,2459	0,2304	0,2257	0,2046	0,1849
30	0,3412	0,3290	0,3087	0,3099	0,2791	0,2699	0,2651	0,2445	0,2300	0,2258	0,2046	0,1850
34	0,3371	0,3250	0,3049	0,3074	0,2740	0,2667	0,2628	0,2415	0,2289	0,2256	0,2044	0,1850
37	0,3341	0,3223	0,3023	0,3054	0,2703	0,2644	0,2609	0,2391	0,2279	0,2252	0,2041	0,1848
41	0,3305	0,3190	0,2990	0,3029	0,2655	0,2613	0,2585	0,2357	0,2264	0,2246	0,2036	0,1843
45	0,3271	0,3162	0,2958	0,3005	0,2612	0,2586	0,2561	0,2323	0,2248	0,2237	0,2030	0,1836
49	0,3242	0,3137	0,2930	0,2981	0,2573	0,2561	0,2538	0,2291	0,2232	0,2228	0,2022	0,1828
50	0,3236	0,3132	0,2923	0,2975	0,2564	0,2555	0,2532	0,2283	0,2228	0,2225	0,2020	0,1826

Tabelle 9.4: Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation 3

Variation 4												
Höhenparameter		Hybridparameter		Fraktale Parameter		Erweiterte Parameter						
S_a [m]	9,284e-06 - 4,308e-05	S_{dq} [m/m]	0,713 - 3,309	D [-]	2,433 - 2,347	Gradient [-]	0,318 - 0,850					
S_q [m]	1,341e-05 - 6,224e-05	S_{dq6} [m/m]	0,644 - 2,986	ξ_1^2 [m ²]	1,897e-05 - 8,802e-05	Exposition [-]	360,185					
S_{sk} [-]	-0,373	S_{dr} [%]	0,204 - 3,376	$\xi_{ }$ [m]	1,545e-04	Profil- kurvatur [-]	-342,181 - -1587,784					
S_{ku} [-]	5,971	S_{10z} [m]	1,796e-04 - 8,335e-04	k [-]	1,662e-09 - 8,877e-09	Plan- kurvatur [-]	419,415 - 1946,158					
S_z [m]	1,831e-04 - 8,500e-04					g [-]	89,634					
Simulationsergebnisse												
Simulationsparameter: $F_N = 2$ N, $G = 1e^7$ Pa, $\eta = 0,01$ Pa·s, Simulationsdurchgänge: $i = 1, \dots, 12$												
v	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}	μ_{11}	μ_{12}
1	0,0911	0,1212	0,1606	0,1778	0,2412	0,2576	0,2521	0,3017	0,3409	0,4088	0,3778	0,3621
2	0,1561	0,2042	0,2636	0,2878	0,3435	0,3926	0,3848	0,4480	0,4863	0,5744	0,5296	0,5014
3	0,2085	0,2678	0,3414	0,3702	0,4210	0,4919	0,4877	0,5578	0,5974	0,6999	0,6459	0,6140
4	0,2503	0,3163	0,3999	0,4312	0,4765	0,5634	0,5601	0,6371	0,6778	0,7887	0,7276	0,6939
5	0,2837	0,3533	0,4438	0,4761	0,5164	0,6148	0,6099	0,6937	0,7362	0,8525	0,7858	0,7506
6	0,3103	0,3813	0,4766	0,5093	0,5454	0,6521	0,6443	0,7344	0,7788	0,8992	0,8284	0,7927
7	0,3275	0,3979	0,4960	0,5281	0,5637	0,6736	0,6617	0,7583	0,8051	0,9291	0,8541	0,8181
8	0,3356	0,4041	0,5033	0,5343	0,5739	0,6820	0,6653	0,7685	0,8180	0,9466	0,8669	0,8309
9	0,3415	0,4082	0,5085	0,5379	0,5824	0,6880	0,6671	0,7763	0,8283	0,9608	0,8772	0,8421
10	0,3459	0,4108	0,5120	0,5399	0,5896	0,6924	0,6684	0,7825	0,8366	0,9720	0,8858	0,8517
11	0,3490	0,4123	0,5143	0,5410	0,5957	0,6955	0,6690	0,7873	0,8436	0,9812	0,8926	0,8610
13	0,3526	0,4132	0,5162	0,5414	0,6055	0,6986	0,6690	0,7946	0,8556	0,9949	0,9045	0,8805
14	0,3535	0,4128	0,5165	0,5409	0,6092	0,6992	0,6686	0,7975	0,8613	1,0001	0,9106	0,8906
15	0,3539	0,4123	0,5165	0,5402	0,6122	0,6993	0,6680	0,8001	0,8664	1,0051	0,9165	0,9007
17	0,3538	0,4108	0,5156	0,5390	0,6176	0,6994	0,6667	0,8053	0,8760	1,0149	0,9281	0,9195
19	0,3528	0,4089	0,5138	0,5385	0,6222	0,6990	0,6671	0,8102	0,8858	1,0235	0,9399	0,9379
21	0,3511	0,4068	0,5114	0,5382	0,6260	0,6991	0,6682	0,8160	0,8953	1,0312	0,9521	0,9565
23	0,3491	0,4046	0,5087	0,5382	0,6296	0,6994	0,6709	0,8225	0,9055	1,0379	0,9645	0,9745
25	0,3469	0,4024	0,5059	0,5390	0,6338	0,7001	0,6748	0,8291	0,9167	1,0448	0,9768	0,9922
28	0,3435	0,3993	0,5022	0,5415	0,6411	0,7028	0,6829	0,8403	0,9340	1,0561	0,9947	1,0176
30	0,3412	0,3975	0,5003	0,5438	0,6465	0,7060	0,6889	0,8480	0,9459	1,0641	1,0065	1,0349
34	0,3371	0,3948	0,4985	0,5498	0,6575	0,7143	0,7008	0,8649	0,9691	1,0809	1,0323	1,0740
37	0,3341	0,3935	0,4979	0,5548	0,6657	0,7214	0,7099	0,8773	0,9852	1,0944	1,0532	1,1046
41	0,3305	0,3931	0,4976	0,5617	0,6772	0,7332	0,7221	0,8938	1,0063	1,1144	1,0825	1,1443
45	0,3271	0,3938	0,4981	0,5690	0,6898	0,7470	0,7353	0,9104	1,0261	1,1374	1,1106	1,1826
49	0,3242	0,3947	0,4992	0,5766	0,7033	0,7602	0,7491	0,9273	1,0449	1,1603	1,1381	1,2200
50	0,3236	0,3949	0,4996	0,5785	0,7068	0,7636	0,7525	0,9316	1,0494	1,1660	1,1447	1,2291

Tabelle 9.5: Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation 4

Variation G							
Höhenparameter		Hybridparameter		Fraktale Parameter		Erweiterte Parameter	
S_a [m]	$9,284e^{-06}$	S_{dq} [m/m]	0,713	D [-]	2,433	Gradient [-]	0,318
S_q [m]	$1,341e^{-05}$	S_{dq6} [m/m]	0,644	ξ_{\perp}^2 [m ²]	$1,897e^{-05}$	Exposition [-]	360,185
S_{sk} [-]	-0,373	S_{dr} [%]	0,204	ξ_{\parallel} [m]	$1,545e^{-04}$	Profil-kurvatur [-]	-342,181
S_{ku} [-]	5,971	S_{10z} [m]	$1,796e^{-04}$	k [-]	$1,662e^{-09}$	Plan-kurvatur [-]	419,415
S_z [m]	$1,831e^{-04}$					g [-]	89,634
Simulationsergebnisse							
Simulationsparameter: $F_N = 2$ N, $\eta = 0,01$ Pa·s, Simulationsdurchgänge: $i = 1, \dots, 5$							
v	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5		
	$G = 1,87e^6$ Pa	$G = 1,60e^6$ Pa	$G = 1,33e^6$ Pa	$G = 1,10e^6$ Pa	$G = 0,78e^6$ Pa		
1	0,1602	0,1611	0,1618	0,1621	0,1623		
2	0,2793	0,2814	0,2833	0,2847	0,2864		
3	0,3501	0,3532	0,3562	0,3588	0,3628		
4	0,3908	0,3950	0,3993	0,4033	0,4101		
5	0,4158	0,4209	0,4264	0,4318	0,4414		
6	0,4317	0,4376	0,4442	0,4509	0,4635		
7	0,4418	0,4485	0,4562	0,4642	0,4798		
8	0,4483	0,4557	0,4645	0,4738	0,4926		
9	0,4525	0,4607	0,4705	0,4811	0,5030		
10	0,4553	0,4641	0,4750	0,4870	0,5121		
11	0,4572	0,4668	0,4787	0,4920	0,5202		
13	0,4592	0,4702	0,4841	0,4999	0,5343		
14	0,4595	0,4712	0,4861	0,5031	0,5405		
15	0,4596	0,4718	0,4876	0,5059	0,5461		
17	0,4590	0,4724	0,4899	0,5104	0,5561		
19	0,4580	0,4725	0,4917	0,5142	0,5649		
21	0,4569	0,4725	0,4932	0,5176	0,5729		
23	0,4559	0,4724	0,4944	0,5206	0,5801		
25	0,4547	0,4722	0,4955	0,5233	0,5866		
28	0,4528	0,4714	0,4965	0,5265	0,5950		
30	0,4515	0,4708	0,4969	0,5281	0,5998		
34	0,4486	0,4691	0,4969	0,5304	0,6077		
37	0,4462	0,4674	0,4963	0,5312	0,6120		
41	0,4430	0,4650	0,4950	0,5315	0,6163		
45	0,4397	0,4624	0,4934	0,5312	0,6193		
49	0,4369	0,4600	0,4918	0,5307	0,6214		
50	0,4362	0,4594	0,4914	0,5305	0,6218		

Tabelle 9.6: Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation G

Variation η												
Höhenparameter			Hybridparameter			Fraktale Parameter			Erweiterte Parameter			
S_a [m]	$9,284e^{-06}$		S_{dq} [m/m]	0,713		D [-]	2,433		Gradient [-]		0,318	
S_q [m]	$1,341e^{-05}$		S_{dq6} [m/m]	0,644		ξ_{\perp}^2 [m ²]	$1,897e^{-05}$		Exposition [-]		360,185	
S_{sk} [-]	-0,373		S_{dr} [%]	0,204		ξ_{\parallel} [m]	$1,545e^{-04}$		Profil-kurvatur [-]		-342,181	
S_{ku} [-]	5,971		S_{Ioz} [m]	$1,796e^{-04}$		k [-]	$1,662e^{-09}$		Plan-kurvatur [-]		419,415	
S_z [m]	$1,831e^{-04}$								g [-]		89,634	
Simulationsergebnisse												
Simulationsparameter: $F_N = 2$ N, $G = 1e^7$ Pa, Simulationsdurchgänge: $i = 1, \dots, 12$												
v	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	μ_{10}	μ_{11}	μ_{12}
	$\eta = 0,01$	$\eta = 0,02$	$\eta = 0,03$	$\eta = 0,04$	$\eta = 0,05$	$\eta = 0,06$	$\eta = 0,07$	$\eta = 0,08$	$\eta = 0,09$	$\eta = 0,10$	$\eta = 0,11$	$\eta = 0,12$
1	0,0815	0,1427	0,1950	0,2388	0,2751	0,3050	0,3254	0,3356	0,3430	0,3486	0,3526	0,3555
2	0,1427	0,2388	0,3050	0,3356	0,3486	0,3555	0,3588	0,3600	0,3600	0,3592	0,3579	0,3562
3	0,1950	0,3050	0,3430	0,3555	0,3596	0,3600	0,3586	0,3562	0,3535	0,3507	0,3480	0,3450
4	0,2388	0,3356	0,3555	0,3600	0,3592	0,3562	0,3526	0,3489	0,3450	0,3411	0,3373	0,3337
5	0,2751	0,3486	0,3596	0,3592	0,3553	0,3507	0,3460	0,3411	0,3364	0,3320	0,3284	0,3252
6	0,3050	0,3555	0,3600	0,3562	0,3507	0,3450	0,3391	0,3337	0,3291	0,3252	0,3219	0,3192
7	0,3254	0,3588	0,3586	0,3526	0,3460	0,3391	0,3329	0,3277	0,3234	0,3201	0,3172	0,3148
8	0,3356	0,3600	0,3562	0,3489	0,3411	0,3337	0,3277	0,3229	0,3192	0,3161	0,3135	0,3112
9	0,3430	0,3600	0,3535	0,3450	0,3364	0,3291	0,3234	0,3192	0,3157	0,3129	0,3105	0,3089
10	0,3486	0,3592	0,3507	0,3411	0,3320	0,3252	0,3201	0,3161	0,3129	0,3103	0,3086	0,3081
11	0,3526	0,3579	0,3480	0,3373	0,3284	0,3219	0,3172	0,3135	0,3105	0,3086	0,3082	0,3094
13	0,3575	0,3544	0,3421	0,3305	0,3224	0,3168	0,3126	0,3095	0,3081	0,3091	0,3121	0,3161
14	0,3588	0,3526	0,3391	0,3277	0,3201	0,3148	0,3107	0,3083	0,3086	0,3113	0,3154	0,3199
15	0,3596	0,3507	0,3364	0,3252	0,3180	0,3129	0,3093	0,3081	0,3101	0,3142	0,3190	0,3239
17	0,3601	0,3470	0,3312	0,3210	0,3145	0,3099	0,3081	0,3102	0,3151	0,3206	0,3263	0,3317
19	0,3597	0,3431	0,3270	0,3176	0,3115	0,3082	0,3096	0,3148	0,3209	0,3273	0,3334	0,3388
21	0,3586	0,3391	0,3234	0,3148	0,3093	0,3086	0,3133	0,3199	0,3269	0,3337	0,3396	0,3459
23	0,3571	0,3355	0,3205	0,3123	0,3081	0,3108	0,3177	0,3252	0,3327	0,3394	0,3462	0,3532
25	0,3553	0,3320	0,3180	0,3103	0,3085	0,3142	0,3222	0,3304	0,3380	0,3453	0,3529	0,3610
28	0,3526	0,3277	0,3148	0,3083	0,3113	0,3199	0,3292	0,3377	0,3459	0,3544	0,3638	0,3743
30	0,3507	0,3252	0,3129	0,3081	0,3142	0,3239	0,3337	0,3423	0,3513	0,3610	0,3720	0,3836
34	0,3470	0,3210	0,3099	0,3102	0,3206	0,3317	0,3417	0,3519	0,3630	0,3759	0,3892	0,4022
37	0,3440	0,3184	0,3085	0,3136	0,3256	0,3372	0,3479	0,3596	0,3731	0,3876	0,4019	0,4164
41	0,3401	0,3154	0,3083	0,3187	0,3321	0,3441	0,3567	0,3712	0,3872	0,4030	0,4195	0,4365
45	0,3364	0,3129	0,3101	0,3239	0,3380	0,3513	0,3662	0,3836	0,4011	0,4190	0,4376	0,4565
49	0,3329	0,3107	0,3133	0,3292	0,3438	0,3590	0,3770	0,3962	0,4152	0,4357	0,4562	0,4769
50	0,3320	0,3103	0,3142	0,3304	0,3453	0,3610	0,3797	0,3991	0,4190	0,4397	0,4607	0,4819

Tabelle 9.7: Texturparameter und Simulationsergebnisse der Variation η

Anhang C

Parameter	$P(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{40}x^4 + p_{31}x^3y + p_{50}x^5 + p_{41}x^4y$		
	Regressionskoeffizienten	Grenzen 95 %-Konfidenzintervall	Regressionsgüte
$g [-]$	$p_{00} = 1,073$	$(-0,5438; 2,689)$	SSE: 53,4 R^2 : 0,2067 Korr. R^2 : 0,2002 RMSE: 0,2083
	$p_{10} = 0,3958$	$(-0,07277; 0,8644)$	
	$p_{01} = -0,01118$	$(-0,02893; 0,006566)$	
	$p_{20} = -0,02752$	$(-0,06692; 0,01187)$	
	$p_{11} = -0,003504$	$(-0,008644; 0,001636)$	
	$p_{30} = 0,0007974$	$(-0,0004166; 0,002011)$	
	$p_{21} = 0,0002308$	$(-0,0002005; 0,000662)$	
	$p_{40} = -9,383e^{-06}$	$(-2,198e^{-05}; 3,214e^{-06})$	
	$p_{31} = -5,945e^{-06}$	$(-1,914e^{-05}; 7,251e^{-06})$	
	$p_{50} = 3,213e^{-08}$	$(6,685e^{-10}; 6,36e^{-08})$	
	$p_{41} = 5,165e^{-08}$	$(-7,982e^{-08}; 1,831e^{-07})$	
$D [-]$	$p_{00} = 0,512$	$(-0,8281; 1,852)$	SSE: 58,42 R^2 : 0,1321 Korr. R^2 : 0,1251 RMSE: 0,2178
	$p_{10} = 0,2338$	$(-0,1549; 0,6224)$	
	$p_{01} = -0,1915$	$(-0,7526; 0,3696)$	
	$p_{20} = -0,01697$	$(-0,04968; 0,01575)$	
	$p_{11} = -0,06577$	$(-0,2283; 0,09672)$	
	$p_{30} = 0,000525$	$(-0,0004872; 0,001537)$	
	$p_{21} = 0,004378$	$(-0,009255; 0,01801)$	
	$p_{40} = -7,014e^{-06}$	$(-1,775e^{-05}; 3,722e^{-06})$	
	$p_{31} = -0,0001126$	$(-0,0005299; 0,0003046)$	
	$p_{50} = 3,213e^{-08}$	$(-7,771e^{-10}; 6,504e^{-08})$	
	$p_{41} = 9,776e^{-07}$	$(-3,179e^{-06}; 5,134e^{-06})$	
$\xi_{\perp}^2 [\text{m}^2]$	$p_{00} = -0,06668$	$(-0,08359; -0,04978)$	SSE: 1,932 R^2 : 0,9713 Korr. R^2 : 0,9711 RMSE: 0,03961
	$p_{10} = 0,05189$	$(0,04579; 0,05798)$	
	$p_{01} = 4977$	$(4507; 5446)$	
	$p_{20} = -0,004928$	$(-0,005635; -0,004222)$	
	$p_{11} = 1020$	$(884,1; 1156)$	
	$p_{30} = 0,0002144$	$(0,0001797; 0,000249)$	
	$p_{21} = -65,11$	$(-76,51; -53,7)$	
	$p_{40} = -4,312e^{-06}$	$(-5,066e^{-06}; -3,558e^{-06})$	
	$p_{31} = 1,715$	$(1,366; 2,063)$	
	$p_{50} = 3,213e^{-08}$	$(2,615e^{-08}; 3,812e^{-08})$	
	$p_{41} = -0,0151$	$(-0,01858; -0,01163)$	
$\xi_{\parallel} [\text{m}]$	$p_{00} = -0,07597$	$(-0,2997; 0,1478)$	SSE: 54,24 R^2 : 0,1941 Korr. R^2 : 0,1876 RMSE: 0,2099
	$p_{10} = 0,03519$	$(-0,03242; 0,1028)$	
	$p_{01} = 930$	$(-586,9; 2447)$	
	$p_{20} = -0,003698$	$(-0,009929; 0,002534)$	
	$p_{11} = 295,5$	$(-143,8; 734,8)$	
	$p_{30} = 0,0001832$	$(-5,548e^{-05}; 0,0004218)$	
	$p_{21} = -20,03$	$(-56,89; 16,82)$	
	$p_{40} = -4,045e^{-06}$	$(-8,32e^{-06}; 2,29e^{-07})$	
	$p_{31} = 0,5188$	$(-0,6092; 1,647)$	
	$p_{50} = 3,213e^{-08}$	$(4,207e^{-10}; 6,385e^{-08})$	
	$p_{41} = -0,004515$	$(-0,01575; 0,006721)$	

Parameter	$P(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{40}x^4 + p_{31}x^3y + p_{50}x^5 + p_{41}x^4y$			
	Regressionskoeffizienten	Grenzen 95 %-Konfidenzintervall	Regressionsgüte	
$k [-]$	$p_{00} =$	-0,05577	(-0,07753; -0,03402)	SSE: 3,44 R^2 : 0,9489 Korr. R^2 : 0,9485 RMSE: 0,05286
	$p_{10} =$	0,05404	(0,04609; 0,062)	
	$p_{01} =$	4,783e+007	(4,174e+007; 5,392e+007)	
	$p_{20} =$	-0,005063	(-0,005995; -0,004132)	
	$p_{11} =$	9,837e+006	(8,073e+006; 1,16e+007)	
	$p_{30} =$	0,0002179	(0,0001719; 0,0002639)	
	$p_{21} =$	-6,291e+005	(-7,771e+005; -4,811e+005)	
	$p_{40} =$	-4,344e-006	(-5,349e-006; -3,338e-006)	
	$p_{31} =$	1,657e+004	(1,204e+004; 2,11e+004)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,415e-008; 4,012e-008)	
	$p_{41} =$	-145,9	(-191; -100,8)	
$S_a [m]$	$p_{00} =$	-0,0667	(-0,08346; -0,04994)	SSE: 1,899 R^2 : 0,9718 Korr. R^2 : 0,9716 RMSE: 0,03927
	$p_{10} =$	0,05186	(0,04581; 0,05791)	
	$p_{01} =$	1,017e+004	(9216; 1,112e+004)	
	$p_{20} =$	-0,004927	(-0,005627; -0,004226)	
	$p_{11} =$	2085	(1810; 2361)	
	$p_{30} =$	0,0002143	(0,00018; 0,0002487)	
	$p_{21} =$	-133,1	(-156,2; -110)	
	$p_{40} =$	-4,312e-006	(-5,06e-006; -3,564e-006)	
	$p_{31} =$	3,505	(2,798; 4,212)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,62e-008; 3,807e-008)	
	$p_{41} =$	-0,03087	(-0,03791; -0,02383)	
$S_q [m]$	$p_{00} =$	-0,06668	(-0,08358; -0,04978)	SSE: 1,932 R^2 : 0,9713 Korr. R^2 : 0,9711 RMSE: 0,03961
	$p_{10} =$	0,05189	(0,04579; 0,05799)	
	$p_{01} =$	7038	(6374; 7702)	
	$p_{20} =$	-0,004928	(-0,005635; -0,004222)	
	$p_{11} =$	1442	(1250; 1635)	
	$p_{30} =$	0,0002144	(0,0001797; 0,000249)	
	$p_{21} =$	-92,07	(-108,2; -75,95)	
	$p_{40} =$	-4,312e-006	(-5,066e-006; -3,558e-006)	
	$p_{31} =$	2,425	(1,931; 2,918)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,615e-008; 3,812e-008)	
	$p_{41} =$	-0,02136	(-0,02627; -0,01644)	
$S_{sk} [-]$	$p_{00} =$	-0,06347	(-0,3465; 0,2195)	SSE: 58,25 R^2 : 0,1346 Korr. R^2 : 0,1275 RMSE: 0,2175
	$p_{10} =$	0,04451	(-0,03985; 0,1289)	
	$p_{01} =$	-0,3353	(-1,112; 0,4411)	
	$p_{20} =$	-0,004231	(-0,0118; 0,003335)	
	$p_{11} =$	-0,09144	(-0,3163; 0,1334)	
	$p_{30} =$	0,000196	(-7,918e-005; 0,0004712)	
	$p_{21} =$	0,006476	(-0,01239; 0,02534)	
	$p_{40} =$	-4,153e-006	(-8,742e-006; 4,372e-007)	
	$p_{31} =$	-0,0001705	(-0,0007479; 0,0004068)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(-7,307e-010; 6,5e-008)	
	$p_{41} =$	1,497e-006	(-4,255e-006; 7,248e-006)	

Parameter	$P(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{40}x^4 + p_{31}x^3y + p_{50}x^5 + p_{41}x^4y$			
	Regressionskoeffizienten	Grenzen 95 %-Konfidenzintervall	Regressionsgüte	
S_{ku} [-]	$p_{00} =$	0,1325	(-0,0477; 0,3127)	SSE: 55,54 R^2 : 0,1749 Korr. R^2 : 0,1682 RMSE: 0,2124
	$p_{10} =$	0,1081	(0,05235; 0,1638)	
	$p_{01} =$	-0,01185	(-0,03753; 0,01382)	
	$p_{20} =$	-0,008579	(-0,01393; -0,003224)	
	$p_{11} =$	-0,004782	(-0,01222; 0,002652)	
	$p_{30} =$	0,0003087	(8,977e-005; 0,0005276)	
	$p_{21} =$	0,0003152	(-0,0003085; 0,000939)	
	$p_{40} =$	-5,134e-006	(-9,338e-006; -9,296e-007)	
	$p_{31} =$	-8,028e-006	(-2,712e-005; 1,106e-005)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(4,498e-011; 6,422e-008)	
$p_{41} =$	6,926e-008	(-1,209e-007; 2,594e-007)		
S_{dq} [m/m]	$p_{00} =$	-0,0574	(-0,08738; -0,02742)	SSE: 6,34 R^2 : 0,9058 Korr. R^2 : 0,905 RMSE: 0,07177
	$p_{10} =$	0,05458	(0,04368; 0,06548)	
	$p_{01} =$	0,1255	(0,1033; 0,1476)	
	$p_{20} =$	-0,005109	(-0,006379; -0,003838)	
	$p_{11} =$	0,02484	(0,01842; 0,03125)	
	$p_{30} =$	0,000219	(0,0001564; 0,0002816)	
	$p_{21} =$	-0,001576	(-0,002114; -0,001038)	
	$p_{40} =$	-4,353e-006	(-5,718e-006; -2,988e-006)	
	$p_{31} =$	4,158e-005	(2,512e-005; 5,804e-005)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,129e-008; 4,297e-008)	
$p_{41} =$	-3,667e-007	(-5,306e-007; -2,027e-007)		
S_{dq6} [m/m]	$p_{00} =$	-0,0592	(-0,08794; -0,03047)	SSE: 5,768 R^2 : 0,9143 Korr. R^2 : 0,9136 RMSE: 0,06845
	$p_{10} =$	0,05415	(0,04372; 0,06458)	
	$p_{01} =$	0,1404	(0,1169; 0,164)	
	$p_{20} =$	-0,00508	(-0,006295; -0,003866)	
	$p_{11} =$	0,02789	(0,02108; 0,0347)	
	$p_{30} =$	0,0002183	(0,0001585; 0,000278)	
	$p_{21} =$	-0,00177	(-0,002342; -0,001199)	
	$p_{40} =$	-4,347e-006	(-5,649e-006; -3,044e-006)	
	$p_{31} =$	4,67e-005	(2,921e-005; 6,42e-005)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,179e-008; 4,247e-008)	
$p_{41} =$	-4,118e-007	(-5,861e-007; -2,375e-007)		
S_{dr} [%]	$p_{00} =$	-0,0045	(-0,03122; 0,02222)	SSE: 7,338 R^2 : 0,891 Korr. R^2 : 0,8901 RMSE: 0,07721
	$p_{10} =$	0,06543	(0,05493; 0,07592)	
	$p_{01} =$	0,1232	(0,09967; 0,1468)	
	$p_{20} =$	-0,005804	(-0,007099; -0,004509)	
	$p_{11} =$	0,02362	(0,01679; 0,03044)	
	$p_{30} =$	0,0002374	(0,0001714; 0,0003034)	
	$p_{21} =$	-0,001483	(-0,002056; -0,00091)	
	$p_{40} =$	-4,515e-006	(-5,978e-006; -3,052e-006)	
	$p_{31} =$	3,914e-005	(2,161e-005; 5,667e-005)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,047e-008; 4,38e-008)	
$p_{41} =$	-3,454e-007	(-5,2e-007; -1,708e-007)		

Parameter	$P(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{40}x^4 + p_{31}x^3y + p_{50}x^5 + p_{41}x^4y$			
	Regressionskoeffizienten	Grenzen 95 %-Konfidenzintervall	Regressionsgüte	
S_z [m]	$p_{00} =$	-0,07038	(-0,09356; -0,0472)	SSE: 3,501 R^2 : 0,948 Korr. R^2 : 0,9476 RMSE: 0,05333
	$p_{10} =$	0,05167	(0,04336; 0,05998)	
	$p_{01} =$	519,9	(453,3; 586,5)	
	$p_{20} =$	-0,004921	(-0,005878; -0,003964)	
	$p_{11} =$	104,3	(85,01; 123,6)	
	$p_{30} =$	0,0002141	(0,0001673; 0,0002609)	
	$p_{21} =$	-6,633	(-8,252; -5,013)	
	$p_{40} =$	-4,31e-006	(-5,325e-006; -3,294e-006)	
	$p_{31} =$	0,1749	(0,1253; 0,2244)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,408e-008; 4,019e-008)	
	$p_{41} =$	-0,001541	(-0,002035; -0,001048)	
S_p [m]	$p_{00} =$	-0,06796	(-0,09111; -0,04481)	SSE: 3,554 R^2 : 0,9472 Korr. R^2 : 0,9468 RMSE: 0,05373
	$p_{10} =$	0,05216	(0,04383; 0,06048)	
	$p_{01} =$	1221	(1063; 1379)	
	$p_{20} =$	-0,004952	(-0,005913; -0,00399)	
	$p_{11} =$	245	(199,3; 290,7)	
	$p_{30} =$	0,0002149	(0,0001679; 0,000262)	
	$p_{21} =$	-15,57	(-19,41; -11,74)	
	$p_{40} =$	-4,317e-006	(-5,34e-006; -3,294e-006)	
	$p_{31} =$	0,4105	(0,2932; 0,5279)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,402e-008; 4,025e-008)	
	$p_{41} =$	-0,003619	(-0,004787; -0,00245)	
S_v [m]	$p_{00} =$	-0,07208	(-0,09542; -0,04874)	SSE: 3,504 R^2 : 0,9479 Korr. R^2 : 0,9475 RMSE: 0,05335
	$p_{10} =$	0,05133	(0,04298; 0,05968)	
	$p_{01} =$	-904,8	(-1021; -788,8)	
	$p_{20} =$	-0,004899	(-0,005859; -0,003939)	
	$p_{11} =$	-181,5	(-215,1; -147,9)	
	$p_{30} =$	0,0002135	(0,0001667; 0,0002604)	
	$p_{21} =$	11,54	(8,726; 14,36)	
	$p_{40} =$	-4,305e-006	(-5,321e-006; -3,289e-006)	
	$p_{31} =$	-0,3044	(-0,3906; -0,2181)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,407e-008; 4,019e-008)	
	$p_{41} =$	0,002683	(0,001823; 0,003542)	
S_{10z} [m]	$p_{00} =$	-0,07039	(-0,09328; -0,04749)	SSE: 3,416 R^2 : 0,9492 Korr. R^2 : 0,9488 RMSE: 0,05268
	$p_{10} =$	0,05165	(0,04344; 0,05986)	
	$p_{01} =$	530,1	(463,1; 597,2)	
	$p_{20} =$	-0,004919	(-0,005864; -0,003973)	
	$p_{11} =$	106,5	(87,02; 125,9)	
	$p_{30} =$	0,0002141	(0,0001679; 0,0002603)	
	$p_{21} =$	-6,77	(-8,4; -5,14)	
	$p_{40} =$	-4,31e-006	(-5,313e-006; -3,306e-006)	
	$p_{31} =$	0,1785	(0,1286; 0,2284)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,417e-008; 4,009e-008)	
	$p_{41} =$	-0,001573	(-0,00207; -0,001076)	

Parameter	$P(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{40}x^4 + p_{31}x^3y + p_{50}x^5 + p_{41}x^4y$			
	Regressionskoeffizienten	Grenzen 95 %-Konfidenzintervall	Regressionsgüte	
Gradient [-]	$p_{00} =$	-0,123	(-0,1583; -0,0878)	SSE: 5,292 R^2 : 0,9214 Korr. R^2 : 0,9207 RMSE: 0,06557
	$p_{10} =$	0,03988	(0,02803; 0,05173)	
	$p_{01} =$	0,5152	(0,4324; 0,598)	
	$p_{20} =$	-0,004152	(-0,005432; -0,002872)	
	$p_{11} =$	0,1069	(0,08291; 0,1309)	
	$p_{30} =$	0,0001939	(0,0001344; 0,0002534)	
	$p_{21} =$	-0,006852	(-0,008865; -0,004839)	
	$p_{40} =$	-4,132e-006	(-5,39e-006; -2,874e-006)	
	$p_{31} =$	0,0001805	(0,0001189; 0,0002421)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(2,223e-008; 4,204e-008)	
$p_{41} =$	-1,589e-006	(-2,203e-006; -9,755e-007)		
Exposition [-]	$p_{00} =$	-10,34	(-415,2; 394,5)	SSE: 60,92 R^2 : 0,09498 Korr. R^2 : 0,08763 RMSE: 0,2225
	$p_{10} =$	23,43	(-93,82; 140,7)	
	$p_{01} =$	0,02887	(-1,095; 1,153)	
	$p_{20} =$	-1,661	(-11,5; 8,175)	
	$p_{11} =$	-0,06483	(-0,3903; 0,2607)	
	$p_{30} =$	0,04116	(-0,2599; 0,3422)	
	$p_{21} =$	0,004595	(-0,02272; 0,03191)	
	$p_{40} =$	-0,0003502	(-0,003349; 0,002649)	
	$p_{31} =$	-0,0001136	(-0,0009494; 0,0007222)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(-1,474e-009; 6,574e-008)	
$p_{41} =$	9,594e-007	(-7,367e-006; 9,286e-006)		
Profil- krümmung [-]	$p_{00} =$	0,04627	(-0,02605; 0,1186)	SSE: 59,06 R^2 : 0,1226 Korr. R^2 : 0,1154 RMSE: 0,219
	$p_{10} =$	0,07562	(0,04658; 0,1047)	
	$p_{01} =$	-1,542e-005	(-5,538e-005; 2,455e-005)	
	$p_{20} =$	-0,006446	(-0,01008; -0,002814)	
	$p_{11} =$	-2,141e-006	(-1,372e-005; 9,434e-006)	
	$p_{30} =$	0,0002543	(6,779e-005; 0,0004407)	
	$p_{21} =$	1,318e-007	(-8,393e-007; 1,103e-006)	
	$p_{40} =$	-4,664e-006	(-8,81e-006; -5,174e-007)	
	$p_{31} =$	-3,579e-009	(-3,33e-008; 2,614e-008)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(-9,577e-010; 6,522e-008)	
$p_{41} =$	3,211e-011	(-2,639e-010; 3,282e-010)		
Plan- krümmung [-]	$p_{00} =$	0,04556	(-0,02453; 0,1156)	SSE: 56,97 R^2 : 0,1536 Korr. R^2 : 0,1468 RMSE: 0,2151
	$p_{10} =$	0,07475	(0,04642; 0,1031)	
	$p_{01} =$	1,548e-005	(-1,595e-005; 4,691e-005)	
	$p_{20} =$	-0,006389	(-0,009945; -0,002833)	
	$p_{11} =$	3,398e-006	(-5,703e-006; 1,25e-005)	
	$p_{30} =$	0,0002528	(6,991e-005; 0,0004358)	
	$p_{21} =$	-2,148e-007	(-9,784e-007; 5,487e-007)	
	$p_{40} =$	-4,652e-006	(-8,723e-006; -5,804e-007)	
	$p_{31} =$	5,61e-009	(-1,776e-008; 2,898e-008)	
	$p_{50} =$	3,213e-008	(-3,667e-010; 6,463e-008)	
$p_{41} =$	-4,919e-011	(-2,82e-010; 1,836e-010)		

Tabelle 9.8: Regressionskoeffizienten der Variationsanalyse

Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 1	1. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1986	9/1987
Heft 2	2. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1988	4/1989
Heft 3	Arbeiten aus dem Institut für Straßen-und Verkehrswesen	7/1989
Heft 4	Beiträge zum Ruhenden Verkehr	8/1989
Heft 5	Festkolloquium anlässlich der Vollendung des 60.Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. Gerd Steierwald	5/1990
Heft 6	3. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1990	4/1991
Heft 7	Wolfgang Hertkorn Veränderungen des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasbelastungen durch Geschwindigkeitsreduktion in untergeordneten städtischen Straßennetzen	2/1992
Heft 8	City Stuttgart - attraktive Innenstadt im Zentrum einer Agglomeration (Autofreie Innenstadt = Attraktive City?)	3/1992
Heft 9	Arbeiten aus dem Institut für Straßen-und Verkehrswesen	4/1992
Heft 10	Reinhard Unkhoff Der Einfluß des Schwerverkehrs auf Geschwindigkeitsverhalten und Pulkbildung auf Autobahnen	6/1992
Heft 11	Stefanos Bazis Interaktiver Straßenentwurf mit Hilfe der EDV	7/1992
Heft 12	Jiann-Sheng Wu Stochastische Simulation des Überholverhaltens auf zweistreifigen Landstraßen	7/1992

Heft 13	4. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1992	5/1993
Heft 14	Stephan Herkt Abstimmung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage und knotenpunktfreien Strecken an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen	4/1994
Heft 15	Von den Anfängen bis zur Gegenwart -Straßen- und Verkehrswesen an der Universität Stuttgart	9/1994
Heft 16	Ashraf Hamed Abwicklung des Lieferverkehrs innerörtlichen Hauptstraßen	10/1994
Heft 17	5. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1994	3/1995
Heft 18	Chronik und Retrospektive - Gerd Steierwald und das Institut für Straßen- und Verkehrswesen	10/1995
Heft 19	Heiko Tempel Zusammenhänge zwischen Verkehrsablauf, Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen im städtischen Busverkehr	11/1995
Heft 20	Volker Mörgenthaler Strategien zur Verminderung der Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen des Nutzfahrzeugverkehrs in Ballungsgebieten	2/1996
Heft 21	Martin Schmid Auswirkungen der Kraftstoffbesteuerung auf die Pkw-Fahrleistungen im Freizeitverkehr	11/1996
Heft 22	Burkhard Flasche Fahrraubewirtschaftung mit Sonderfahrstreifen für ausgewählte Stadtverkehre	2/1998
Heft 23	Szabolcs Törgyeges Ableitung spezifischer Abgas-Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeugkollektive anhand von Konzentrationsmessungen in einem städtischen Straßentunnel	3/1998

Heft 24	Konrad von Kirchbach Zur Entwicklung der Straßen in Württemberg zwischen 1700 bis 1918	3/2000
Heft 25	6. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1999	3/2009
Heft 26	Symposium Stadt und Verkehr – Mobile Konferenz	11/1999
Heft 27	„Institut 21“ Aufbruch in Forschung und Lehre (nicht erschienen)	
Heft 28	Arbeiten aus dem Institut für Straßen-und Verkehrswesen	7/2001
Heft 29	Stefan Denzinger Auswirkungen alternierender Telearbeit auf das Verkehrsverhalten	4/2001
Heft 30	7. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2001	3/2009
Heft 31	Prof. Elisabeth Deakin Changing Importance of Central Cities	8/2002
Heft 32	Walter Vogt, Matthias Lenz, Henrik Schwarz, Wilhelm Glaser, Margrit Glaser, Thomas Kuder Verkehrliche Auswirkungen von Teleshopping und Telecommerce auf die Mobilität privater Haushalte	6/2002
Heft 33	Christoph Hecht Modellierung des Zeitwahlverhaltens im Personenverkehr	2/2005
Heft 34	Henrik Schwarz Vergleich von Schallimmissionsmessungen bei Straßenverkehrslärm mit Standardisierten und Binauralen Geräten	11/2002
Heft 35	Peter Schick Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses	6/2003

Heft 36	Volker Schmid Reaktivierte Nebenbahnen und alternative Buskonzepte Vergleich von ökologischen Wirkungen	7/2003
Heft 37	8. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2003	3/2009
Heft 38	Matthias Lenz Auswirkungen des Ausbaus der verkehrlichen Infrastruktur auf das regionale Fernpendleraufkommen	2/2005
Heft 39	Steffen R. Herrmann Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaningverhalten auf Fahrbahnoberflächen	2/2008
Heft 40	Manuel Galster Modellierung von Anbindungen in Verkehrsplanungsmodellen	8/2009
Heft 41	10. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2008	8/2009
Heft 42	Johannes Schlaich Nutzung von Mobilfunkdaten für die Analyse der Routenwahl	6/2010
Heft 43	Florian Bitzer Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs	9/2010
Heft 44	Eileen Mandir Potential of Traffic Information to optimize Route and Departure Time Choice	7/2012
Heft 45	Anne Wolff Simulation of Pavement Surface Runoff using the Depth-Averaged Shallow Water Equations	3/2013
Heft 46	Stefan Alber Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung	3/2013

Heft 47	Thomas Otterstätter Methoden zur Erfassung von Verkehrsströmen und Fahrzeiten mit stationären fahrzeugwiedererkennenden Detektoren	8/2013
Heft 48	Bruno Arbter Numerische Bestimmung der akustischen Eigenschaften offenporiger Fahrbahnbeläge auf Basis ihrer rekonstruierten Geometrie	5/2014
Heft 49	Juliane Pillat Methoden zur Analyse und Prognose des Verkehrsaufkommens unter Berücksichtigung des Wetters auf Autobahnen	7/2014
Heft 50	Jochen Lohmiller Qualität des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten von Autobahnen - Bewertung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und Analyse von Einflussfaktoren	7/2014
Heft 51	Katrin Keller Modellierung und Optimierung des Verkehrsablaufs in Evakuierungssituationen	9/2014
Heft 52	Yaohua Xiong A Framework for Traffic Assignment with Explicit Route Generation	9/2014
Heft 53	Markus Weise Einflüsse der mikroskaligen Oberflächen- geometrie von Asphaltdeckschichten auf das Tribosystem Reifen-Fahrbahn	11/2015