

# Berührungslose Griffigkeitsmessung

Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19 S 11002 gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



*Forschungsstelle:*

Institut für Straßenwesen Aachen  
RWTH Aachen University

FKZ: 19 S 11002

*Projektleiter:*

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Bernhard Steinauer  
Prof. Dr. -Ing. habil. Markus Oeser

*Bearbeiter:*

Dr.-Ing. Dawei Wang  
Dr.-Ing. Andreas Ueckermann  
Dr.-Ing. Christian Schulze  
Dipl.-Ing. Andreas Schacht  
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. André Meyer  
Dipl.-Ing. Stefan Schmidt  
Dr. Xianhua Chen

Aachen, November 2012



## INHALTSANGABE

Der vorliegende Bericht befasst sich mit den Grundlagen der Berührungslosen Griffigkeitsmessung. Das Messkonzept, das hierbei verfolgt wird, besteht aus zwei Verfahrensschritten:

- der berührungslosen Messung der Fahrbahntextur (optischer Textursensor) und
- der Reibwertbestimmung auf Basis der gemessenen Textur und eines geeigneten Rechenalgorithmus.

Die Arbeit beschäftigt sich im Wesentlichen mit dem zweiten Verfahrensschritt: der Entwicklung und Überprüfung geeigneter Rechenverfahren zur Reibwertbestimmung aus der Textur. Die Entwicklung eines geeigneten Textursensors muss im Rahmen weiterführender Forschung erfolgen.

In einer Literaturrecherche werden zunächst die straßenbautechnischen Grundlagen der Griffigkeit und Griffigkeitsmessung mit einem Überblick über die aktuell eingesetzten (berührenden) Messgeräte herausgearbeitet.

In einem weiteren Kapitel wird die Untersuchungsmethodik erläutert. Im Zentrum der Untersuchungen stehen Griffigkeits- und Texturmessungen an einer repräsentativen Anzahl von Asphalt- und Betonoberflächen. Desweiteren werden die statistischen Verfahren beschrieben, die bei der Datenauswertung und Modellerstellung Verwendung finden.

Der Schwerpunkt der Arbeit bestand jedoch in der Erstellung mathematischer Rechenverfahren zur Berechnung der Straßengriffigkeit aus der optisch vermessenen Fahrbahntextur sowie deren Anwendung und Überprüfung. Insgesamt vier verschiedene mathematische Verfahren wurden im Verlaufe des Projektes entwickelt.

- ein Texturparametermodell (Ansatz 1)
- ein Gummireibungsmodell auf Basis der Theorie von B.N.J. Persson (Ansatz 2)
- ein empirisches Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Mikrotextur und der Griffigkeit (Ansatz 3), und
- ein Künstliches Neuronales Netzwerk (KNN) mit dem Ziel, auf die Ergebnisse der drei zuvor genannten mathematischen Verfahren (als Eingangsgrößen) aufzusetzen und über Lernprozesse die Ergebnisgenauigkeit dieser Verfahren noch weiter zu verbessern

Die Anwendung der mathematischen Verfahren ergab, dass die Griffigkeit mit einer mittleren Abweichung von nur  $\sigma(\mu) = 0,02$  aus der optisch vermessenen Textur berechnet werden kann. Hohe Bestimmtheitsmaße von  $R^2 = 0,97$  konnten erreicht werden. Damit ist die Genauigkeit bereits vergleichbar mit der Genauigkeit herkömmlicher, berührender Verfahren. Die Ergebnisse stellen einen wichtigen Grundstein für die Entwicklung der „Berührungslose Griffigkeitsmessung“ dar.



# INHALTSVERZEICHNIS

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

## TABELLENVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER TECHNIK.....</b>	<b>3</b>
2.1	Straßenbautechnische Grundlagen zur Griffigkeit .....	3
2.2	Textur und Topographie der Straßenoberfläche.....	4
2.2.1	Definition der Fahrbahntextur .....	4
2.2.2	Erfassung der Fahrbahntextur .....	5
2.2.3	Wirkung und Analyse der Fahrbahntextur .....	7
2.3	Betrachtung von kurz-, und langfristigen Einflüssen auf die Griffigkeitsänderung	14
2.4	Messung der Griffigkeit heute .....	16
2.4.1	Lokal messende (statische) Straßenmessverfahren .....	17
2.4.2	Kontinuierlich messende Straßenmessverfahren .....	18
2.5	Ansätze zur Berührungslosen Griffigkeitsmessung .....	31
<b>3</b>	<b>UNTERSUCHUNGSMETHODIK.....</b>	<b>33</b>
3.1	Bereitstellung repräsentativer Fahrbahnoberflächen .....	33
3.1.1	Probenherkunft.....	33
3.1.2	Konditionierung .....	36
3.2	Texturmessungen .....	37
3.2.1	Allgemeines.....	37
3.2.2	Messverfahren und Messprinzip.....	37
3.2.3	Anordnung der Messlinien.....	38
3.2.4	Qualität der Texturdaten.....	39
3.3	Griffigkeitsmessungen im Labor.....	40
3.3.1	Messverfahren SRT .....	40
3.3.2	Prüfstand nach Wehner/Schulze .....	41
3.4	Griffigkeitsmessungen in situ (ViaFriction) .....	43
<b>4</b>	<b>STATISTISCHE VERFAHREN.....</b>	<b>45</b>
4.1	Regressionsanalyse.....	45
4.1.1	Regressionsfunktion.....	45
4.1.2	Bestimmtheitsmaß $R^2$ .....	47
4.1.3	F-Statistik .....	47
4.2	Korrelation .....	48
4.2.1	Korrelationsarten.....	48
4.2.2	Ermittlung der Korrelationskoeffizienten .....	49
4.2.3	Statistischer Test.....	50
<b>5</b>	<b>MATHEMATISCHE VERFAHREN FÜR DIE BERÜHRUNGSLOSE GRIFFIGKEITSMESSUNG.....</b>	<b>51</b>
5.1	Texturparametermodell (Ansatz 1) .....	51
5.1.1	Modellfunktion.....	52

5.1.2	Bestimmung der Eindringtiefe .....	53
5.1.3	Charakterisierung der Makrotextur .....	55
5.1.4	Charakterisierung der Mikrotextur .....	57
5.1.5	Flächenschärfe.....	59
5.1.6	Multiple Regressionsanalyse.....	65
5.1.7	Fazit .....	65
5.2	Gummireibungsmodell (Ansatz 2) .....	66
5.2.1	Allgemeines zur Gummireibung.....	66
5.2.2	Das Gummireibungsmodell .....	69
5.2.3	Die „Flash“ Temperatur .....	72
5.2.4	Reibwertberechnungen .....	75
5.3	Empirisches Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Mikrotextur und Griffigkeit (Ansatz 3).....	75
5.3.1	Ermittlung von griffigkeitsrelevanten Mikrotexturkenngößen.....	76
5.3.2	Ableitung eines Zusammenhangs zwischen Mikrotextur und Griffigkeit.....	78
5.3.3	Anwendung des Modells .....	79
5.3.4	Ergänzung des Modells durch einen Parameter für Makrotextur .....	80
5.3.5	Fazit .....	81
5.4	Künstliche Neuronale Netzwerke (Ansatz 4) .....	82
5.4.1	Theoretischer Hintergrund für Künstliche Neuronale Netzwerke.....	82
5.4.2	Aufbau eines künstlichen Neurons .....	83
5.4.3	Architektur des Künstlichen Neuronalen Netzwerks .....	86
5.4.4	Training des Künstlichen Neuronalen Netzwerks (Lernprozess).....	88
<b>6</b>	<b>ANWENDUNG DER MATHEMATISCHEN VERFAHREN.....</b>	<b>92</b>
6.1	Anwendung des Texturparametermodells auf Asphaltoberflächen.....	92
6.1.1	Ergebnisse .....	92
6.1.2	Fazit .....	94
6.2	Anwendung des Gummireibungsmodells (Ansatz 2) .....	94
6.2.1	Berücksichtigung des Wasserfilms .....	94
6.2.2	Rechnerische Nachbildung des Griffigkeitsmessverfahrens nach Wehner/Schulze .....	95
6.2.3	Rechnerische Nachbildung des ViaFriction-Messverfahrens .....	97
6.2.4	Fazit .....	100
6.3	Auswertung mit Hilfe von Künstlichen Neuronalen Netzwerken.....	100
6.3.1	Implementierung der Künstlichen Neuronalen Netzwerke mit dem computergestützten Programm MATLAB .....	100
6.3.2	Ergebnisse: Approximation der Rechenalgorithmen durch den Einsatz eines Künstlichen Neuronalen Netzwerkes.....	102
6.3.3	Fazit .....	103
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>104</b>
<b>8</b>	<b>AUSBLICK.....</b>	<b>106</b>

## **ANHANG**

**Anhang 1:** Griffigkeitsmessungen mit dem kontinuierlich messenden Griffigkeitsmesssystem ViaFriction

**Anhang 2:** Fotodokumentation der Oberflächenproben (Serie 1)

**Anhang 3:** Fotodokumentation der Oberflächenproben (Serie 2)

**Anhang 4:** Fotodokumentation der Oberflächenproben (Probekörper aus den Versuchsstrecken für ViaFriction-Messungen)

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Bild 1-1:	Konzept der Berührungslosen Griffigkeitsmessung (Berechnung des Reibwertes) .....	2
Bild 1-2:	Konzept der Berührungslosen Griffigkeitsmessung (Mittelung lokaler Reibwerte).....	2
Bild 2-1:	Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit der Unfälle und der Fahrbahngriffigkeit (Mayer, 2002).....	4
Bild 2-2:	Auswirkungen der Textur der Fahrbahnoberfläche (Huschek, 1996b).....	5
Bild 2-3:	Darstellung der Begriffe Profiltiefe PD und mittlere Profiltiefe MPD (DIN EN ISO 13473-1, 2004).....	8
Bild 2-4:	Darstellung des Begriffs Texturtiefe TD (DIN EN ISO 13473-1, 2004).....	9
Bild 2-5:	Kennzeichnung der unterschiedlichen Gestalt von Texturen anhand von Materialanteilkurven (Beckenbauer, 2003).....	9
Bild 2-6:	Rauheitsprofil einer Straßenoberfläche und zugehörige Höhendifferenzkorrelation (Klüppel, 2000) .....	10
Bild 2-7:	Ableitung der mittleren Spitzenform (Pinnington, 2007; Steinauer, 2008).....	11
Bild 2-8:	Beispiel eines Leistungsdichtespektrums für ein 10 cm langes Profil (Steinauer, 2008) .....	12
Bild 2-9:	Selbstähnliches Profil mit Textur auf verschiedenen Längenskalen (Thomas, 1982).....	13
Bild 2-10:	Schematische Darstellung der spektralen Leistungsdichte eines selbstähnlichen Profils (eindimensionales Leistungsdichtespektrum) oder einer selbstähnlichen Fläche (zweidimensionales Leistungsdichtespektrum).....	13
Bild 2-11:	Oberflächen unterschiedlicher fraktaler Dimension (Kucheryavski, 2005).....	14
Bild 2-12:	Griffigkeitsentwicklung während der Nutzungsdauer (Wilson, 2006) .....	15
Bild 3-1:	Darstellung dreier Oberflächenproben: Bohrkern in Mörtel eingefasst (links), Asphaltplatte aus dem Walzsektorverdichtungsgerät (mitte), Betonprobe (rechts) .....	34
Bild 3-2:	Häufigkeitsverteilung der Griffigkeitskennwerte der für die Modellierung angewendeten Probekörper. links: SRT-Werte, rechts: PWS-Werte .....	34
Bild 3-3:	Massive Granitplatte und ihr Oberflächenprofil (Steinauer et al., 2011).....	35
Bild 3-4:	Auf Holzplatte aufgeklebtes Schleifpapier (Wang, 2011) .....	35
Bild 3-5:	Aachener-Ravelling-Tester; Prinzipskizze (links), Realbild (rechts) .....	36
Bild 3-6:	Texturmessgerät mit Probekörper (in Mörtel eingefasster Asphaltbohrkern).....	38

Bild 3-7:	Anzahl und Anordnung der Messlinien auf den Probekörpern (links) und exemplarische Darstellung der gemessenen 10 cm langen Texturprofile (rechts) .....	39
Bild 3-8:	SRT-Pendelmessgerät (links) und Gleitgummi (rechts) .....	40
Bild 3-9:	Prüfstand Wehner/Schulze (links) mit Griffigkeitsmesseinheit (rechts) .....	41
Bild 3-10:	Messschrieb einer Griffigkeitsmessung im PWS (exemplarisch) .....	42
Bild 3-11:	Griffigkeitsmesssystem ViaFriction .....	44
Bild 4-1:	Übersicht der Korrelationsarten (Schatz, 2008) .....	48
Bild 5-1:	Charakterisierung der Textur mittels Rauheitskenngößen und Texturdeskriptoren .....	52
Bild 5-2:	Funktionale Teilung des Texturprofils in Kontakt- und Drainagebereich, unterschiedliche Ausprägung der Mikrotextur über die Profilhöhe .....	52
Bild 5-3:	Empirische Bestimmung der Eindringtiefe und des zugehörigen Materialanteils .....	54
Bild 5-4:	In Abhängigkeit der gemessenen Eindringtiefe ermittelter Materialanteil .....	54
Bild 5-5:	Ermittlung der Eindringtiefe aus der Textur mittels eines vorgegebenen Materialanteils .....	55
Bild 5-6:	Abweichungen zwischen der gemessenen und aus der Textur berechneten Eindringtiefe .....	55
Bild 5-7:	Kennzeichnung der zur Drainage zur Verfügung stehenden Querschnittfläche .....	55
Bild 5-8:	Reibwert in Abhängigkeit des Drainagevermögens bei gleicher Mikrotextur .....	56
Bild 5-9:	Normierter Reibwert in Abhängigkeit des Drainagevermögens .....	57
Bild 5-10:	Differenzierung zwischen einem Rundkorn und einem Brechkorn auf Basis der Höhe der Funktionswerte der zweiten Ableitung (schematische Darstellung) .....	58
Bild 5-11:	Kontaktbedingungen: Kontakt auf den Kuppen, Ablösungen im Bereich der Kerben .....	58
Bild 5-12:	Charakterisierung einzelner Rauheitselemente (Asperitäten) mittels Weg- und Höhendifferenzen .....	60
Bild 5-13:	Beispiel einer zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung der Weg- und Höhendifferenzen .....	60
Bild 5-14:	Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen, Kennzeichnung der Bereiche in denen Rauheitselemente entstehen bzw. abgebaut werden (qualitativ) .....	61
Bild 5-15:	Schematische Darstellung der Übertragung der Schnittpunkte der Häufigkeitsverteilungen der Weg- und Höhendifferenzen auf die zweidimensionale Häufigkeitsverteilung der Flächenschärfe 1. Ordnung .....	61

Bild 5-16:	Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung des unbeanspruchten Ausgangszustandes überlagert mit einer Polierbeanspruchung von 90.000 Überrollungen.....	62
Bild 5-17:	Definition der Hüllkurve für Profile unterschiedlicher globaler Rauheit (Flächenschärfe 2. Ordnung) .....	63
Bild 5-18:	Charakterisierung der Hüllkurve anhand von Weg- und Höhendifferenzen.....	63
Bild 5-19:	Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung mit Grenzen.....	64
Bild 5-20:	Aus der Textur berechneter Reibwert über gemessenen Reibwert.....	65
Bild 5-21:	Beispiel für die Spektrale Dichte einer Straßenoberfläche .....	70
Bild 5-22:	Beispiel für den E-Modul eines Gummis (idealisiert).....	71
Bild 5-23:	Beispiel für eine Kontaktfunktion $P(q)$ eines Gummis (Persson, 2006).....	72
Bild 5-24:	Infrarotaufnahme eines Reifens beim Bremsen (Persson, 2006).....	73
Bild 5-25:	Effekt einer Temperaturerhöhung auf den E-Modul von Gummi.....	73
Bild 5-26:	Temperaturverteilung für verschiedene Gleitgeschwindigkeiten $v$ als Funktion der Wegkreisfrequenz $q$ .....	74
Bild 5-27:	Ergebnis einer Reibwertberechnung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit .....	75
Bild 5-28:	Spektrale Leistungsdichte der Granitplatten (polierter Anfangszustand) mit Quarzmehl poliert (links) und mit Quarzsand poliert (rechts) .....	76
Bild 5-29:	Ermittlung der Kennwerte zur Beschreibung der Mikrorauheit anhand der linearisierten Leistungsdichte .....	77
Bild 5-30:	Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten SRT-Werten ( $N = 55$ ) anhand der Ergebnisse mit Angabe der Standardabweichung (rote Linien).....	78
Bild 5-31:	Oberflächen mit unterschiedlicher Welligkeit weisen (unter der Annahme konstanter $LPSD_{f=1}$ -Werte) auch unterschiedliche Griffigkeiten auf: $SRT_{w=3,2} < SRT_{w=2,8} < SRT_{w=2,2}$ (Kucheryavski, 2005).....	79
Bild 5-32:	SRT-Wert in Abhängigkeit von $w$ und $LPSD_{f=1}$ .....	79
Bild 5-33:	Zerlegung eines Profils in Makro- und Mikrotextrur (exemplarisch für einen Bohrkern).....	80
Bild 5-34:	Linearisierte Leistungsdichte und abgeleitete Texturindikatoren.....	80
Bild 5-35:	Ausflusszeit in Abhängigkeit von der mittlere Makrotexturtiefe der Proben .....	81
Bild 5-36:	Aufbau einer Nervenzelle (Ploner, 2010).....	83
Bild 5-37:	Datenverarbeitung eines Neurons (Kriesel, 2010) .....	84
Bild 5-38:	Struktur eines Neurons.....	84
Bild 5-39:	Die lineare Aktivierungsfunktion (links) und die hyperbolisch-tangenten Aktivierungsfunktion (rechts) (Mathworks, 2010) .....	85
Bild 5-40:	Architektur eines Künstlichen Neuronalen Netzwerkes.....	86

Bild 5-41:	lokale und globale Minima (Neuronales Netz, 2010).....	91
Bild 6-1:	Aus der Textur berechneter Reibwert über gemessenen Reibwert (Probekörperserie 1) .....	93
Bild 6-2:	Aus der Textur berechneter Reibwert über gemessenen Reibwert (Probekörperserie 1 und 2).....	93
Bild 6-3:	Korrelation zwischen gemessenem und gerechnetem Reibwert (Wehner/Schulze); rechts: dazugehörige Vertrauensbänder .....	97
Bild 6-4:	Lage der Messstrecken .....	98
Bild 6-5:	Korrelation zwischen gemessenem und gerechnetem Reibwert (ViaFriction); rechts: dazugehörige Vertrauensbänder – ohne Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur .....	99
Bild 6-6:	Korrelation zwischen gemessenem und gerechnetem Reibwert (ViaFriction); rechts: dazugehörige Vertrauensbänder – mit Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur .....	99
Bild 6-7:	Künstliches Neuronales Netzwerk mit dem computergestützten Programm MATLAB .....	100
Bild 6-8:	Training des KNN .....	101
Bild 6-9:	Approximationsgenauigkeit und Bestimmtheitsmaß $R^2$ des KNN für das Texturparametermodell (s. Kapitel 5.1). Links: auf Basis der Daten aus den gelegten Steinplatten für die Modellierung. Rechts: auf Basis der Daten aus den realen Oberflächen für die Validierung.....	102
Bild 6-10:	Approximationsgenauigkeit und Bestimmtheitsmaß $R^2$ des KNN für das Gummireibungsmodell (s. Kapitel 5.2) .....	102
Bild 6-11:	Approximationsgenauigkeit und Bestimmtheitsmaß $R^2$ des KNN für das Parametermodell auf Basis von Mikrotexturdaten (s. Kapitel 5.3).....	103

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1:	Standardmessbedingungen GripTester .....	19
Tabelle 2-2:	Standardmessbedingungen SCRIM .....	20
Tabelle 2-3:	Standardmessbedingungen SKM .....	20
Tabelle 2-4:	Standardmessbedingungen ADHERA .....	21
Tabelle 2-5:	Standardmessbedingungen SRM .....	22
Tabelle 2-6:	Standardmessbedingungen RoadStar .....	23
Tabelle 2-7:	Standardmessbedingungen Skiddometer BV-8 .....	24
Tabelle 2-8:	Standardmessbedingungen BV-11 und SFT .....	25
Tabelle 2-9:	Standardmessbedingungen Tatra Runway Tester .....	26
Tabelle 2-10:	Standardmessbedingungen Roar-DK .....	27
Tabelle 2-11:	Standardmessbedingungen ROAR-NL .....	28
Tabelle 2-12:	Standardmessbedingungen RWS-NL .....	28
Tabelle 4-1:	Korrelationskoeffizient sowie seine Bedeutung in Anlehnung an (Schatz, 2008) .....	50
Tabelle 5-1:	Übersicht für die untersuchten Probekörper .....	77
Tabelle 5-2:	Architektur des aufgebauten Künstlichen Neuronalen Netzwerks in Bild 5-40 .....	87
Tabelle 6-1:	Übersicht und Ergebnisse für die untersuchten Oberflächen .....	96
Tabelle 6-2:	Einflussgrößen für das Gummireibungsmodell (Wehner/Schulze) .....	97
Tabelle 6-3:	Übersicht und Ergebnisse für die untersuchten Oberflächen .....	98
Tabelle 6-4:	Einflussgrößen für das Gummireibungsmodell (ViaFriction) .....	100
Tabelle 6-5:	Datenauswertung mit KNN .....	102

## 1 Einleitung

Die Straßengriffigkeit spielt für die Verkehrssicherheit und daher auch volkswirtschaftlich gesehen eine wichtige Rolle. Im Rahmen eines Ressourcen schonenden, effektiven Managements der Straßenerhaltung ist eine regelmäßige, rationelle und kostensparende Überprüfung der Griffigkeit unerlässlich. Alle Baulasträger von Straßen (Bund, Länder, Kreise und Städte bzw. Gemeinden) haben im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht periodisch die Griffigkeit ihrer Straßen zu überprüfen. Sowohl Baulasträger als auch Baufirmen benötigen ein rationelles Verfahren für eine regelmäßige und sichere Erfassung der Griffigkeit.

Der Reibwert zwischen einem Messrad und der Straßenoberfläche wird zwar schon seit Jahren gemessen; diese Messmethode ist jedoch vergleichsweise aufwändig, da ein Lkw mit Wassertank zur Annässung der Straße benötigt wird. Darum ist sie reichweitenbegrenzt und teuer. Zudem unterliegt sie einer Reihe von Einflussfaktoren, die zum Teil schwer kontrollierbar sind: der Wasserfilmdicke, der Längs- und Querebenheit der Straße, den Kurvenradien, dem Geschwindigkeits-, Temperatur- und sogar Seitenwindeinfluss und den variablen Reifeneigenschaften einschließlich der Gummialterung.

Die bestehenden, berührenden Verfahren könnten zukünftig durch ein berührungsloses Messverfahren ersetzt werden, das aus der objektiven physikalischen Größe der Fahrbahntextur mittels eines gesicherten Berechnungsverfahrens die Griffigkeit bzw. den Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt. Ein zusätzlicher Vorteil für die Messgerätebetreiber, die im Auftrag von Bund, Ländern und Kommunen die Zustandserfassung des Straßennetzes durchführen, bestünde darin, dass sie künftig auch die Griffigkeit optisch erfassen könnten, wie es bereits bei den übrigen Zustandsmerkmalen der Fall ist. Eine leistungsfähigere, hoch integrierte und effektivere Zustandserfassung wäre die Folge. Gleichzeitig könnte damit auch das Problem der Vergleichbarkeit und Harmonisierung der unterschiedlichen in Europa verwendeten Griffigkeitsmessverfahren gelöst werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war, ein Konzept für die Berührungslose Griffigkeitsmessung zu entwerfen und Verfahren zur Ermittlung der Straßengriffigkeit aus der Textur der Straßenoberfläche vorzuschlagen und zu testen.

Das vorgeschlagene Konzept der „Berührungslosen Griffigkeitsmessung“ besteht aus zwei Verfahrensschritten (s. Bild 1-1):

- der berührungslosen Messung der Fahrbahntextur (optischer Textursensor) und
- der Reibwertbestimmung auf Basis der gemessenen Textur und eines geeigneten Rechenalgorithmus.

Das Forschungsvorhaben beschäftigte sich im Wesentlichen mit dem zweiten Verfahrensschritt: der Entwicklung geeigneter Rechenverfahren zur Reibwertbestimmung aus der Textur.

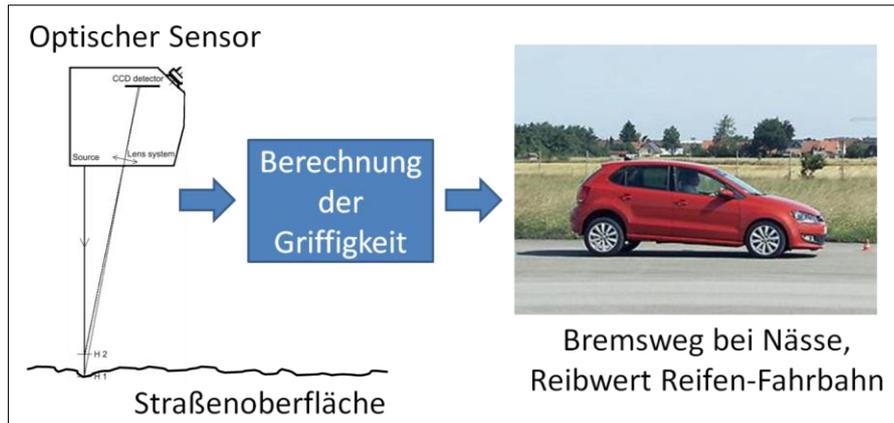


Bild 1-1: Konzept der Berührungslosen Griffigkeitsmessung (Berechnung des Reibwertes)

Zur Erläuterung der Berührungslosen Griffigkeitsmessung ist in Bild 1-2 in der linken Bildhälfte die gemessene Verzögerungs-Weg-Kurve eines aktuellen ABS-gebremsten Pkw abgebildet. Wie man unschwer erkennen kann, kennzeichnet sich die Vollverzögerungsphase nach einer gewissen Übergangsphase, bedingt durch Reaktions-, Ansprech- und Schwelldauer, durch eine annähernd konstante Verzögerung aus. Der Reibwert zwischen Straße und Fahrzeug kann in diesem Falle ganz leicht aus dem Quotienten aus Bremsverzögerung und Erdbeschleunigung ( $\mu = -a/g$ ) berechnet werden. Aus „Sicht des Fahrzeugs“ liegt also über einen Bremsweg von in diesem Falle 35 Metern ein konstanter Reibwert bzw. eine konstante Griffigkeit vor. Aus diesem Beispiel soll ersichtlich werden, dass das Fahrzeug mögliche lokale Griffigkeitsschwankungen entlang seines Bremsweges „ausmittelt“ und zu einem für diesen Abschnitt repräsentativen Reibwert „integriert“.

Für das Konzept der Berührungslosen Griffigkeitsmessung bedeutet das, dass für geeignete Abschnittslängen die lokalen Griffigkeitswerte zu einem repräsentativen Reibwert gemittelt werden können. Praktisch kann das so aussehen, dass Texturmessungen entlang der Straße in einem gewissen Raster vorgenommen werden (z.B. alle 2 Meter eine Texturmessung) und daraus die Griffigkeiten berechnet und anschließend zu 10m- oder 20m-Mittelwerten zusammengefasst werden. Die Berührungslose Griffigkeitsmessung stützt sich also auf die Mittelung lokaler Oberflächenerscheinungen, wie auch in Bild 1-2 (rechts) angedeutet.

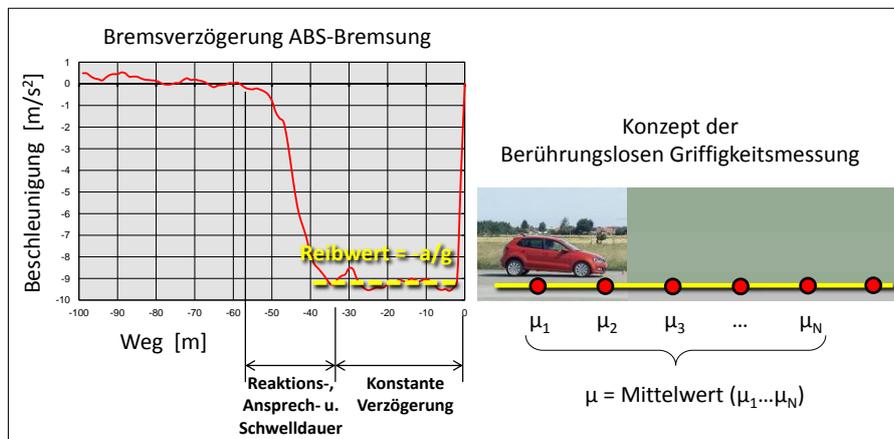


Bild 1-2: Konzept der Berührungslosen Griffigkeitsmessung (Mittelung lokaler Reibwerte)

## 2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden kurz die wesentlichen wissenschaftlichen Erkenntnisse über den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn sowie über die Griffigkeit von Oberflächen und die Textur dargestellt. Der Schwerpunkt wird dabei auf die Ansätze der Berührungslosen Griffigkeitsmessung gelegt.

### 2.1 Straßenbautechnische Grundlagen zur Griffigkeit

Beschleunigungs- als auch Verzögerungsvorgänge auf der Straßenoberfläche sowie Kurvenfahrten bedingen ein gutes Kraftschlussvermögen zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn. Alle hierfür erforderlichen Normal- und Tangentialkräfte werden von den Fahrzeugreifen übertragen. Zur Beschreibung dieser Kraftübertragung dient als maßgebliche Größe der Kraftschlussbeiwert, der auch Reibwert genannt wird (Huschek, 1975). Dabei gilt: Je größer der Reibwert, desto höher ist die auf die Straße übertragbare Kraft. Der in der Kontaktfläche Fahrzeugreifen/Straßenoberfläche mögliche Reibwert wird im Wesentlichen von vier Faktoren bestimmt (Pfeiler, 2004):

- Einflüsse des Reifens: Profilart, Profiltiefe, Schlupf, Gummizusammensetzung, Luftdruck.
- Einflüsse des Fahrzeuges: Geschwindigkeit, Radlast, Radstellung, Radlastschwankungen.
- Einflüsse des Zwischenmediums auf der Fahrbahn, wie Wasserfilm, Eis, Schnee, Schmutzfilm etc..
- Einflüsse der Straße: Oberflächentextur, Polierfähigkeit, Deckenbauart.

Hierbei können die Einflüsse des Reifens, des Fahrzeuges und eines eventuell vorhandenen Zwischenmediums durch die Straßenbautechnik nicht bzw. nur wenig beeinflusst werden. Die Einflüsse der Straße können dagegen durch entsprechende straßenbautechnische Maßnahmen, wie beispielsweise die Wahl einer entsprechenden Bauweise, die Optimierung der Mischgutzusammensetzung im Hinblick auf die verwendeten Gesteinsmaterialien etc., gesteuert werden.

Der Begriff Griffigkeit kennzeichnet die Wirkung der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche (wie z. B. der Textur) auf den Reibwert eines Fahrzeugreifens unter festgelegten Bedingungen (z. B. unter einer vorgesehenen Fahrgeschwindigkeit) (FGSV, 2004b); (TP Griff-StB (SKM), 2007). Die Griffigkeit ist eine der wichtigsten Kenngrößen der Straßenoberfläche, da sie einen unmittelbaren Einfluss auf die Verkehrssicherheit hat. Je höher die Griffigkeit der Fahrbahn ist, desto geringer ist das Risiko für Unfallgeschehen (s. Bild 2-1).

Demzufolge werden in den Regelwerken (z. B. ZTV Asphalt-StB, ZTV Beton-StB, ZTV BEA-StB, ZTV BEB-StB) Anforderungen an die Griffigkeit der fertigen Konstruktion für den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe bis hin zum Ablauf der Verjährungsfrist für die Mängelbeseitigung gestellt. Wird die für die Verkehrssicherheit notwendige Griffigkeit nicht gewährleistet, müssen entsprechende verkehrsrechtliche oder bauliche Maßnahmen gemäß (FGSV, 2012) ergriffen werden.

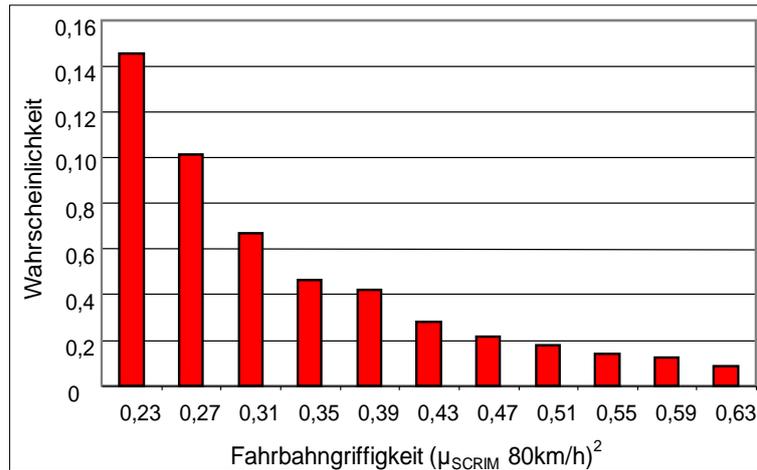


Bild 2-1: Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit der Unfälle und der Fahrbahngriffigkeit (Mayer, 2002)

## 2.2 Textur und Topographie der Straßenoberfläche

Ausgehend von der Definition der Griffigkeit, wird nachfolgend die stoffliche Beschaffenheit der Straßenoberfläche, insbesondere die geometrische Feingestalt (Textur), sowie ihr Einfluss auf die Griffigkeit dargestellt.

### 2.2.1 Definition der Fahrbahntextur

Als Textur (auch Rauheit genannt) einer Straßenoberfläche bezeichnet man die dreidimensionale geometrische Abweichung der Fahrbahnoberfläche von einer völlig ebenen Oberfläche. Diese bestimmt eine Reihe wichtiger praxisrelevanter Gebrauchseigenschaften der Straßenoberfläche, wie Griffigkeit, Reifen/Fahrbahn-Geräusch, Rollwiderstand und Sprühhahnenbildung. Sie hängt nicht nur von den Materialeigenschaften der Straßendecke ab, sondern wird auch durch den Einbauvorgang der Fahrbahn beeinflusst (Pfeiler, 2004).

Bei der Textur werden Mikro-, Makro- und Megatextur unterschieden. In Bild 2-2 sind die jeweiligen Texturbereiche in Abhängigkeit von der Wellenlänge mit ihren jeweiligen Auswirkungen dargestellt. Hiernach zählen zur Mikrotextur Rauheitselemente mit einer horizontalen Ausdehnung bis etwa 0,5 mm. Bei Rauheitselementen mit einer horizontalen Ausdehnung zwischen 0,5 mm und 50 mm spricht man von der Makrotextur. Hierbei beeinflussen jedoch nur Rauheitselemente bis zu einer Größenordnung von 10 mm die Drainagewirkung (FGSV, 2012; Huscek, 1996a). Ab einer horizontalen Ausdehnung von 50 mm schließt sich die Megatextur an. Diese hat im Allgemeinen keinen Einfluss auf die Griffigkeit, sondern beeinflusst lediglich die Bildung von Wasseransammlungen auf der Fahrbahn (FGSV, 2012; Krajcsir, 2004). Rauheitswellenlängen, die über 500 mm hinausgehen, stellen Unebenheiten der Fahrbahn dar, wobei die Ebenheit schon ab einer Wellenlänge von 100-200 mm den Fahrkomfort beeinflusst.

Es lässt sich somit sagen, dass die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche bei Nässe durch ihre Oberflächentextur, d. h. durch ihre Makro- und Mikrotextur bestimmt wird. Hierbei hat die Wahl des Größtkorns der Deckschicht auf die Makrotextur maßgeblichen Einfluss, wohingegen die Mikrotextur in der Hauptsache durch die Wahl der Gesteinsart bestimmt wird (FGSV, 2012; Krajcsir, 2004).

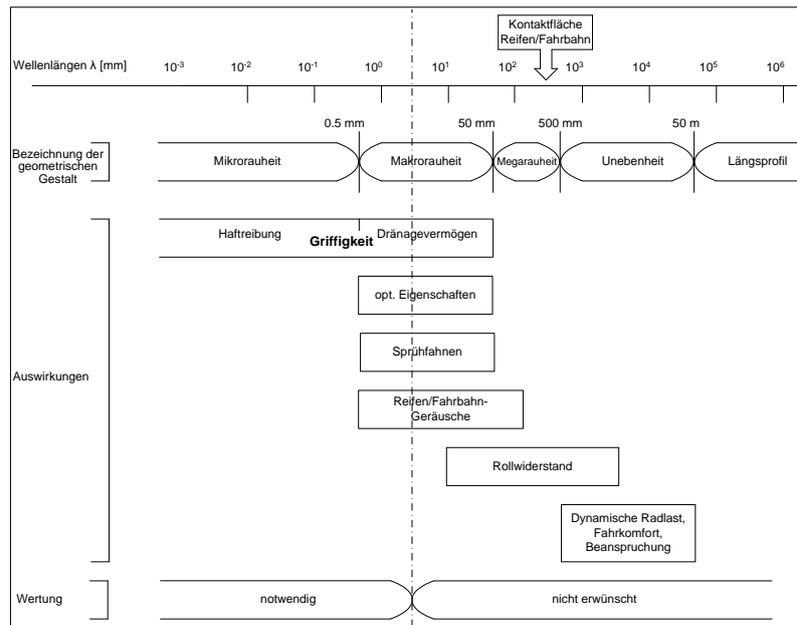


Bild 2-2: Auswirkungen der Textur der Fahrbahnoberfläche (Hushek, 1996b)

## 2.2.2 Erfassung der Fahrbahntextur

Unter den Technologien zur optischen Erfassung der Fahrbahntextur nimmt das Prinzip der Triangulation einen hohen Stellenwert ein. Im einfachsten Fall der Triangulation wird mit einem Laser ein Lichtpunkt auf das Messobjekt projiziert. Das vom Objekt diffus reflektierte Licht wird auf einem positionsempfindlichen Detektor (z. B. CCD-Zeilenkamera) abgebildet. Die unbekannte Objektkoordinate wird dann innerhalb eines Dreiecks aus den Koordinaten des Objekts, des Lichtemissionspunkts und des Detektionspunkts mit bekannter Basislänge (Abstand von Lichtemission zu Detektion) und den ebenfalls bekannten angrenzenden Winkeln bestimmt. Dabei steigt einerseits mit zunehmendem Winkel zwischen Laser und Detektor die Messauflösung, andererseits können bei einem großen Winkel bei nicht ebenen Objekten größere Objektbereiche abgeschattet werden. Gleichzeitig sinkt der Anteil des diffus reflektierten Lichts. In der Anwendung liegt der Winkel daher meist innerhalb eines Bereichs von 25 bis 45 Grad.

Eine Erweiterung des Triangulationsprinzips stellt das Lichtschnittverfahren dar. Hierbei wird anstelle des Laserpunkts eine Laserlinie auf das Objekt projiziert. Die dadurch entstehende Lichtebene schneidet das Objekt entlang einer Profillinie, die von der Kamera orts aufgelöst aufgenommen wird. Aus der Geometrie von Lichtstrahl und Kamera kann das Höhenprofil des Prüflings ermittelt werden. Um von einem solchen einzelnen Lichtschnitt zur Digitalisierung der gesamten Kontur zu kommen, muss entweder das Messobjekt oder die Sensoranordnung bewegt werden, was hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit der verwendeten Bewegungsachsen stellt.

Mit der Streifenprojektion als einem weiteren Triangulationsverfahren wird das Lichtschnittverfahren weiterentwickelt. Man versteht darunter die flächenhafte Projektion von Streifenmustern auf das Objekt und die anschließende Aufzeichnung des Schnittlinienbildes der Intensitätsverteilung auf der Objekt Oberfläche mit einem flächenhaften Detektor. Mit Hilfe von Phasenauswerteverfahren gewinnt man einen Messwert vom Objekt in Form eines Phasenwertes aus der phasenmodulierten Intensitätsverteilung. Mit der bekannten Geometrie der Messanordnung

werden daraus die 3D-Koordinaten des gesamten Messobjektes bestimmt. Als Projektionsgitter werden hochgenaue periodische Strichplatten verwendet. Seit einiger Zeit sind auch Mikrodisplays auf Basis von LCDs (Liquid Crystal Displays), LCoS (Liquid Crystal on Silicon) oder DMD (Digital Minimirror Displays, bestehend aus einem Array von bis zu 2048 x 1152 Mikrospiegeln) zur Streifengenerierung verfügbar. Damit kann die Streifenstruktur digital definiert werden.

Eine Erhöhung der Auflösung des Oberflächenprofils konnte durch eine Farbkodierung des verwendeten Signals erreicht werden (Hasman et al., 1999, 2001). Unter Verwendung von polychromatischer Beleuchtung in Kombination mit einem optischen Element, welches das einfallende Licht auf einen Streifen fokussiert und dabei in axialer Richtung in die einzelnen Wellenlängen zerlegt, wird eine Tiefenauflösung von mehr als 106 Schritten auf einem Gesamtbereich innerhalb des Fokus von annähernd 50 mm erreicht. Dies entspricht einer optischen Tiefenauflösung von unter 40 nm.

Laser-Triangulationssensoren kommen schon heute für die Textur- und Rauheitsmessung von Straßenoberflächen zum Einsatz, erreichen jedoch nicht die Auflösung und Messraten, die für die Berechnung der Griffigkeit benötigt werden. Bisherige Anwendungsbereiche sind deshalb im Wesentlichen auf die akustische Beurteilung von Fahrbahnbelägen und damit größtenteils auf die Makro- und Megatextur beschränkt.

Für alle Triangulationsverfahren gilt, dass die Bildaufnahme-Wiederholrate der zur Verfügung stehenden Kameras noch nicht ganz an die Anforderungen für den benötigten Mikrotextur-Sensor heran reichen. Neben den physikalischen Grenzen der Messunsicherheit, die bei Standard-Verfahren eine Messgenauigkeit im zweistelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich erlauben, treten auch durch die limitierte Messfrequenz Einschränkungen bei der Geschwindigkeit der Messwerterfassung auf.

Die Weißlicht-Interferometrie als Werkzeug zur zerstörungsfreien Vermessung von rauhen Oberflächen eignet sich ebenfalls nur sehr bedingt zur Bestimmung der Mikrotextur von Straßenbelägen. Die hohe Messgenauigkeit wird erreicht durch die Verwendung einer Weißlichtquelle mit einer kurzen Kohärenzlänge im  $\mu\text{m}$ -Bereich. Durch Verstellen der interferometrischen Anordnung gegenüber dem Messobjekt entstehen Interferenzen nur an den Punkten der Objekt Oberfläche, an denen sich die virtuelle, durch das Objekt gelegte Referenzebene mit der Oberfläche schneidet. Diese Interferenzen werden als Helligkeitsschwankungen auf einem Detektor registriert und von der System-Software ausgewertet. Ein langsames Verfahren der virtuellen Ebene liefert ein hochgenaues Höhenbild der Oberfläche. Einschränkung hinsichtlich des benötigten Sensors ist wiederum die geringe Messgeschwindigkeit. Ein typisches Einsatzgebiet liegt in der Vermessung von Münzen in einer einzigen Messung bei Messzeiten im Sekundenbereich.

Für eine großflächige Überwachung der Struktureigenschaften von Oberflächen, beispielsweise bei der Qualitätsprüfung und Bewertung der Formation unterschiedlicher Papiersorten werden Fourier-Optische Techniken eingesetzt (Keller et al., 2004). Unter der Formation versteht man dabei die Gleichmäßigkeit der partiellen Masse- bzw. Faserverteilung im Papier. Ungleichmäßige Verteilungen werden anhand von unterschiedlichen Lichtdurchlässigkeiten in der Papierbahn sichtbar. Das Fourier-Optische Verfahren folgt dem Prinzip der optischen Spektralanalyse. Pa-

ralleles kohärentes Licht wird in der Modulationsebene in seiner Amplitude oder Phase moduliert, in diesem Fall mit der 2D-Ortsfunktion des von einer Kamera aufgenommenen Papierbildes unter Verwendung eines räumlichen Lichtmodulators (Spatial Light Modulator, SLM). Eine Fourier-Linse bildet das modulierte Ortsfrequenzspektrum des einfallenden Lichts in die Spektralebene ab, wo der Bildsensor montiert ist. Die Tatsache, dass dieser Vorgang mit der Näherungsformel der diskreten Fourier-Transformation beschrieben werden kann, ist Basis für die Entwicklung eines solchen 2D-Spektralsensors und die verwendeten Auswertalgorithmen. Eine kompakte Variante des Spektralsensors mit einer schnellen Kamera für 200 Bilder/s liefert lückenlose Inspektionsdaten von einem Streifen für Bahngeschwindigkeiten bis zu 50 m/s. Texturelemente im Bereich von 0,6 bis 12 mm bei einer Auflösung von 0,5 mm/Pixel können damit erfasst werden, wobei die Größe der auszuwertenden Texturelemente durch veränderte Kamera-Einstellungen an die jeweilige Messaufgabe angepasst werden kann.

Abschätzungen zur Rauheit von Straßenoberflächen können auch mittels der Auswertung von Grauwertbildern vorgenommen werden (Khoudeir et al., 2004a). Ein solches Verfahren legt zunächst zugrunde, dass die Variationen in den Grauwerten von Kamerabildern der Straßenoberfläche repräsentativ für die örtlichen Variationen des Oberflächenprofils sind. Diese Annahme ist allerdings nur für farblich einheitliche Oberflächen gerechtfertigt. Ist dies nicht der Fall, muss zuvor eine Abschätzung über die räumliche Verteilung der spektralen Leuchtdichte vorgenommen werden, die die farblichen Variationen der Oberfläche berücksichtigt, so dass der Grauwert mit dem entsprechenden Höhenwert in Verbindung gesetzt werden kann. In (Khoudeir et al., 2004b) wird die Charakterisierung des Abnutzungs- bzw. Poliergrades von Straßenoberflächen basierend auf der statistischen Auswertung von Grauwertbildern untersucht. Das Verfahren berücksichtigt Mikrostrukturen im Bereich von 10 bis 100  $\mu\text{m}$ . Allerdings wird die benötigte Höheninformation unter Verwendung eines (langsamen) Autofocus-Lasersensors in einem Arbeitsabstand von wenigen Millimetern gewonnen. Sie erreicht dafür aber eine Auflösung, die besser als 0,10  $\mu\text{m}$  ist.

Mit der Rauheit der Oberfläche steigt auch der Anteil der Mehrfachreflexionen und damit die Polarisationsänderung des einfallenden Lichtes. Das kann ebenfalls zur Rauheitsmessung ausgenutzt werden. Im Rahmen einer Promotionsarbeit an der RWTH Aachen (Vogtmeier, 1998) ist ein System zur polarimetrischen Untersuchung der Mikrorauheit von Fahrbahnoberflächen entwickelt worden. Das Verfahren ist dazu geeignet, Rauheiten zu klassifizieren. Es liefert jedoch keine Messgrößen zur Geometrie oder Griffigkeit einer Fahrbahn, sondern beschreibt lediglich deren Polarisationsverhalten.

### **2.2.3 Wirkung und Analyse der Fahrbahntextur**

Entscheidend für die Aktivierung des Kraftschlusses zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn ist der unmittelbare Kontakt zwischen der Reifenoberfläche und der Gesteinskörnung der Fahrbahnoberfläche. Ist ein Zwischenmedium, wie beispielsweise Wasser, vorhanden, muss dieses durch den Fahrzeugreifen erst verdrängt werden. Betreffend des Einflusses der Textur auf den Kraftschluss des Reifens bei nasser Fahrbahn sind folgende sichere Rückschlüsse erlaubt (Schulze, 1970; Pfeiler, 2004):

- Bei geringen Geschwindigkeiten ist der Reibwert vom Drainagevermögen weitestgehend unabhängig und wird maßgeblich nur vom Grad der Schärfe der Straßenoberfläche bestimmt, wobei „schärfere“ Oberflächen einen höheren Reibwert liefern.
- Mit zunehmender Geschwindigkeit hängt der Reibwert stärker vom Drainagevermögen ab. Eine große Makrotextur hilft das Wasser abzuführen, so dass die Mikrorauheit wirken kann. Eine gute Makrotextur ist ohne eine entsprechende Mikrotextur nicht wirksam.

Die Fahrbahnoberfläche ist im Wesentlichen durch die räumliche Verteilung der Textur geprägt. Die Textur weist unterschiedliche Formen und Größen sowie bestimmte oder zufällige Abstände zueinander auf. Dies führt zu unterschiedlicher Zusammensetzung sowohl der Rauigkeitstiefen als auch der Rauigkeitswellenlängen. Aus zweidimensionalen Oberflächenprofilen lassen sich zahlreiche Kennwerte zur Charakterisierung der Textur berechnen und somit verschiedene Kenngrößen als Griffigkeitsindikatoren ableiten. In der (DIN EN ISO 13473-1, 2004) sind verschiedene Ansätze zur Charakterisierung der Fahrbahntextur enthalten. Ausgehend von dem zweidimensionalen Profil lassen sich folgende Parameter ermitteln (s. Bild 2-3):

- Die Profiltiefe (PD): beschreibt den Abstand zwischen dem Profil und einer horizontalen Linie durch den Maximalwert des Profils innerhalb einer bestimmten Strecke in Längs- oder Querrichtung, deren Länge in derselben Größenordnung wie die der Reifenaufstandsfläche liegt (DIN EN ISO 13473-1, 2004).
- Mittlere Profiltiefe (MPD): ist der Mittelwert der Profiltiefe über eine bestimmte Strecke (Grundlinie) (DIN EN ISO 13473-1, 2004).

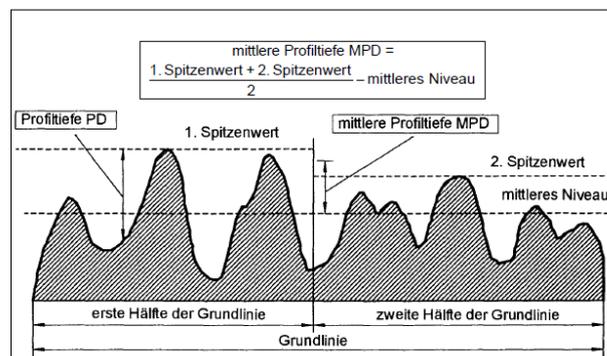


Bild 2-3: Darstellung der Begriffe Profiltiefe PD und mittlere Profiltiefe MPD (DIN EN ISO 13473-1, 2004)

Für eine dreidimensionale Fläche lässt sich die Texturtiefe (TD) ermitteln. Die Texturtiefe beschreibt den Abstand zwischen der Oberfläche und einer Ebene durch die Spitzen der drei höchsten Partikel innerhalb eines Bereichs der Oberfläche, der dieselbe Größenordnung wie die Reifenaufstandsfläche hat (DIN EN ISO 13473-1, 2004) (s. Bild 2-4).

Mit den oben genannten Indikatoren ist keine Differenzierung zwischen Mikro- und Makrotextur zu erzielen. Tendenziell ergibt sich eher ein Bezug zur Makrotextur, nicht aber zur gerade für die Griffigkeit so maßgeblichen Mikrotextur (DIN EN ISO 4287, 1999; DIN EN ISO 13473-1, 2004). Die mittlere Rauheit kann auch zur Bewertung der für das Drainagevermögen bei hoher Fahrgeschwindigkeit notwendigen Makrotextur dienen (Breuer, 1990).

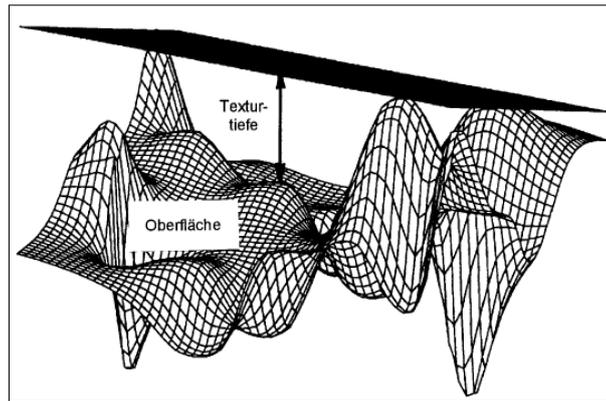


Bild 2-4: Darstellung des Begriffs Texturtiefe TD (DIN EN ISO 13473-1, 2004)

Die Textur kann beispielsweise auch anhand von Materialanteilkurven (Abbott-Kurve) beschrieben werden, welche sich im Wesentlichen in zwei Gruppen unterscheiden (Beckenbauer, 2003):

- Tendenziell konvexe Gestalt („Gebirge mit Tälern“),
- tendenziell konkave Gestalt („Plateaus mit Schluchten“).

In Bild 2-5 sind die zwei Gestalttypen am Beispiel zweier Deckschichten dargestellt. Auf der linken Seite sind deren Rauheitsprofile als Verlauf der Rauheitstiefen in Längsrichtung der Fahrbahnoberfläche über eine Länge von 100 mm und rechts die sogenannte Materialanteilkurve dargestellt. Diese gibt an, welcher prozentuale Anteil der maximal möglichen Kontaktlänge bei einer bestimmten relativen Profiltiefe erzielt wird. Dementsprechend beträgt der Tragflächenanteil an der tiefsten Stelle 100 %. Der Verlauf der Linien für die Tragflächenanteile ist bei den beiden Gestalttypen sehr verschieden und daher charakteristisch. Durch Abgreifen des Tragflächenanteilwertes bei der halben Profiltiefe ergibt sich der Gestaltfaktor  $g$ , welcher ein Maß zur Kennzeichnung der Texturgestalt darstellt. Eine tendenziell konkave Gestalt mit Gestaltfaktoren zwischen 60 % und 90 % entsteht bei allen gewalzten Oberflächen, eine tendenziell konvexe Gestalt mit Gestaltfaktoren zwischen 20 % und 60 % dagegen bei allen abgestreuten Oberflächen (Beckenbauer; 2003).

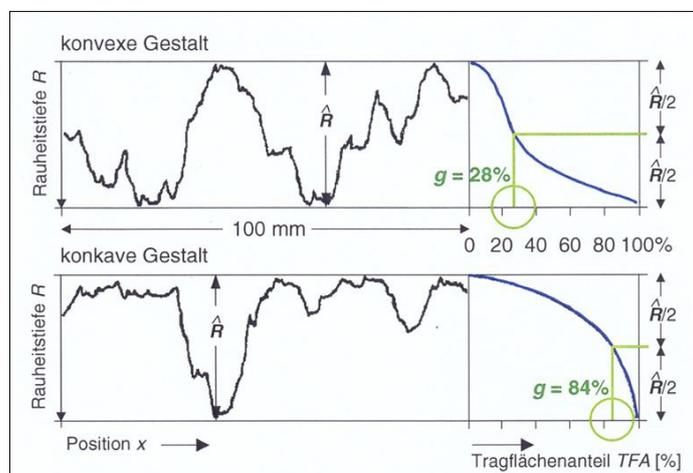


Bild 2-5: Kennzeichnung der unterschiedlichen Gestalt von Texturen anhand von Materialanteilkurven (Beckenbauer, 2003)

Der Gestaltfaktor wurde ursprünglich jedoch zur Beurteilung der Lärmemission von Fahrbahnoberflächen ermittelt. Nach (Beckenbauer, 2003) begünstigt eine konkave Gestalt eine größere Kontaktfläche, aber eine geringere Gummieindringtiefe. Eine konvexe Gestalt hingegen hat eine höhere Gummieindringtiefe, aber eine geringere Kontaktfläche. Welche Gestalt günstiger für die Griffigkeit ist, lässt sich bisher nicht beantworten.

Eine weitere Möglichkeit der Darstellung von Oberflächenprofilen sowie der daraus möglichen Ableitung von Kenngrößen, stellt die Anwendung der Höhendifferenzkorrelation (engl.: Height-Difference-Correlation, HDC) dar. Diese beruht auf der Annahme, dass die Straßenoberflächen selbstaffine (fraktale) Eigenschaften besitzen, d. h. dass sich unabhängig vom Beobachtungsmaßstab charakteristische geometrische Strukturen fortlaufend wiederholen. Die Höhendifferenzkorrelationsfunktion koppelt horizontale Abstände mit Höhenunterschieden, indem sie den horizontalen Längenabständen  $dx$  den Erwartungswert ihrer (quadratischen) Höhendifferenzen zuordnet.

$$\Gamma_H(dx) = \langle (z(x + dx) - z(x))^2 \rangle \quad (\text{Gl. 2-1})$$

Im doppelt-logarithmischen Maßstab aufgetragen, ergibt sich hieraus eine Kurve, die von kleinen Wegdifferenzen ausgehend bis zu einem sogenannten Cut-Off-Punkt linear ansteigt und danach unter geringen Schwankungen konstant bleibt (Klüppel, 2000). Aus der Kurve leiten sich die vertikale  $\xi_{\perp}^2$  und die horizontale  $\xi_{\parallel}$  Korrelationslänge, der spektrale Index  $w$  sowie die fraktalen Dimensionen  $D$  ab, mit denen sich der Verlauf des Graphen eindeutig und vollständig beschreiben lässt (s. Bild 2-6).

$$\Gamma_H(dx) = \xi_{\perp}^2 \cdot \left(\frac{dx}{\xi_{\parallel}}\right)^w \quad (\text{Gl. 2-2})$$

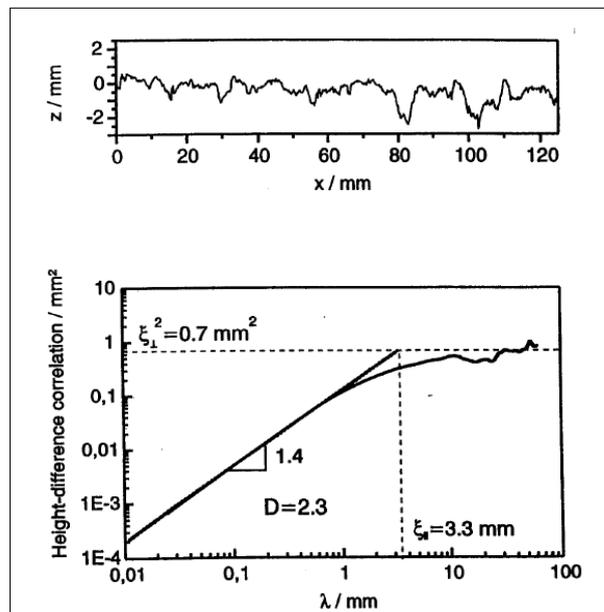


Bild 2-6: Rauheitsprofil einer Straßenoberfläche und zugehörige Höhendifferenzkorrelation (Klüppel, 2000)

Somit sind folgende Kenngrößen für das Rauheitsprofil einer Straßenoberfläche ausschlaggebend:

- $\xi_{\perp}^2$ : vertikale Korrelationslänge [mm<sup>2</sup>]
- $\xi_{\parallel}$ : horizontale Korrelationslänge [mm]
- $w$ : spektraler Index [-]
- $D$ : fraktale Dimension [-]

$$D = \frac{(6 - w)}{2} \quad (\text{Gl. 2-3})$$

Neben den drei genannten Kennwerten kann aus der HDC-Funktion die Quadratwurzel der mittleren Höhendifferenz bei einer Wegdifferenz von 10  $\mu\text{m}$  gewonnen werden, die sich als gutes Maß für den Einfluss der Rauigkeit auf die Griffigkeit von (Schramm, 2002) erwiesen hat.

Um zu gewährleisten, dass dem oberen Profilteil, d. h. den Gesteinsspitzen, eine übergeordnete Bedeutung zukommt, wurde als weitere Möglichkeit der Analyse der Oberflächen-/Texturprofile die mittlere Spitzenform (engl.: Mean Peak Shape, MPS) herangezogen. Zur Ermittlung der mittleren Spitzenform wird das Profil zunächst in gleich lange Intervalle  $\Delta x$  einer bestimmten Länge eingeteilt und in jedem Intervall der höchste Punkt mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus ermittelt. Die einzelnen Intervalle des Profils werden dann so gegeneinander verschoben, dass die höchsten Punkte deckungsgleich übereinanderliegen (Pinnington, 2007). Durch Mittelung der Profilhöhen der einzelnen Profilausschnitte, erhält man die charakteristische Spitzenform einer Oberfläche, deren Gestalt maßgeblich von der gewählten Intervalllänge abhängt. In Bild 2-7 ist beispielhaft die mittlere Spitzenform in Abhängigkeit von der verwendeten Gesteinsart dargestellt.

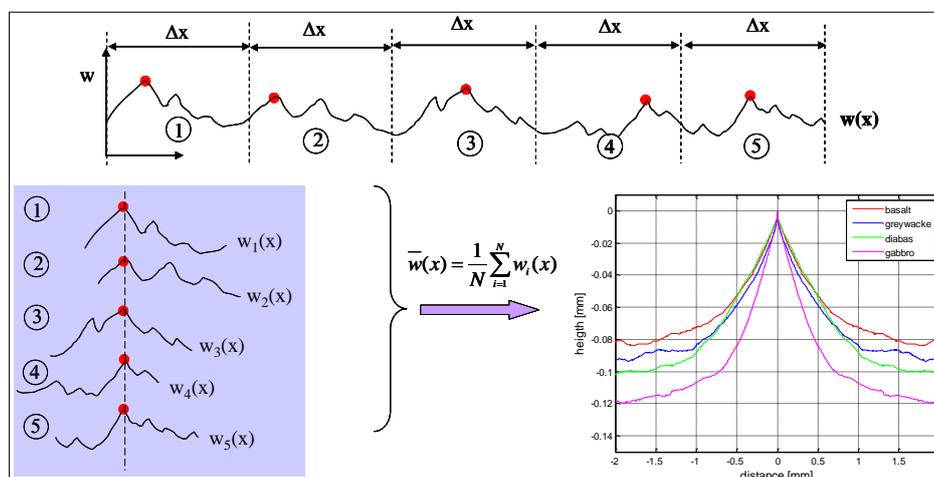


Bild 2-7: Ableitung der mittleren Spitzenform (Pinnington, 2007; Steinauer, 2008)

Eine Beurteilung der Oberflächencharakteristik ist auch anhand der Spektralanalyse möglich, bei der mittels Fourier-Transformation Texturspektren aus den Profilen berechnet werden. Die Grundidee der spektralen Analyse besteht darin, ein regelloses Profil durch eine Überlagerung unendlich vieler sinusförmiger (waschbrettartiger) Kurven darzustellen, die jeweils unterschiedliche Wellenlängen und Amplituden aufweisen.

Durch Fouriertransformation lässt sich das Höhenprofil aus dem Wegbereich in den Frequenzbereich überführen und das quadrierte Fourierspektrum durch Normierung über die Abtast-

schrittweite  $\Delta x$  und die Anzahl der Höhenwerte  $N$  als (einseitiges) Leistungsdichtespektrum (engl.: Power Spectral Density, PSD) darstellen.

$$\Phi_h(f) = \frac{2 \cdot \Delta x}{N} |\underline{H}(f)|^2 = \frac{2 \cdot L_s}{N^2} |\underline{H}(f)|^2 \quad (\text{Gl. 2-4})$$

mit:

$\Delta x$ : Abtastschrittweite [m]

$N$ : Anzahl der Höhenwerte im Profil

$L_s$ : Segmentlänge  $L_s = \frac{N}{\Delta x}$  (Gl. 2-5)

$f$ : Kreisfrequenz [1/m]  $f = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$  (Gl. 2-6)

$\lambda$ : Wellenlänge [m]

$H$ : komplexes Fourierspektrum

Das Leistungsdichtespektrum wird vor allem in der Nachrichtentechnik angewendet. Es gibt die abgestrahlte Energie eines Signals in einem Frequenzband an. Wird die Textur einer Fläche als ein Signal angesehen, kann das Leistungsdichtespektrum zur Beschreibung der Textur herangezogen werden.

Weitergehende Informationen zur Herleitung des Leistungsdichtespektrums finden sich u. a. in (Ueckermann, 2004). Die Darstellung eines zweidimensionalen Profils in Form des Leistungsdichtespektrums ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der Rauheit auf verschiedenen Skalen (s. Bild 2-8). Es kann daher auch als spektrale Rauheitsdichte bezeichnet werden.

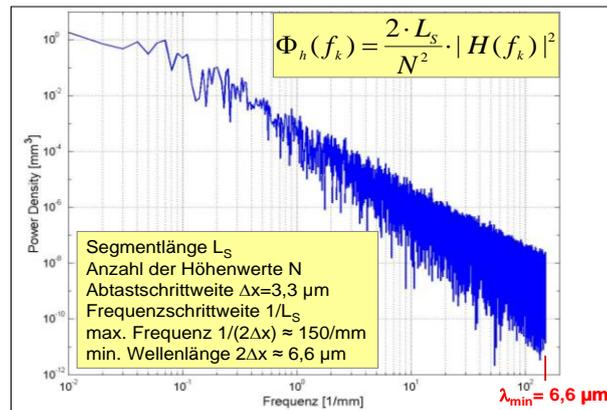


Bild 2-8: Beispiel eines Leistungsdichtespektrums für ein 10 cm langes Profil (Steinauer, 2008)

Für selbstähnliche (oder anders ausgedrückt: fraktale) Profile oder selbstähnliche Flächen (s. Bild 2-9), bei denen sich dieselben Rauheitsstrukturen auf immer kleineren Längenskalen wiederholen, hat das ein- oder zweidimensionale Leistungsdichtespektrum eine exponentielle Form. Die spektrale Leistungsdichte  $S(f)$  kann als Potenzfunktion der räumlichen Frequenzen  $f$  in nachfolgender Form dargestellt werden:

$$S(f) = k \cdot \left(\frac{f}{f_{\min}}\right)^{-w} \quad (\text{Gl. 2-7})$$

mit:

k: Topothese, gibt das Niveau der spektralen Leistungsdichte an [ $\text{m}^4$ ]

w: Spektraler Index [-]

f: Kreisfrequenz [ $1/\text{m}$ ] oder [ $1/\text{mm}$ ]

$f_{\min}$ : kleinste im Spektrum auftretende Frequenz

Selbstaffine Oberflächen oder Profile zeichnen sich dadurch aus, dass eine anisotrope Transformation die Morphologie und statistische Eigenschaften unverändert lässt: aus  $x \rightarrow \alpha x$  folgt  $y \rightarrow \alpha^H y$  mit dem Hurst-Exponenten H (Schramm, 2002) (s. Bild 2-9).

Viele der in der Natur vorkommenden Oberflächen können näherungsweise als (statistisch) selbstaffin über einen großen Bereich von Längenskalen beschrieben werden (Thomas, 1982). Die spektrale Leistungsdichte  $S(f)$  stellt sich für viele in der Natur vorkommenden Oberflächen als Potenzfunktion der räumlichen Frequenzen  $f$  dar (Pfeifer, 1984).

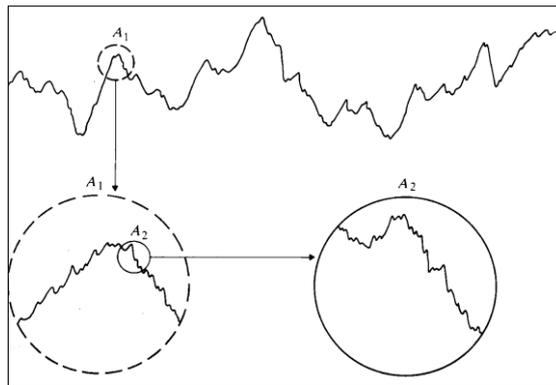


Bild 2-9: Selbstähnliches Profil mit Textur auf verschiedenen Längenskalen (Thomas, 1982)

Bei einem selbstähnlichen Profil oder einer selbstähnlichen Fläche ergibt sich bei doppeltlogarithmischer Auftragung der Leistungsdichte über mehrere Größenordnungen der Kreisfrequenz näherungsweise eine Gerade (vgl. Bild 2-10).

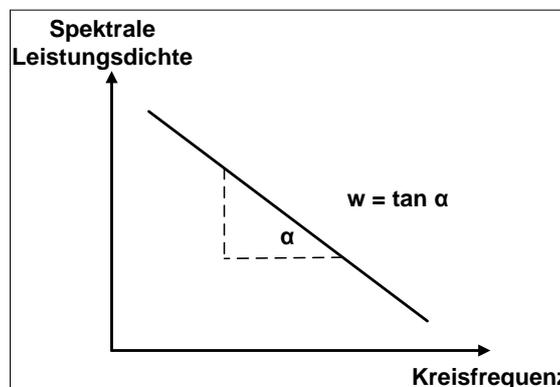


Bild 2-10: Schematische Darstellung der spektralen Leistungsdichte eines selbstähnlichen Profils (eindimensionales Leistungsdichtespektrum) oder einer selbstähnlichen Fläche (zweidimensionales Leistungsdichtespektrum)

Die fraktale Rauheit beschreibt man anhand des spektralen Index  $w$ , welcher der Neigung dieser Geraden bzw. des Spektrums entspricht. Mit dem spektralen Index  $w$  lässt sich zusätzlich noch die sogenannte fraktale Dimension  $D$  definieren:

$$D = \frac{6 - w}{2} \quad (\text{für eindimensionales Profil}) \quad (\text{Gl. 2-8})$$

$$D = \frac{8 - w}{2} \quad (\text{für zweidimensionale Fläche}) \quad (\text{Gl. 2-9})$$

Unterschiedliche Profile oder Flächen können somit über das Niveau und die Neigung ihrer Leistungsdichtespektren verglichen werden.

Bei näherer Betrachtung des zweidimensionalen Leistungsdichtespektrums konnte folgendes festgestellt werden (Kucheryavski, 2005):

- Je größer die Amplitude der kurzwelligen Textur ist, umso kleiner ist der Indikator  $w$  und umso größer ist somit die fraktale Dimension  $D$ .
- Je größer die Amplitude der langwelligen Textur ist, umso größer ist der spektrale Index  $w$  und umso kleiner ist somit ihre fraktale Dimension  $D$ .

Dies wird auch in Bild 2-11 verdeutlicht, in dem verschiedene Oberflächen mit ihren jeweiligen fraktalen Dimensionen  $D$  im Vergleich abgebildet sind. Durch die fraktale Dimension  $D$  kann das Verhältnis von kurzweiliger zu langweiliger Rauheit beschrieben werden.

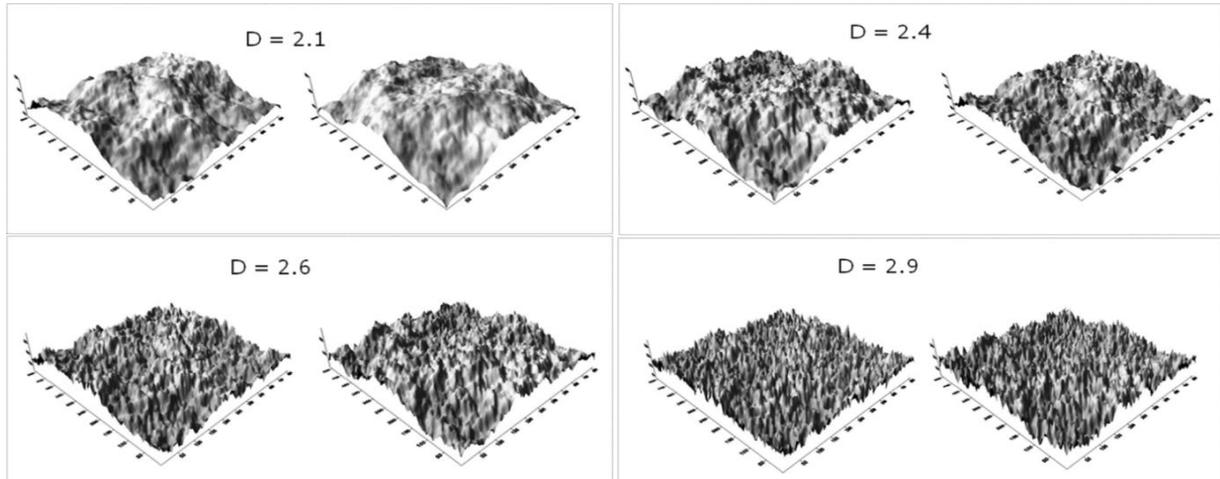


Bild 2-11: Oberflächen unterschiedlicher fraktaler Dimension (Kucheryavski, 2005)

### 2.3 Betrachtung von kurz-, und langfristigen Einflüssen auf die Griffigkeitsänderung

Die Griffigkeit einer Fahrbahndecke ist keine konstante Größe, sondern ändert sich im Laufe der Zeit durch Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt (s. Bild 2-12). Maßgebend für die Änderungen der Fahrbahngriffigkeit sind die einerseits glättenden und andererseits aufrauenden Einflussmechanismen (Huschek, 1995). Zu diesen Einflussgrößen zählen:

- der Poliervorgang infolge der Fahrzeugreifen,
- Verunreinigungen auf der Fahrbahn,

- chemische Vorgänge, wie beispielsweise Verwitterung durch Säuren (saurer Regen), Kohlensäureverwitterung und Hydrolyse.
- physikalische Verwitterung durch Temperatur- und Wassereinwirkung (Frostspaltung).

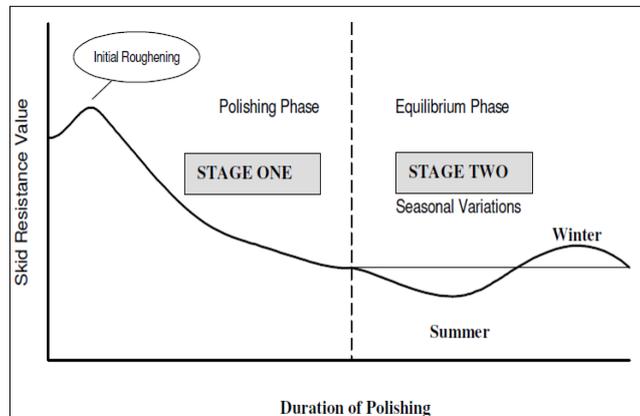


Bild 2-12: Griffigkeitsentwicklung während der Nutzungsdauer (Wilson, 2006)

Die Griffigkeitsänderungen können dabei auf:

- kurzfristige Ereignisse: wie z. B. Regen,
- langfristige Ereignisse: wie vor allem Verkehr und Witterung

zurückgeführt werden.

Regen kann die Griffigkeitseigenschaften der Fahrbahnoberfläche kurzfristig positiv verändern. Mögliche Ursachen für diese positive Veränderung der Griffigkeit sind zum Einen die Reinigung der Oberfläche von Staub, Schmutz und Öl, so dass die Mikrotextrur wieder zum Tragen kommt (Zieger, 1980). Zum anderen ist eine Verbesserung der Mikrotextrur infolge des Einflusses des im Regenwasser enthaltenen Kohlendioxids durch die Kalkauflösung bei der Regeneration der Mikrotextrur feststellbar (Zieger, 1980; Litzka, 1988). Allerdings kann die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche durch sog. „Seifenbildung“ des Regens mit Partikeln sowie Staub auf der Straße beeinträchtigt werden.

Zu den langfristigen Einflüssen zählen der Verkehr und die Witterung. Die Beanspruchung durch den Verkehr ist auf den unter Schlupf abrollenden Reifen zurückzuführen. Sie kann sich sowohl günstig als auch ungünstig auf die Griffigkeit auswirken. Günstig insofern, dass durch die Beanspruchung nach und nach eine Erneuerung der Deckschichten eintritt (Zieger, 1980). Im Allgemeinen überwiegen jedoch die ungünstigen Auswirkungen des Verkehrs auf die Griffigkeit. Dabei bewegen sich alle Luftreifen (gezogen, angetrieben oder gebremst) mit Schlupf, d. h. sie gleiten in der Kontaktfläche längs und quer und üben so eine glättende, einebnende Wirkung auf die Unterlage aus.

Darüber hinaus kann durch starke Verkehrsbelastung eine strukturelle Veränderung bei den bituminösen Belägen stattfinden. Es kommt durch die Verkehrsbeanspruchung zu einer Nachverdichtung. Dieses bedeutet, dass die Oberflächenporen geschlossen und die Splitte in den Mastix eingedrückt werden, was tendenziell zum Einebnen der Makrotextrur führt.

Die witterungsbedingte Griffigkeitserhöhung ist primär auf eine physikalische oder chemische

Verwitterung der Mineralstoffe und des Bitumens zurückzuführen. Insbesondere sind Materialermüdung infolge Temperaturschwankungen, Absplitterungen infolge Temperatureinwirkung, Lösen bestimmter Minerale infolge sauren Regens oder die oxidative Alterung des Bitumens infolge der Einwirkung von Luftsauerstoff sowie eine strukturelle Alterung des Bitumens als Ergebnis des Witterungseinflusses zu nennen. Diese können zu Absplitterungen feinsten Minerale aus einem Gesteinskorn bis hin zum Herauslösen von ganzen Gesteinskörnern aus der Oberfläche führen. Grundsätzlich ist jedoch der Einfluss auf eine Aufrauung der Mikrotextur, der zu einer jahreszeitlichen Erhöhung der Griffigkeit führt, begrenzt.

Im Allgemeinen liegen die Ergebnisse der Griffigkeitsmessung im Sommer unter denen im Winter (s. Bild 2-12). Die Ursachen für die jahreszeitabhängigen Unterschiede sind nachfolgend angegeben (Bald, 2008; Breyer, 1983; FGSV, 2012; Huschek, 1975; Maclean, 1958; Zieger, 1980):

- Das Regenwasser ist im Winter saurer als im Sommer.
- Im Winter ist aufgrund der tieferen Temperaturen eine größere Löslichkeit von Kohlendioxid im Wasser möglich, was zu einer erhöhten Kohlensäureverwitterung führen könnte.
- Die Verweilzeit des sauren Wassers ist im Winter länger als im Sommer.
- Im Winter ist ein geringeres Verkehrsaufkommen zu verzeichnen als im Sommer. Dies bringt eine Reduzierung der Polierwirkung mit sich.
- Das Poliermittel auf der Fahrbahn ist im Sommer und Winter hinsichtlich der Zusammensetzung und Feinheit unterschiedlich.

## **2.4 Messung der Griffigkeit heute**

Straßen mit geringem Verkehrsaufkommen weisen in der Regel keine mangelhaften Griffigkeitswerte auf. Hochbelastete Straßen der Bauklasse I oder SV hingegen unterliegen einer sehr starken Polierbeanspruchung, welche zu einer starken Beeinträchtigung der Griffigkeit führen kann. Hier ist im Allgemeinen der polierende Einfluss der Reifen größer als der der klimatisch bedingten Aufrauung, so dass insgesamt eine Abnahme der Griffigkeit zu verzeichnen ist. Daher ergibt sich die Gefahr, dass das Niveau der Griffigkeit im Laufe der Liegedauer unter einen für die Verkehrssicherheit notwendigen Wert abfällt. Die Griffigkeit der hochbelasteten Straßen (wie Bundesautobahn und Bundesstraßen) ist daher in regelmäßigen Zeitabständen zu messen, um zu überprüfen, ob die Anforderungen an die Griffigkeit noch erfüllt werden können.

Gemäß dem „Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (M BGriff)“ (FGSV, 2012) sind durch Griffigkeitsmessverfahren gewonnene Messergebnisse, d. h. Griffigkeitskennwerte eines bestimmten Verfahrens, gemittelte Werte, die für die Bewertung der tatsächlichen Verhältnisse herangezogen werden können. Allerdings gelten diese nur unter ganz bestimmten, systemspezifischen Voraussetzungen. Ein Vergleich der Messergebnisse unterschiedlicher Messverfahren ist gemäß M BGriff vom Grundsatz her problematisch, da in der Regel jedes Messverfahren systemimmanente Eigenarten aufweist. Damit dürfen bei strengen Anforderungen nur Messergebnisse miteinander verglichen werden, die mit dem gleichen Messsystem ermittelt wurden. Des Weiteren sind gemäß M BGriff keinerlei Korrelationen zwischen verschie-

denen Messverfahren zulässig, da je nach Oberflächenstruktur die mit den verschiedenen Messverfahren gemessenen Ergebnisse unterschiedlich beeinflusst werden und daher nicht vergleichbar sind. Allein hieraus wird bereits deutlich, dass für ein und dieselbe Straße verschiedene Reibwerte bestimmt werden können, je nachdem, welches Griffigkeitsmessverfahren eingesetzt wird. Und diese Messwerte sind dann auch nur eingeschränkt miteinander in Beziehung zu bringen, geschweige denn, in einander umzurechnen.

Griffigkeitsmessverfahren können in lokal und kontinuierlich messende Verfahren unterschieden werden (FGSV, 2004a).

#### **2.4.1 Lokal messende (statische) Straßenmessverfahren**

Als lokal messende (statische) Verfahren kommen zumeist Kleingeräte zum Einsatz, die eine punktuelle Erfassung der Griffigkeit mit relativ geringem Aufwand ermöglichen. Vorteilhaft bei diesen sind die geringen Anschaffungs- und Unterhaltungskosten sowie die einfache Anwendung und der geringe Platzbedarf während der Messung. Negativ wirken sich allerdings die Beeinträchtigungen des Verkehrs (Absperrung des zu untersuchenden Straßenabschnittes), die erhebliche Gefährdung des Messpersonals auf der Straße sowie die lediglich punktuelle Erfassung der Griffigkeit aus. Demzufolge werden diese lokal messenden Verfahren für die Projektebene und für Bereiche eingesetzt, welche mit kontinuierlich messenden Verfahren, wie beispielsweise dem GripTester oder dem SKM-Verfahren, nicht erreichbar sind. Weltweit hat sich dabei das sogenannte SRT-Pendel (SRT = Skid Resistance Tester) in Kombination mit dem Ausflussmesser nach Moore als lokal messendes Verfahren zur Beurteilung der Griffigkeit von Straßenoberflächen durchgesetzt (Kluger-Eigl, 2009).

##### **SRT-Pendel**

Das SRT-Pendelgerät wurde ursprünglich vom Road Research Laboratory (RRL, heute: UK Transport Research Laboratory (TRL)) entwickelt und ist in der DIN EN 13036-4:2009 in die deutsche Normung eingeführt und in den Technischen Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil Messverfahren SRT (FGSV, 2004a) mit der genehmigten Abweichung umgesetzt.

Das SRT-Pendelgerät besteht aus einem dreibeinigen Basisgestell mit Skalenschild und einem Pendelarm. Am Ende dieses Pendelarms ist der Gleitkörper, bestehend aus einer Trägerplatte aus Aluminium und einer aufvulkanisierten Gummischicht, federnd angebracht. Die mit einer bestimmten Vorspannung versehene Feder drückt beim Durchschwingen des Pendels die berührende Kante des Gleitkörpers mit einer annähernd gleichbleibenden Kraft gegen die zu prüfende Oberfläche. Die Gleitgeschwindigkeit beträgt hierbei etwa 10 km/h. Das Maß für die Griffigkeit der Oberfläche ist der Verlust an Energie, den das Pendel durch das Gleiten der Gummikante über eine bestimmte Länge der zuvor angerästen Prüfoberfläche erfährt. Der Energieverlust wird über die Steighöhe des Pendelarms mit Hilfe eines Schleppzeigers messtechnisch erfasst und auf einer Skala als sogenannte SRT-Einheiten angezeigt. Die Berührungslänge (Gleitlänge) ist durch die Höhe der Pendelachse über der Fahrbahnoberfläche gegeben und muss vor jeder neuen Messung anhand eines Maßstabes mit großer Genauigkeit eingestellt werden. Benötigt wird dabei ein Messbereich, dessen Breite mindestens der des Gleitkörpers (76,2 mm) und dessen Länge an der Spitze des Profils mindestens der Gleitlänge des Gleitkör-

pers (126 mm +/- 1 mm) entspricht. Das Gerät wurde ursprünglich dazu entwickelt, Messwerte zu liefern, die dem Reibwert eines profilierten Reifens entsprechen, der mit 40 km/h über die Straßenoberfläche rutscht (FGSV, 2004a).

### **Ausflussmesser nach Moore**

Bei dem Ausflussmesser nach Moore (AM) gemäß DIN EN 130363-3 handelt es sich um ein Gerät zur Ermittlung der Ausflusszeiten eines definierten Wasservolumens als Maß für die entwässernde Wirkung der Makrotextur der Fahrbahnoberfläche. Im Rahmen der „Kombinierten Griffigkeitsmessung“ werden zur Beurteilung der Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche das SRT-Pendelgerät und der Ausflussmesser in Kombination eingesetzt. Hierdurch ist eine Bewertung der Griffigkeit auf Grundlage der Mikrotextur (SRT-Pendel) und der Makrotextur (AM) möglich (FGSV, 2004a).

### **2.4.2 Kontinuierlich messende Straßenmessverfahren**

Gegenüber den lokal messenden Verfahren zur Beurteilung der Griffigkeit haben kontinuierlich messende Verfahren den Vorteil, dass mit ihnen die Griffigkeit durchgängig und mit geringeren Verkehrsbehinderungen erfasst werden kann. Am besten sind die kontinuierlich messenden Verfahren geeignet um große Streckennetze zu messen, da aufgrund der Messgeschwindigkeit eine hohe Tageskilometerleistung erreicht werden kann (Kluger-Eigl, 2009). Derzeit existiert in Europa eine Vielzahl von kontinuierlich messenden Verfahren mit unterschiedlichen Messprinzipien. Die größte Verbreitung haben das SCRIM (in Deutschland: SKM), der GripTester, der Skiddometer BV 11 und der Stuttgarter Reibungsmesser SRM. Zudem existieren zahlreiche weitere landesspezifische kontinuierlich messende Systeme, wie beispielsweise der Tatra Runway Tester (kurz: TRT).

### **GripTester**

Der GripTester wurde im Jahre 1987 von der Firma Findlay Irvine in Schottland entworfen, konstruiert und als Version MK I auf den Markt gebracht. Seit 2003 ist das Nachfolgemodell (Version MK II) auf dem Markt, welches sich äußerlich nur unwesentlich vom MK I unterscheidet, aber mit einer verbesserten Elektronik und einer modifizierten Messachse ausgestattet ist. Das ursprünglich für den Einsatz an Hubschrauberlandeplätzen entwickelte Messsystem besteht im Wesentlichen aus dem GripTester-Messanhänger, einem Bewässerungssystem, einer Datenerfassungseinheit und einem Zugfahrzeug. Das eigentliche Messgerät besteht aus einem Anhänger mit zwei Laufrädern und einem kleinen Messrad. Die Reifenabmessungen sind ähnlich denen eines „go-kart“-Reifens. Für Griffigkeitsmessungen kann der GripTester in zwei Betriebsarten eingesetzt werden: sowohl im Zugbetrieb als auch bei beengten Verhältnissen manuell mit geringer Geschwindigkeit im Schiebetrieb. Im Zugbetrieb wird der GripTester an ein beliebiges Fahrzeug angehängt, welches mit einem vollautomatischen Bewässerungssystem mit Wassertank ausgestattet ist. In dieser Betriebsart können Messgeschwindigkeiten von 20 km/h bis 80 km/h erreicht werden (Do et al., 2008; Kluger-Eigl, 2009).

Die Ermittlung des Reibungsbeiwertes erfolgt beim GripTester nach dem Prinzip des definiert gebremsten und geradeaus laufenden Messrades mit einem kleinen Messreifen auf einer mit Wasser benetzten Oberfläche. Der GripTester misst mit Hilfe des kleinen Messrades den LFC

(LFC = Longitudinal Friction Coefficient = Längsreibungskoeffizient) bei einem konstanten Schlupf von 18%. Die Wiederholpräzision des GripTesters beläuft sich dabei auf  $r = 0,03$ , während sich die Reproduzierbarkeit (abhängig von der Messgeschwindigkeit) auf  $R = 0,08$  bei 30 km/h,  $R = 0,07$  bei 50 km/h und  $R = 0,06$  bei 80 km/h beläuft (Do et al., 2008; Kluger-Eigl, 2009).

Tabelle 2-1: Standardmessbedingungen GripTester

Lufttemperatur	> 4°C
Asphalttemperatur	> 5°C und < 50°C
Asphaltzustand	Nicht verschmutzt
Messrad	Profilloser ASTM-Reifen (Durchmesser = 254 mm)
Methode	Konstanter Schlupf von 18%
Auflast	250 ± 20 N
Messgeschwindigkeit	5 km/h bis 100 km/h
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	Optional, typischerweise 10m oder 20 m
Messspur	i.d.R. rechts oder wie erforderlich

## **SCRIM**

Die Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine (kurz: SCRIM) wurde ursprünglich von der Firma WDM Limited unter der Lizenz von UK Transport Research Laboratory (TRL) entwickelt und patentiert. Bei dem System handelt es sich um ein kommerzielles LKW-Fahrgestell, welches mit einem Wassertank inklusive Bewässerungssystem und einem schräglaufenden Messrad ausgestattet ist (Bald et al., 2004; Do et al., 2008; Kluger-Eigl, 2009).

Das SCRIM misst den SFC (SFC = Sideway Friction Coefficient = Seitenkraftbeiwert) mit dem um 20° zur Fahrrichtung angewinkelten Messrad. Durch die Einwirkung einer Auflast wird das Messrad auf die Asphaltoberfläche gedrückt. Diese Auflast wird durch eine Radaufhängung erzeugt, die sich frei auf und ab bewegen kann. Die Kraft, die auf die Messrad-Achse wirkt, wird gemessen und zur Berechnung des SFC verwendet.

Die Wiederholpräzision der SCRIM-Messungen beläuft sich auf  $r < 0,03$  (100 m Mittelwert SFC). Die Reproduzierbarkeit beläuft sich auf  $R < 0,07$  (100 m Mittelwert SFC). Diese wurden anhand von Daten ermittelt, die in einer Vergleichsstudie im Jahr 2008 erhoben worden sind. Dabei wurden in England sieben verschiedene Prüfstrecken mit 14 Testfahrzeugen geprüft. Der Wert für die Wiederholbarkeit könnte in anderen Ländern von dem genannten abweichen, je nachdem ob die Geräte mit den englischen Fahrzeugen verglichen worden sind oder nicht. Das SCRIM-Messsystem ist in Europa weit verbreitet und in vielen Ländern wird mehr als ein Gerät eingesetzt. In Deutschland wird das SCRIM seit dem Jahr 2006 als Seitenkraftmessverfahren (SKM) bezeichnet (Do et al., 2008).

*Tabelle 2-2: Standardmessbedingungen SCRIM*

Lufttemperatur	> 4°C
Asphalttemperatur	> 5°C (April bis November) und < 50°C
Asphaltzustand	Nicht verschmutzt
Messrad	Profilloser Reifen 76/508 (Reifendruck 0.35 MPa)
Methode	Konstanter Schlupf, Laufwinkel 20°
Auflast	1960 N
Messgeschwindigkeit	Variiert je nach Land. Üblich sind 50 km/h.
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	Min. 10 m aber auch andere möglich
Messspur	i. d. R. rechts oder wie erforderlich

### **SKM**

Das Seitenkraftmessverfahren (SKM) wurde in Deutschland entwickelt und basiert auf dem bereits oben beschriebenen SCRIM, wobei einige Modifikation vorgenommen worden sind. Bei dem SKM wird im Vergleich zum Originalsystem ein eigens produzierter Messreifen eingesetzt und die Griffigkeitsmesseinrichtung mit speziellen Stoßdämpfern ausgestattet. Das Rad läuft wie beim SCRIM mit einem Schräglaufwinkel von 20°. Die Präzision des nach den Technischen Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM) (FGSV, 2008) genormten Messsystems beläuft sich auf eine Wiederholgenauigkeit zwischen 2 Messungen von +/- 0,015 über den Gültigkeitsabschnitt (Do et al., 2008; Kluger-Eigl, 2009).

*Tabelle 2-3: Standardmessbedingungen SKM*

Lufttemperatur	> 5°C
Asphalttemperatur	> 5°C (Mai bis Oktober) und < 50°C
Wassertemperatur	> 8°C und < 25°C
Asphaltzustand	nicht verschmutzt
Messrad	profilloser Reifen mit großem Durchmesser
Methode	Konstanter Schlupf, Laufwinkel 20°
Laufwinkel	20° ± 1,0°
Radsturz	0° ± 1,0°
Auflast	1960 N ± 10 N
Messgeschwindigkeit	40, 60 oder 80 km/h
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	Optional, gewöhnlich 100 m
Messspur	i.d.R. rechts oder wie erforderlich

## **ADHERA**

Das Messsystem ADHERA wurde von der Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) entwickelt und wird von der französischen Firma Vectra in Lizenz vertrieben. Das Messsystem besteht aus einem einrädigen, ca. 300 kg schweren Messanhänger, einem handelsüblichen Zugfahrzeug inklusive Wassertank, einer Bewässerungseinheit sowie einer Datenerfassungseinheit. Bei der Standard-Messkonfiguration wird der Längsreibungsbeiwert BFC (BFC = Braked Force Coefficient) mit einem blockierten Messrad bestimmt. Neben den standardmäßigen profillosen PIARC-Messreifen können auch konventionelle PKW-Reifen verwendet werden (Do et al., 2008; Kluger-Eigl, 2009).

Das Messrad ermöglicht die Simulation und Untersuchung einer Bremssituation mit blockierten Rädern. Die Brems-Sequenzen bestehen aus Brems- und Freilaufstrecken bei bestimmten Messgeschwindigkeiten (vorwiegend 40, 60 und 90 km/h auf Bundesstraßen und 60, 90 und 120 km/h auf Autobahnen). Bei Forschungsprojekten besteht die Möglichkeit einer Versuchsdurchführung mit variablem Schlupf, um die gesamte „ $\mu$ -Schlupf-Kurve“ darzustellen. Es werden sowohl die Horizontal- als auch die Vertikalkräfte gemessen. Das Bewässerungssystem ermöglicht es, einen Wasserfilm mit einer bestimmten Dicke zu produzieren. Dabei hängt die abgegebene Menge an Wasser von der zu erzeugenden Wasserfilmdicke und der Messgeschwindigkeit ab. Die Wiederholbarkeit des Messsystems beläuft sich bei Standardmessungen mit blockiertem Rad auf  $r = 0,03$ . Die Reproduzierbarkeit beläuft sich auf  $R = 0,05$  (Do et al., 2008).

*Tabelle 2-4: Standardmessbedingungen ADHERA*

Lufttemperatur	> 4°C
Asphalttemperatur	> 5°C (April bis November) und < 50°C
Asphaltzustand	nicht verschmutzt
Messrad	profilloser PIARC-Reifen 165R15
Methode	blockiertes Rad (100% Schlupf)
Auflast	2500 N
Messgeschwindigkeit	40 bis 120 km/h
Theoretische Wasserfilmdicke	1 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	20 m
Messspur	rechts

## **SRM**

Der Stuttgarter Reibungsmesser (kurz: SRM) wurde in den 50er Jahren am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren in Stuttgart entwickelt. Das System besteht aus einem LKW mit einem Wassertank und einem am Heck des LKW befestigten längslaufenden Messrad. Die Messungen werden mit einem blockierten Schlepprad auf der zuvor angehängten Fahrbahn durchgeführt. In Österreich und Deutschland war der SRM lange Zeit das Standardmessverfahren für die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen, wurde aber inzwischen vom RoadStar (in Österreich) und dem SCRIM bzw. SKM (in Deutschland) abgelöst. Lediglich in der Schweiz wird der SRM als Standardmessverfahren noch betrieben. Weiterentwicklungen des SRM ermögli-

chen heute die Messung mit verschiedenen Schlupfzuständen und auch die gleichzeitige Messung der rechten und linken Rollspur (Kluger-Eigl, 2009).

Indem das Messrad während der Messfahrt bei konstanter Geschwindigkeit intermittierend blockiert, wird beim SRM die Vollbremsung ohne Anti-Blockier-System simuliert. Bei diesem standardmäßig durchgeführten Fall beträgt die Zykluslänge 25 m, wovon 20 m blockierend gemessen werden und über 5 m das Messrad frei abrollt. Aus den letzten 15 m der blockierten Messstrecke wird der mittlere Reibungsbeiwert bestimmt. Das System ermöglicht somit die Bestimmung der Längskraft am blockierten (100% Schlupf) und geradeaus laufenden Messrad. In der Regel werden Messgeschwindigkeiten von 40, 60 oder 80 km/h, in Ausnahmefällen auch bis zu 120 km/h gefahren. Der SRM misst den LFC mit blockiertem Rad, mit einem konstanten Schlupf von 15% oder unter ABS-Bedingungen. Die Präzision des Verfahrens beläuft sich auf eine maximale Differenz der Mittelwerte zweier Prüfungen von  $\Delta\mu < \pm 0,03$  sowie auf eine Standardabweichung zweier Prüfungen nach erfolgter Kalibrierung  $\sigma < 0,02$  (Kluger-Eigl, 2009).

*Tabelle 2-5: Standardmessbedingungen SRM*

Lufttemperatur	> 10°C
Asphalttemperatur	> 10°C und < 30°C
Asphaltzustand	nicht verschmutzt
Messrad	PIARC-Reifen (mit Profil) Größe 165 R15 mit vier Längsrillen
Methode	Blockiertes Rad oder 15% ± 1% Schlupf oder ABS
Auflast	3500 N
Messgeschwindigkeit	40, 60, 80 km/h
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	20 m
Messspur	Rechts und links

### **RoadStar**

Das Messsystem RoadStar erfasst die Längsreibung. Das Messequipment wird an das Heck eines speziell umgebauten LKW montiert, der den Wassertank sowie das Kontrollequipment mitführt. Bei normalem Betrieb erfasst das Messgerät kontinuierlich den LFC. Die Standardmessungen werden mit einem Schlupf von 18% durchgeführt. Für Vergleichsmessungen (wie z.B. beim HERMES-Project) können auch Schlupfe von 37,5%, 50% und 75% eingestellt werden. Das Messsystem ermöglicht auch Messungen mit blockiertem Rad sowie ABS-Messungen und ist zusätzlich mit einem Makrotextur-Lasersensor ausgestattet, der sich vor dem Messrad befindet. Der RoadStar beruht auf dem Prinzip des Stuttgarter Reibungsmessers, wurde jedoch so weiterentwickelt, dass Messungen unter ganz unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt werden können, einschließlich der Einstellung unterschiedlicher Schlupfzustände (Do et al., 2008).

Das Messrad ist auf der rechten Heckseite des Fahrzeugs befestigt und wird mit einer vorgegebenen Andruckkraft, die durch eine pneumatische Belastungseinheit erzeugt wird, an die Straßenoberfläche gepresst. Die aktuelle Radlast wird laufend erfasst und zur Berechnung der Griffigkeit herangezogen. Über ein spezielles Getriebe können unterschiedliche Schlupfzustände eingestellt werden. Für Messungen mit einem blockierten Rad und ABS-Messungen können die Bremssequenzen individuell festgelegt werden. Diese bestehen aus Brems- und Freilaufstrecken, die in einem bestimmten frei Bereich gewählt werden können. Das Gerät kann mit Wasserfilmdicken zwischen 0,5 mm und 2 mm und Messgeschwindigkeiten bis 120 km/h betrieben werden (Do et al., 2008).

Aufgrund der Konstruktion der Messeinheit und der Kräfte, die bei hohen Geschwindigkeiten entstehen sind die Radien, die das Fahrzeug durchfahren kann, beschränkt und hängen von der Messgeschwindigkeit ab. Bei der Standard-Messgeschwindigkeit von 60 km/h können Messungen des LFC nur in Radien  $> 85$  m durchgeführt werden. Ist der Kurvenradius kleiner als 85 m muss die Geschwindigkeit reduziert werden. Die Präzision bei Standardmessungen beläuft sich auf eine maximale Abweichung der Mittelwerte der zweiten und der dritten Messung (LFC, 50 m-Werte) von  $\Delta\mu \leq 0,03$ . Desweiteren beläuft sich die doppelte Standardabweichung der Abweichung des zweiten und des dritten Messwertes voneinander (LFC, 50 m-Werte) auf  $2\sigma \leq 0,05$  (Do et al., 2008).

*Tabelle 2-6: Standardmessbedingungen RoadStar*

Lufttemperatur	$> 3^{\circ}\text{C}$
Asphalttemperatur	$> 5^{\circ}\text{C}$ (April bis November) und $< 50^{\circ}\text{C}$
Asphaltzustand	Nicht verschmutzt
Messrad	PIARC-Reifen (PKW-Reifen)
Methode	Konstanter Schlupf von 18%
Auflast	3500 N
Messgeschwindigkeit	60 km/h
Min. Messgeschwindigkeit	30 km/h
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	50 m
Messspur	rechts

### **Skiddometer BV-8**

Der Skiddometer BV-8 wurde von dem „National Swedish Road Research Institute of Stockholm“ entwickelt. Mit diesem Gerät können Routine-Griffigkeitsmessungen auf langen Streckenabschnitten oder zur Charakterisierung von bestimmten Abschnitten oder punktuelle Messungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Das Gerät erfasst die Längsreibung und besteht aus einem Anhänger mit zwei Laufrädern und einem mittig angebrachten Messrad, welches mit einer definierten Auflast auf die Straßenoberfläche gedrückt wird. Der Skiddometer BV-8 misst den LFC entweder mit blockiertem Rad oder einem konstanten Schlupf von 14% (Do et al., 2008).

Die Messradkonstruktion beinhaltet ein federkontrolliertes Belastungssystem, das eine Auflast von 3500 N erzeugt. Die Auflast wird sowohl im statischen als auch im dynamischen Zustand gemessen. Das Gerät verfügt über eine Achse, die ein DMS-System zur Messung der Reibungskraft am Reifen besitzt und ein Bremssystem um das Rad zu blockieren. Zusammen mit der E-Kupplung sorgt es bei Bedarf für die Einhaltung eines konstanten Schlupfes. Es können unterschiedliche Wasserfilmdicken und Messgeschwindigkeiten gewählt werden. Die Präzision des Messsystems beläuft sich auf: Differenz der Mittelwerte zweier Prüfungen  $\Delta\mu < \pm 0,03$ , Standardabweichung zweier Prüfungen nach erfolgter Kalibrierung  $\sigma < 0,02$  und Reproduzierbarkeit  $R < 0,03$  (Do et al., 2008).

*Tabelle 2-7: Standardmessbedingungen Skiddometer BV-8*

Lufttemperatur	> 10°C
Asphalttemperatur	> 10°C und < 30°C
Asphaltzustand	Nicht verschmutzt
Messrad	PIARC-Reifen (mit Profil) Größe 165 R15 mit vier Längsrillen
Methode	Blockiertes Rad oder 14% $\pm$ 1% Schlupf
Auflast	3500 N
Messgeschwindigkeit	40, 60, 80 km/h
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	30-50 m
Messspur	Rechts oder links

### **VTI Skiddometer BV-12**

Der VTI Skiddometer BV-12 wurde vom VTI in Schweden als Teil des EC VERT Forschungsprogramms vor acht Jahren entwickelt und wird ausschließlich zu Forschungszwecken verwendet. Das Messrad ist am Heck eines alten (1973) Scania LB80 Tankwagens befestigt und hat die Abmessungen eines normalen PKW-Reifens. Über das Bewässerungssystem kann der Wasserfilm individuell eingestellt werden kann. Das Gerät ist in der Lage, sowohl die Längs- als auch die Querreibung zu erfassen. oder beides in Kombination. Dabei kann der Schräglaufwinkel auf bis zu 20° eingestellt werden. Ein Messzyklus besteht aus zehn Messungen von 0% bis 100% Schlupf und zurück auf 0%. (Do et al., 2008).

### **VTI Skiddometer BV-14**

Der Skiddometer BV-14 ist ein Griffigkeitsmessgerät, welches an verschiedenen Fahrzeugen befestigt werden kann. Es misst die Griffigkeit in beiden Radspuren und wurde speziell für Messungen auf Eis und Schnee entwickelt. Die Messungen werden ohne Bewässerung der Oberfläche mit einem konstanten Schlupf von 17% durchgeführt. Die Auflast beträgt 1000 N und setzt sich zusammen aus 400 N Leergewicht und 600 N zusätzliche Belastung. Es werden Trelleborg T 49 Reifen mit der Größe 4.00-8 verwendet (Do et al., 2008).

### **BV-11 und SFT**

Das Messgerät wird entweder als Anhänger gebaut (BV-11) oder in ein Fahrzeug integriert (SFT) und misst den LFC bei konstantem Schlupf von 17%. Das Bewässerungssystem ermöglicht es, einen Wasserfilm mit einer bestimmten Dicke zu produzieren. Diese beträgt bei allen Messungen 0,5 mm (außer bei Messungen auf Flugplätzen: 1,0 mm). Die Präzision der LFC-Messungen wird durch die in der Messphase festgelegten Bedingungen überprüft: Wenn die Ergebnisse von zwei Durchläufen um mehr als 10% voneinander abweichen und einer der Messwerte unter 0,5 liegt, sollte der Messung wiederholt werden (Do et al., 2008).

*Tabelle 2-8: Standardmessbedingungen BV-11 und SFT*

Lufttemperatur	> 5°C
Asphalttemperatur	> 5°C
Asphaltzustand	Keine Steine/Splitt
Messrad	Trelleborg Typ T49 (Reifendruck: 0,18 MPa)
Methode	Konstanter Schlupf von 17%
Auflast	1000 N
Messgeschwindigkeit	70 km/h
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	20 m
Messspur	Rechts oder links

### **Tatra Runway Tester**

Der Tatra Runway Tester (TRT) wurde von Tatra Kopřivnice in Tschechien entwickelt, um routinemäßige, kontinuierliche Griffigkeitsmessungen durchzuführen. Das Gerät wird auf Autobahnen und für Messungen langer Streckenabschnitte eingesetzt. Es können auch punktuelle Messungen zur Charakterisierung bestimmter Abschnitte mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Das Messequipment befindet sich in einem eigens umgebauten Fahrzeug und erfasst den LFC (Do et al., 2008).

Mit Hilfe eines hydraulischen Zylinders wird in Kombination mit einem Drucksensor eine konstante Auflast auf das Messrad erzeugt und während des Messvorgangs ständig kontrolliert. Die Auflast kann zwischen 500 N und 1400 N variiert werden, die Standardeinstellung beträgt 1400 N. Das Bremssystem kann konstante Schlupfzustände zwischen 1% und 100% erzeugen, wobei für Routinemessungen normalerweise 25% Schlupf verwendet wird. Außerdem kann im variablen Schlupfmodus die gesamte Reibkraft-Schlupf-Kurve durchfahren werden. Die Wasserfilmdicke ist variabel einstellbar und beträgt im Normalfall 0,5 mm. Als Messreifen kommt ein Reifen nach ASTM Standard zum Einsatz (Do et al., 2008).

Die Präzision des Verfahrens beläuft sich auf eine Wiederholbarkeit von  $r = 0,03$  und Reproduzierbarkeit von  $R = 0,05$  (Do et al., 2008).

Tabelle 2-9: Standardmessbedingungen Tatra Runway Tester

Lufttemperatur	> 4°C
Asphalttemperatur	> 5°C (April bis November) und < 50°C
Asphaltzustand	nicht verschmutzt
Messrad	profilloser ASTM-Reifen
Methode	Konstanter Schlupf, 25%
Auflast	1000 N
Messgeschwindigkeit	40 bis 140 km/h
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	Optional, gewöhnlich 20 m
Messspur	Links

### **IMAG**

Das IMAG-Messsystem wurde von der French Civil Aviation Technical Division in erster Linie zur Bewertung der Griffigkeitsverhältnisse auf Autobahnen entwickelt. Es besteht aus einem Fahrzeug und einem Zweirad-Anhänger, an dem mittig das Messrad, welches die Längsreibung erfasst, aufgehängt ist. IMAG misst den LFC bei einem konstanten Schlupf von 15%. Für die Messungen wird – wie bei ADHERA – ein profilloser PIARC-Reifen verwendet. Die Auflast beträgt dabei 1500 N und die theoretische Wasserfilmdicke 1 mm. Die Messungen werden i.d.R. bei einer Messgeschwindigkeit von 65 km/h durchgeführt (Do et al., 2008).

### **ROAR**

Der Road Analyzer and Recorder (kurz: ROAR) wurde von der Firma Norsemeter Friction AS produziert und kommt hauptsächlich in Norwegen, Dänemark und den Niederlanden zum Einsatz, allerdings in unterschiedlichen Ausstattungsvarianten. Er kann an einem Anhänger oder direkt an einem LKW befestigt werden (Do et al., 2008).

Bei der LKW-Bauart wird die Messeinheit im Regelfall in der Rollspur des LKW befestigt, während bei der Anhänger-Bauart die Messeinheit auf einer Verstellchiene an der Rückseite des Messanhängers auf verschiedene Positionen versetzt werden kann. Auf diese Weise wird die Messung auf unterschiedlichen Bereichen der Fahrbahnoberfläche ermöglicht. Als Messreifen kommt in beiden Fällen ein ASTM Standard-Reifen zum Einsatz, der mit 1200 N belastet wird. Der Reifen wird so montiert, dass in Kurven ein seitenkraftfreies Ablaufen des Reifens erreicht wird. Der ROAR ermöglicht Messungen mit konstantem oder variablem Schlupf von 5% bis 95% bei Messgeschwindigkeiten von 20 km/h bis 80 km/h. Der Schlupf wird durch ein hydraulisches Bremssystem geregelt (Do et al., 2008).

### **ROAR-DK**

Diese Version des ROAR wird in Dänemark zur Messung der Längsreibung eingesetzt. Der ROAR-DK misst den LFC bei einem Schlupf von 20%. Das System ist auch in der Lage die Griff-

figkeit bei verschiedenen voreingestellten Schlupfzuständen zu messen. Diese können zwischen 1% und 99% liegen.

Das Gerät ist zusätzlich mit einem Laser-Sensor ausgestattet, der die Makrotextur erfasst. Dieser ist vor dem Fahrzeug auf der gleichen Seite wie das Griffigkeitsmessgerät angebracht, so dass Messungen der trockenen Asphaltoberfläche möglich sind. Die Einstellung des Schlupfes erfolgt über ein hydraulisches Bremssystem. Das Bewässerungssystem ermöglicht die Erzeugung eines Wasserfilms mit einer Dicke von 0,5 mm. Optional können auch Wasserfilmdicken von 0,0 mm (trockene Oberfläche) und 1,0 mm verwendet werden. Die Präzision des Messsystems bei Standardmessungen weist eine Abweichung zwischen zwei Durchläufen (10 m - Werte) von  $\Delta\mu \leq 0,04$  und eine Standardabweichung zwischen zwei Durchläufen von  $\Delta\sigma \leq 0,01$  auf (Do et al., 2008).

*Tabelle 2-10: Standardmessbedingungen Roar-DK*

Lufttemperatur	> 5°C
Asphalttemperatur	> 5°C (April bis November) und < 50°C
Asphaltzustand	Nicht verschmutzt
Messrad	ASTM 1551 (Reifendruck 0,207 MPa)
Methode	Konstanter Schlupf von 20%
Auflast	1200 N
Messgeschwindigkeit	60 km/h bei Routine-Messungen, 60 und 80 km/h zur Kontrolle neuer Beläge
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	Min 5 m
Messspur	rechts und links

## **ROAR-NL**

Diese Version des ROAR wird in den Niederlanden zur Messung der Längsreibung eingesetzt. Das Messfahrzeug ist ein dreiachsiger Tankwagen mit zwei Messsystemen, die am Heck befestigt sind.

Der Wassertank fasst etwa 12.000 Liter. Die Messeinheiten können so montiert werden, dass die Messungen in der rechten oder der linken Radspur und/oder in der Mitte der Fahrbahn durchgeführt werden können. Das Messsystem ROAR NL misst den LFC bei einem konstanten Schlupf. In den Niederlanden wird üblicherweise ein Schlupf von 86% eingestellt. Das Gerät ist jedoch auch in der Lage Messungen mit anderen Schlupfzuständen zwischen 5% und 95% durchzuführen. Die Einstellung des Schlupfes erfolgt über ein hydraulisches Bremssystem. Das Bewässerungssystem ermöglicht die Erzeugung eines Wasserfilms mit einer Dicke von 0,5 mm. Optional können auch Wasserfilmdicken von 0,0 mm (trockene Oberfläche) und 1,0 mm verwendet werden. Die Präzision der LFC-Messungen unter Standardbedingungen, die von den monatlichen Korrelations-Messungen abgeleitet wird, beläuft sich auf eine Wiederholbarkeit von  $r = 0,04$  (100 m Durchschnitt LFC) und Reproduzierbarkeit von  $R = 0,05$  (100 m Durchschnitt LFC) (Do et al., 2008).

*Tabelle 2-11: Standardmessbedingungen ROAR-NL*

Lufttemperatur	> 2°C und < 30°C
Asphalttemperatur	> 2°C und < 45°C
Asphaltzustand	Nicht verschmutzt
Messrad	ASTM 1551 (Reifendruck: entspr. 0,2 MPa bei 20°C)
Methode	Konstanter Schlupf von 86%
Auflast	1200 N
Messgeschwindigkeit	70 km/h und 50 km/h, max. Abweichung 5%
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm, Abweichung max. 10%
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	5,0 – 100 m
Messspur	rechts

### **RWS-NL**

Der RWS-NL ist ein einachsiger Anhänger, der zwischen seinen Laufrädern das zentral montierte Messrad trägt. Das Kontrollequipment und das Wasser werden im Fahrzeug mitgeführt. Eine Reihe dieser Geräte wird in den Niederlanden eingesetzt. Der RWS-Anhänger misst den LFC bei einem konstanten Schlupf von 86%. Um diesen Schlupf von 86% zu erreichen, ist das Messrad über eine Gelenkwelle mit einem der beiden Laufräder verbunden. Die Wasserfilmdicke beträgt 0,5 mm (Do et al., 2008).

Die Präzision des Messsystems unter Standardbedingungen, die von den monatlichen Korrelations-Messungen abgeleitet wird, beläuft sich auf eine Wiederholbarkeit von  $r = 0,04$  (100 m Durchschnitt LFC) und eine Reproduzierbarkeit von  $R = 0,05$  (100 m Durchschnitt LFC) (Do et al., 2008).

*Tabelle 2-12: Standardmessbedingungen RWS-NL*

Lufttemperatur	> 2°C und < 30°C
Asphalttemperatur	> 2°C und < 45°C
Asphaltzustand	Nicht verschmutzt
Messrad	Profilloser PIARC–Reifen 165 R15 (Reifendruck: entspr. 0,2 MPa bei 20°C)
Methode	Konstanter Schlupf von 86%
Auflast	1962 N, max. Abweichung $\pm 10$ N
Messgeschwindigkeit	70 km/h und 50 km/h, max. Abweichung 5%
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 mm, Abweichung max. 10%
Aufzeichnungslänge für einen Mittelwert	min. 5 m, i.d.R. 100 m
Messspur	rechts

### **DFT**

Der DFT ist ein stationäres Gerät mit einem Drehkopf, auf dem sich Gummi-Reiter befinden. Das Gerät wird in Japan hergestellt und auch in Europa vertrieben. Eine frühere Version des Gerätes wurde in die Versuche von PIARC 1991 aufgenommen und als Vergleichsgerät für den „International Friction Index“ verwendet (Do et al., 2008).

### **MU-Meter**

Der Mu-Meter erfasst die Querreibung und wurde für den Einsatz auf Autobahnen entwickelt. Statt einem Rad, wie bei anderen Geräten, besitzt der Mu-Meter zwei Messräder, die mit einem Schräglaufwinkel von  $7,5^\circ$  zur Fahrtrichtung angestellt sind und durch die Reibungskräfte auseinander gedrückt werden. Der Mu-Meter erfasst den SFC (Sideway Friction coefficient = Querreibungs-Koeffizient) basierend auf der Gesamtkraft, die sich zwischen den beiden Rädern aufbaut. Ein Sensor, der zwischen den Messrad-Lenkern angebracht ist, erfasst die entstehenden Querkräfte. Das dritte Rad misst die Entfernung und sorgt dafür, dass der Anhänger geradeaus fährt.

Der Wasserbehälter kann entweder auf einem separaten Anhänger angehängt oder im Fahrzeug mitgeführt werden. Typische Messgeschwindigkeiten liegen zwischen 20 km/h und 80 km/h. Das Gerät wurde für den Einsatz auf Flugplätzen entwickelt (Do et al., 2008).

### **Odiolograph**

Der Odiolograph wurde in Belgien entwickelt und wird in Wallonien und Flandern eingesetzt. Er erfasst die Querreibung mit einem Messrad, das die Abmessungen eines PKW-Reifens hat und an ein Fahrzeug mit Frontantrieb montiert ist. Das Messfahrzeug fährt hinter einem Tankwagen her, der die Fahrbahn annässt. Erfasst wird der SFC bei einem Schräglaufwinkel von  $20^\circ$ . Es wird ein profilloser PIARC-Reifen verwendet. Eine Besonderheit ist, dass für Fahrten, bei denen nicht gemessen wird, der Schräglaufwinkel auf  $0^\circ$  zurückgestellt wird. Die Auflast beträgt 2700 N und die Messgeschwindigkeit i.d.R. 80 km/h. Die Sprühvorrichtung am Tankwagen ist auf die Erzeugung eines 0,5 mm dicken Wasserfilms eingestellt. (Do et al., 2008).

### **OSCAR**

Das OSCAR-Messsystem wurde von Norsemeter entwickelt und wird in Norwegen eingesetzt. Am Heck eines Trägerfahrzeugs montiert misst es den LFC bei einem konstanten Schlupf von i.d.R. 18%. Das Gerät ist jedoch auch in der Lage, Messungen mit anderen Schlupfzuständen zwischen 3% und 75% durchzuführen. Die Messachse kann angehoben werden, wenn keine Messungen durchgeführt werden. Auf der linken Seite der Messachse befindet sich das Messrad, welches mit einem profillosen Standard-ASTM-Reifen E-524 ausgestattet ist. Das rechte Rad dient zur Distanz- und Geschwindigkeitsmessung. Die Bremskraft wird über eine Servo-Bremsanlage erzeugt. Die Wasserfilmdicke beträgt 0,5 mm und die Auflast 4826 N (Do et al., 2008).

### **PFT (TRL)**

Der PFT wird von TRL betrieben und ist Eigentum der Highways Agency. Das Gerät ist eine Sonderausführung des Dynatest T1290 ASTM E-524 Anhängers und wird in England aus-

schließlich zu Forschungszwecken eingesetzt. Es besteht aus einem Zweirad-Anhänger, der von einem Pick-Up, der den Wassertank und das Kontrollequipment mitführt, gezogen wird. Eines der Räder kann jeweils als Messrad genutzt werden (jedoch nicht beide gleichzeitig). Der PFT misst die Längsreibung mit einem blockierten Rad. Man kann auch den maximalen Kraftschluss messen, indem das Gerät wiederholte Messungen dicht am Maximalwert durchführt ohne das Rad vollständig zu blockieren (Do et al., 2008).

Der PFT besitzt eine automatische AOH (air-over-hydraulic)-Bremsanlage. Der Bremszyklus kann manuell oder automatisch in einem bestimmten Abstand zu einem Bezugspunkt initiiert werden oder in definierten Abständen automatisch wiederholt werden. Die Auflast auf das Messrad beträgt i.d.R. 5000 N, diese wird vom Anhänger erzeugt. Ein lock-and-release Testzyklus dauert üblicherweise fünf Sekunden. DMS-Brücken auf dem Sensor, der an der Messradachse befestigt ist, messen die Auflast und die Reibkraft. Diese werden zusammen mit der Geschwindigkeit des Messrades und der Fahrzeuggeschwindigkeit alle 0,01 s fortlaufend aufgezeichnet. Der LFC wird bestimmt aus der mittleren Reibungskraft einer 1-Sekunden-Messung nachdem das Rad blockiert wurde und sich 0,5 s beruhigen durfte. Die maximale Reibungskraft wird aus der Zeit-Reibungs-Kurve interpoliert. Alle Zeit-Reibungs-Werte werden aufgezeichnet, so dass detaillierte Analysen möglich sind. Die Länge der Stichprobenabschnitte hängt von der Messgeschwindigkeit ab, da alle Messungen in einem bestimmten Zeitintervall stattfinden sollen. In der Regel werden profillose ASTM E-524 Reifen verwendet. Für Messungen können beide Räder verwendet werden (in England jedoch nur das rechte). Die Wasserfilmdicke wird durch Pumpen, die mit der Antriebswelle verbunden sind, kontrolliert. Steigt die Messgeschwindigkeit, wird mehr Wasser abgegeben. Die Dicke des Wasserfilms beträgt normalerweise 1,0 mm, obwohl der ASTM-Standard von 0,5 mm auch möglich ist (Do et al., 2008).

### **SALTAR**

Das kontinuierliche Griffigkeitsmesssystem SALTAR wurde in erster Linie für Griffigkeitsmessungen auf Eis und Schnee ohne Bewässerung der Oberfläche entwickelt. Es erfasst die Längsreibung und kann an verschiedene Fahrzeuge montiert werden. Sein symmetrischer Aufbau erlaubt die Aufhängung und damit auch die Messung in beiden Radspuren SALTAR misst den LFC bei variablen Schlupf, d.h. vom frei laufenden bis zum blockierten Rad. Ein Druckluftsystem erzeugt eine Auflast von 700 N auf das Messrad. Es wird ein Bridgestone 8F-228 135R X 12 Reifen verwendet (Reifendruck 207 kPa). Ein elektronisches Bremssystem regelt die Bremszyklen (Do et al., 2008).

### **T2GO**

Der T2GO wird von ASFT Swiss AG (in der Schweiz) und ASFT Industries AB (in Schweden) vertrieben. Dieses Gerät wird manuell von einem Fußgänger gezogen und wurde für Messungen bei beengten Verhältnissen entwickelt. Eine dynamische Messung der Griffigkeit bei Geschwindigkeiten größer 5 km/h ist mit dem T2GO nicht realisierbar. Meist wird das Gerät für Fahrbahnmarkierungen eingesetzt. Es kann auch in anderen Bereichen eingesetzt werden, wo keine Fahrzeuge verwendet werden können, wie z.B. in Einkaufszentren oder auf Bürgersteigen (Do et al., 2008).

Das Gerät erfasst die Längsreibung mit Hilfe von zwei sehr kleinen Messrädern. Sowohl das Messrad als auch das Führungsräder haben eine Größe von 3" (75 mm). Ein Zahnriemen-System erzeugt einen konstanten Schlupf von 20% (Do et al., 2008).

### **VTI Portable Friction Tester (PFT)**

Der VTI Portable Friction Tester wurde für Messungen der Griffigkeit von Straßenoberflächen entwickelt. Das Gerät erfasst die Längsreibung und wird mit geringer Geschwindigkeit manuell gezogen (Do et al., 2008).

### **VTT Friction Lorry**

Es sind nur wenige Informationen zu diesem Gerät verfügbar. Der VTT wird in Finnland eingesetzt und ist in der Lage sowohl den SFC (Sideway Friction Coefficient = Querreibungskoeffizient) als auch die Reibung mit blockiertem Rad zu messen. Der SFC wird auf angehängter Fahrbahn bei einer Messgeschwindigkeit von 60 km/h und einem Schräglaufwinkel von 8° gemessen. Die Auflast beträgt 390 kg.

## **2.5 Ansätze zur Berührungslosen Griffigkeitsmessung**

Ein berührungsloses Griffigkeitsmessverfahren gibt es weltweit noch nicht. Zwar gibt es auf dem Fahrzeugsektor Ansätze, über den sogenannten „Intelligenten Reifen“ (Darmstädter Reifensensor und Seitenwand-Torsions-Sensor) (Fach et al., 1998; Becherer, 1998; Cyllik et al., 2001; Strothjohann, 2000) nicht nur auf den Kraftschluss, sondern auch das Kraftschlusspotential zu schließen (was einen großen Schritt zur Griffigkeitsmessung bedeutete), aber diese Sensoren erlauben bisher nur eine grobe, qualitative Einstufung, die zudem für die in der Regel anzutreffenden, höheren Griffigkeitsniveaus keine ausreichende Differenzierung mehr erlaubt. Für die Prognose des Kraftschlusspotentials wird von fahrzeugtechnischer Seite daher generell ein Messverfahren favorisiert, das seine Eingangsgrößen von verschiedensten Sensoren und Stellgliedern am Fahrzeug bezieht (Becker et al., 2001; Beller et al., 2000; Klempau, 2000; Dieckmann, 1992). Parameter sind z.B. Geschwindigkeiten, Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigungen, Motordrehmoment und -drehzahl, Reifendruck, -verformungen und -temperatur, Drehzahldifferenzen der Räder, Außentemperatur, Messgrößen von Nässesensoren, etc.). Siehe zu diesem Thema vor allem die Veröffentlichungen aus dem Hause Continental und die zahlreichen Arbeiten des Fachgebietes Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Darmstadt (u. a. Projekt PROMETHEUS), die im Rahmen der VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, veröffentlicht worden sind, sowie für eine Zusammenfassung die Veröffentlichungen zu den Projekten APOLLO (2003) und FRICTI@N (2009) sowie für eine Einführung in die Thematik „Reibwert Reifen-Fahrbahn“ die umfangreiche Literaturrecherche und die Veröffentlichungen von Thomas Bachmann, ebenfalls in den VDI-Fortschritt-Berichten erschienen (Bachmann, 1996, 1998, 1999).

Auf dem straßenbaulichen Sektor sind bisher fast ausschließlich Messräder eingesetzt worden, die an einem Pkw, Lkw oder Messanhänger angebracht den Reibwert zur Straße messen (s. Kapitel 2.4). Dies geschieht i.d.R. auf angehängter Strasse, entweder blockiert, unter konstantem Schlupf oder unter kontinuierlich variiertem Schlupf (Hiersche et al., 1990; www.norsemeter.no). Ohne zusätzliches Messrad kommt ein in Finnland eingesetztes Messver-

fahren aus, das auf kurzzeitigen Blockierbremsungen beruht (Malmivuo, 2001). Das Fahrzeug wird dabei nur unerheblich in seiner Bewegung gehindert. Das Gerät misst die Abbremsung und berechnet daraus die Reibkraft bzw. die Griffigkeit. Die Genauigkeit der Messrad-Systeme wird jedoch nicht erreicht; dafür ist das Gerät preisgünstig und kann relativ unkompliziert in jedes Fahrzeug eingebaut werden.

Eine sehr interessante Möglichkeit, zu einer quantitativen Bestimmung des Kraftschlusspotentials bzw. der Griffigkeit zu gelangen, kommt aus der Polymerforschung. Die grundlegenden Forschungsarbeiten von Kummer (1966) und Grosch (1966) haben die Theorie der Gummireibung jahrzehntelang geprägt. Während jedoch für die Adhäsionsreibung schon seit Schallamach (1953) quantitative Modelle bekannt sind, sind erst durch die Arbeiten von Radó (1994), Persson (1996), Heinrich (1997) und Klüppel (2000) Modelle entstanden, die auch den bei Bremsung auf nasser Fahrbahn dominierenden Hystereseanteil der Reibung quantifizierbar machen. Wichtige Elemente dieser Arbeiten sind:

- Das Oberflächenmodell (selbst-affine Oberfläche, fraktale und/oder spektrale Beschreibung),
- das visko-elastische Gummimodell (komplexer E-Modul, Temperatur- und Frequenzabhängigkeit) sowie
- das Kontaktmodell (beschreibt Eindringtiefe, Kontaktflächen und -drücke).

Während Heinrich (1997) und Klüppel (2000) ein Kontaktmodell basierend auf der Arbeit von Greenwood und Williamson (1966) benutzen, entwickelte Persson ein eigenes Kontaktmodell.

Die Arbeiten von Heinrich (1997) und Klüppel (2000) zeigen eine gute Korrelation zwischen der Theorie bei alleiniger Berücksichtigung des Hystereseanteils der Reibung und Bremsversuchen bei Nässe, und zwar für verschiedenste Reifentypen. Bemerkenswert ist, dass sich Blockier- und ABS-Bremsung durch einen Gummiquader als einfaches Fahrzeug- bzw. Reifen-Ersatzsystem abbilden lassen, der die spezifischen Druckverhältnisse in der Reifenaufstandsfläche bzw. in der Kontaktfläche des Profilstollens berücksichtigt. Eigene Bremsversuche (Mayer et al., 2000) bestätigten, dass ein einfaches Ein-Massen-Modell die Längsdynamik bei ABS-Bremsung auf nasser Fahrbahn sehr gut beschreibt: Theorie und Messungen ergeben praktisch deckungsgleiche Verzögerungskurven.

Aufbauend auf den genannten Arbeiten zur Theorie der Gummireibung (insbesondere Persson (1996), Heinrich (1997) und Klüppel (2000)) haben in jüngerer Zeit Schramm (2002), Lindner (2005) und LeGal (2008) weitere experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Hysterese- und Adhäsionsreibung durchgeführt. Der in Ansatz der berührungslosen Griffigkeitsmessung baut auf diesen Arbeiten auf.

### **3 Untersuchungsmethodik**

Das Konzept der berührungslosen Griffigkeitsmessung besteht in der berührungslosen Erfassung der Textur und der rechnerischen Ableitung eines Reibwertes auf Basis dieser Texturdaten. Essentiell für die Qualität der Berührungslosen Griffigkeitsmessung ist eine ausreichend große Datenbasis. Im Projekt „Berührungslose Griffigkeitsmessung (BeGriff, s. (Steinauer et al., 2012)) wurden unterschiedliche repräsentative, praxisnahe Fahrbahnoberflächen zum Teil im Labor selbst hergestellt, zum Teil in Form von Bohrproben beschafft (s. Kapitel 3.1). An den Oberflächen wurden Texturmessungen zur Erfassung der topographischen Merkmale und Griffigkeitsmessungen unter Verwendung berührender Griffigkeitsmessverfahren durchgeführt (s. Kapitel 3.2 und 3.3).

Um eine qualitativ hochwertige Datenbasis für den Nachweis der Berührungslosen Griffigkeitsmessung zu schaffen, wurde im Rahmen dieses Projektes nicht nur auf eine große Spreizung von verschiedenen Oberflächenvarianten, sondern auch auf die Qualität der Daten selbst Wert gelegt. Vor der Datenauswertung erfolgte jeweils Qualitätskontrolle der optischen Texturmessung. Nur die Probekörper mit einem Fehleranteil von unter 40% (ungültige Messwerte und Ausreißer) wurden, in die weiteren Untersuchungen übernommen. Mittels geeigneter Interpolationsverfahren konnten die detektierten Fehlstellen ersetzt und eine realitätsnahe Abbildung der realen Oberfläche erstellt werden. Damit konnte der Einfluss der Qualität der Texturdaten auf die Ergebnisse der Rechenmodelle weitergehend eliminiert werden. Die verbliebenen Proben wurden nach einem ersten Untersuchungsdurchlauf durch Polieren und/oder durch Sandstrahlen einer Wiederverwendung zugeführt, wodurch die Datengrundlage wieder erhöht werden konnte.

Auf die Auswahl und Variation der Oberflächen, die Texturmessungen sowie die Griffigkeitsmessungen wird nachfolgend noch genauer eingegangen.

#### **3.1 Bereitstellung repräsentativer Fahrbahnoberflächen**

Die Art und Anzahl der Probekörper orientierte sich am Griffigkeitsmessverfahren und den Rechenalgorithmen für die Berührungslose Griffigkeitsmessung (s. Kapitel 5).

##### **3.1.1 Probenherkunft**

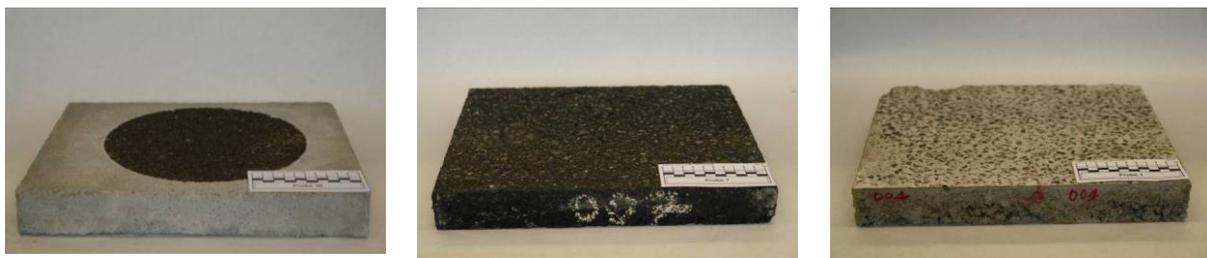
Für das Texturparametermodell (s. Kapitel 5.1) und das Gummireibungsmodell (s. Kapitel 5.2) wurde darauf geachtet, dass es sich um repräsentative, praxisnahe Fahrbahnoberflächen handelt, die das gesamte in der Realität angetroffene Griffigkeitsspektrum widerspiegeln. Nur so ist gewährleistet, dass das entwickelte Verfahren auch im späteren Praxiseinsatz funktionstüchtig ist.

Die Oberflächenvarianten wurden überwiegend aus bestehenden Straßenbefestigungen in Form von Bohrkernen (i.d.R.  $\varnothing$  225 mm) entnommen. Hierzu wurde Kontakt mit den Straßenbauverwaltungen des Landes NRW sowie der Stadt Aachen aufgenommen um Informationen über anstehende Sanierungsmaßnahmen in Erfahrung zu bringen. Aus diesen sanierungsbedürftigen Strecken wurden i. d. R. aus der Rollspur die entsprechenden Bohrkerngezogen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Entnahmestellen ein homogenes Oberflächenbild auf-

wiesen, d. h. keine gravierenden Kornverluste oder ähnliche Schadensbilder vorlagen, die zu Beeinträchtigungen bei den späteren Messungen führen könnten. Allerdings zeigte sich später im Rahmen der Laboruntersuchungen, dass einige Asphaltproben nennenswerte plastische Verformungen (Spurrinnen) aufwiesen, was teilweise zu Schwierigkeiten bei den Texturmessungen (maximaler vertikaler Messbereich) und auch bei den Griffigkeitsmessungen führte. Die für diese Platten erhaltenen Ergebnisse wurden mit der notwendigen Sorgfalt behandelt und nur bei Plausibilität in die Datenbasis für die Modelle aufgenommen.

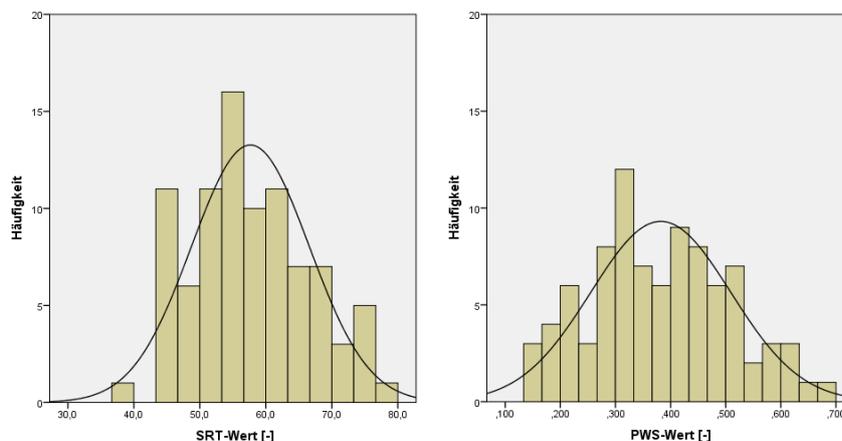
Die auf diese Weise beschafften Oberflächenproben wurden um Laborproben aus Asphalt und Beton ergänzt. Im Falle der Asphaltproben wurde zunächst Mischgut in einem Laborzwangsmischer hergestellt, das anschließend im sog. Walzsektorverdichtungsgerät nach TP Asphalt-StB, Teil 33 (FGSV, 2010) zu Asphaltplatten in den Abmessungen 320 x 260 mm<sup>2</sup> verdichtet wurde. Die Betonproben wurden unter Verwendung von Rahmenschalungen hergestellt, in denen der Beton händisch eingefüllt, verdichtet und abgezogen wurde. Zur Herstellung unterschiedlicher Oberflächenstrukturen wurden die Oberflächen teils ausgewaschen (Waschbeton) und teils mit einer definierten Texturierung (Besenstrich) versehen.

In Bild 3-1 sind exemplarisch drei Probekörper dargestellt.



**Bild 3-1:** Darstellung dreier Oberflächenproben: Bohrkern in Mörtel eingefasst (links), Asphaltplatte aus dem Walzsektorverdichtungsgerät (mitte), Betonprobe (rechts)

Bei der Erstellung der für die Modelle erforderlichen Datenbasis wurde darauf geachtet, dass sowohl Probekörper mit hoher (high- $\mu$ ) als auch mit niedriger Griffigkeit (low- $\mu$ ) in das Untersuchungsprogramm einbezogen sein müssen (vgl. Bild 3-2). Die Sicherstellung der gewünschten Repräsentativität erfolgte einmal über die Materialauswahl (Herkunft) und darüber hinausgehend über den Beanspruchungszustand (Konditionierung) der Proben, s. Kapitel 3.1.2.



**Bild 3-2:** Häufigkeitsverteilung der Griffigkeitskennwerte der für die Modellierung angewendeten Probekörper. links: SRT-Werte, rechts: PWS-Werte

Für die Erstellung eines empirischen Gummireibungsmodells (s. Kapitel 5.3) wurden massive Granitplatten (s. Bild 3-3, links) ausgewählt, die nahezu keine Makrotextur (s. Bild 3-3, rechts) und somit kein Drainagevermögen besitzen. Der Einfluss der Makro- und Megatextur auf die Griffigkeit der Oberfläche wird eliminiert, so dass die Griffigkeit ausschließlich von der Schärfe der Mikrotextur abhängig ist.

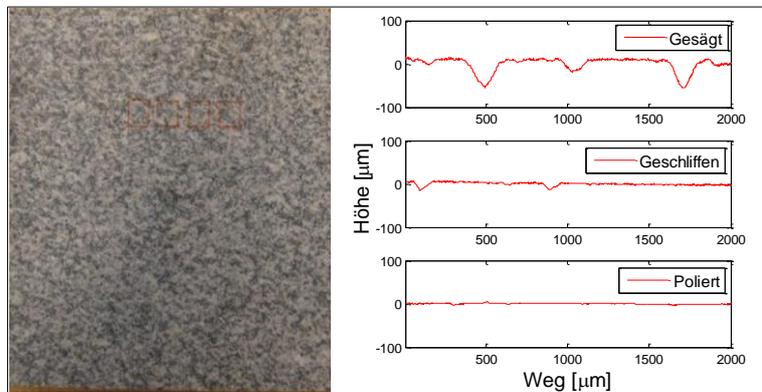


Bild 3-3: Massive Granitplatte und ihr Oberflächenprofil (Steinauer et al., 2011)

Die massiven Granitplatten wurden werkseitig maschinell mit unterschiedlichen Rauheiten angefertigt (Steinauer et al, 2011):

- Gesägte Oberfläche (max. Rautiefe  $\leq 0,05$  mm, SRT-Wert  $\geq 50$ ),
- geschliffene Oberfläche (max. Rautiefe  $\leq 0,02$  mm, SRT-Wert  $\approx 35$ )
- polierte Oberfläche (max. Rautiefe  $\leq 0,005$  mm, SRT-Wert  $\leq 20$ ).

Um die Griffigkeit der Probekörper weiter zu variieren, wurden sie mithilfe von verschiedenen Polierdauern und unterschiedlichen Poliermitteln (Quarzsand und -mehl) im Aachener Rafeling Tester (ARTE, s. Kapitel 3.1.2) beansprucht. Daraus ergaben sich insgesamt 44 Messungen an massiven Granitplatten. Zusätzlich wurden zwölf, auf Holzunterlagen verklebte Schleifpapiere (s. Bild 3-4) mit aufgenommen, um den sog. „high- $\mu$ “ Bereich (max. Rautiefe  $\leq 0,1$  mm, SRT-Wert zwischen 75 und 100 Einheiten) abzudecken.

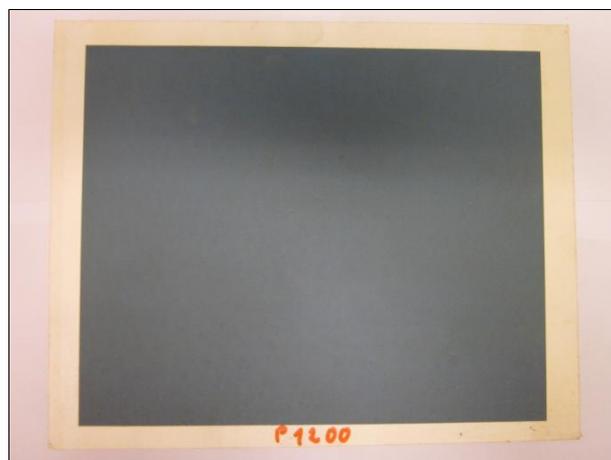


Bild 3-4: Auf Holzplatte aufgeklebtes Schleifpapier (Wang, 2011)

### 3.1.2 Konditionierung

Der Verkehr verursacht durch die polierende Wirkung der Reifen eine stetige Abnahme der Griffigkeit. Diese auf der Straße ablaufenden Prozesse können im Labor mit dem Aachener-Ravelling-Tester (ARTe) simuliert werden.

Mit dieser am Institut für Straßenwesen Aachen entwickelten Prüfmaschine werden Probekörper einer realistischen Schubbeanspruchung ausgesetzt, die aus einer überlagerten Translations- und Rotationsbewegung entsteht (s. Bild 3-5). Die Translationsbewegung wird dabei durch einen horizontal verfahrbaren Schlitten hervorgerufen, die Rotationsbewegung durch ein sich um die vertikale Achse rotierendes Reifenpaar.

Die im Labor hergestellten Platten mit den Abmessungen 320 x 260 mm<sup>2</sup> konnten jeweils paarweise direkt in den Schlitten eingespannt werden. Die aus den Straßen entnommenen Bohrkernne mussten hierfür zunächst in Mörtel eingefasst werden.

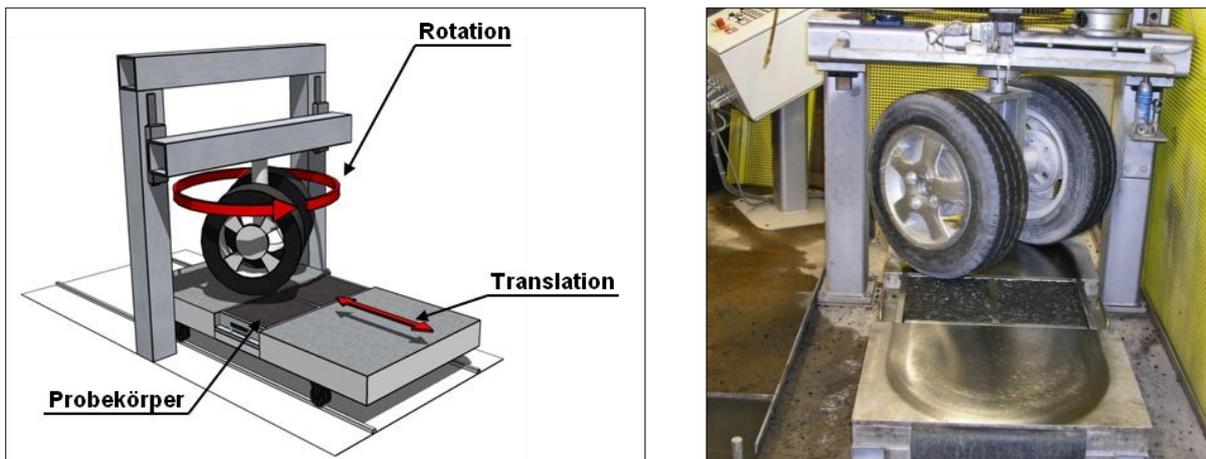


Bild 3-5: Aachener-Ravelling-Tester; Prinzipskizze (links), Realbild (rechts)

Durch den Einsatz echter Fahrzeugreifen lässt sich die Polierbeanspruchung praxisnah realisieren. Über die Variation von Auflast und Reifendruck kann zudem die Intensität gesteuert werden. Bei den Fahrzeugreifen handelt es sich um eine gewöhnliche Anhängerbereifung im Format 165/75 R 14 C.

Die Polierbeanspruchung wurde hier mit einem Reifeninnendruck von 2 bar und einer Auflast von 1500 N durchgeführt. Der horizontal verfahrende Schlitten besitzt eine Taktung von 9 Translationsbewegungen (Hin & Rück) pro Minute. Die Reifen drehen sich mit 41 Umdrehungen pro Minute um die eigene Achse. Der Abstand der Radmitten zueinander beträgt 55 cm, woraus eine Umlaufgeschwindigkeit der frei rollend gelagerten Räder von ~1,2 m/s resultiert. Um die Polierwirkung zu beschleunigen, können Poliermittel und Wasser zudosiert werden.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode gegenüber anderen Verfahren, wie z. B. dem Polierverfahren nach Wehner/Schulze (s. Kapitel 3.3.2), besteht in der Tatsache, dass die gesamte Probenoberfläche poliert wird. Hierdurch wird es möglich, aus einer „Materialvariante“ mehrere Datensätze (Textur – Griffigkeit) zu generieren, indem die Platten nach der erstmaligen Oberflächencharakterisierung der beschriebenen Verschleißbeanspruchung unterzogen und anschließend erneut charakterisiert werden, sprich die Textur und die Griffigkeit gemessen wird.

## 3.2 Texturmessungen

### 3.2.1 Allgemeines

Eine Fahrbahnoberfläche kann in Bereiche unterschiedlicher Wellenlängen unterteilt werden, die sich in ihrer Wirkung auf die einzelnen Gebrauchseigenschaften (z. B. Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Rollwiderstand, Griffigkeit) unterscheiden. Für die Griffigkeit sind die Makro- und Mikrotextur von Bedeutung, die definitionsgemäß durch Wellenlängen unterhalb von 50 mm repräsentiert werden.

Die Texturmessungen an den Oberflächenproben sind elementar für die Entwicklung der berührungslosen Griffigkeitsmessung, da sie den Input für die Reibmodelle liefern.

Die Anforderungen an die Messungen bzw. an das Messverfahren sind hoch und ergeben sich primär aus zwei Randbedingungen:

1. zum Einen müssen alle für die Griffigkeit relevanten Texturelemente, mithin auch die feinsten Strukturen im Mikromillimeterbereich erfasst werden, da diese, wie zuvor ausgeführt, einen hohen Einfluss auf die Griffigkeit haben.
2. zum Anderen muss die Oberfläche statistisch zuverlässig charakterisiert werden, was eine Mindestmenge an Informationen erfordert und somit eher die Makrotexturebene betrifft.

Darüber hinaus ist darauf zu achten, die Texturdaten in den Bereichen aufzunehmen, in denen auch die Griffigkeit gemessen wird. Beim SRT-Verfahren wird beispielsweise eine andere Fläche vom Gummi überstrichen, als dies beim Wehner/Schulze-Verfahren der Fall ist.

### 3.2.2 Messverfahren und Messprinzip

Die Messungen erfolgten mit dem am Institut für Straßenwesen vorhandenen optischen Oberflächenmessgerät der FRT GmbH<sup>1</sup>, das nach dem Prinzip der chromatischen Weißlichtmessung arbeitet (s. Bild 3-6). Die physikalische Auflösung dieses Verfahrens liegt im lateralen Bereich bei 1 bis 2 µm; vertikal wird eine Auflösung von 6 nm erzielt und damit die Erfassung selbst kleinster Texturelemente bis in den Mikrometerbereich gewährleistet.

Der vertikale Messbereich beträgt etwa 5 mm und wird erreicht, indem bis zu 9 Teilprofile (Schichten) aneinandergesetzt werden. Da einige Probekörper Texturtiefen von mehr als 5 mm aufwiesen, konnte hier der unterste Profilbereich nicht aufgenommen werden. Das ist insofern nicht problematisch, als das der untere Profilteil für die Griffigkeit nur von untergeordneter Bedeutung ist. Ganz vernachlässigbar ist dieser Bereich natürlich keineswegs, da hierüber die Wasserdrainage – insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten – sichergestellt wird. An dieser Stelle wird auch auf das in Kapitel 5.1 beschriebene Texturparametermodell verwiesen.

Grundsätzlich würde es also ausreichen, nur den oberen Profilteil (Kontaktbereich) sehr genau (Mikrometer) zu erfassen. Für den unteren Profilteil würde eine Genauigkeit im Millimeterbereich vollkommen ausreichen. Ein derartiges Messverfahren existiert jedoch derzeit nicht, so dass das gesamte Profil mit einer einheitlichen Auflösung aufgenommen wird.

---

<sup>1</sup> FRT – Fries Research & Technology GmbH, Bergisch Gladbach



### **Kenndaten Texturmessgerät**

Messprinzip:

Weißlichtinterferometrie

Messbereich:

lateral: 100 x 100 mm<sup>2</sup>

vertikal: 5 mm (in mehreren Schichten)

Auflösung:

lateral: 1-2 µm

vertikal: 20 nm

*Bild 3-6: Texturmessgerät mit Probekörper (in Mörtel eingefasster Asphaltbohrkern)*

Das Messgerät wurde speziell auf die Messung von Gesteins- und Straßenoberflächen abgestimmt, so dass auch Proben mit im Vergleich zum Messbereich sehr großen Abmessungen und hohem Gewicht vermessen werden können. Weiterhin wurde das Messfeld des Messgerätes auf eine Fläche von insgesamt 100 x 100 mm<sup>2</sup> erweitert, wodurch eine maximale Profillänge von 141,4 mm erreicht wird.

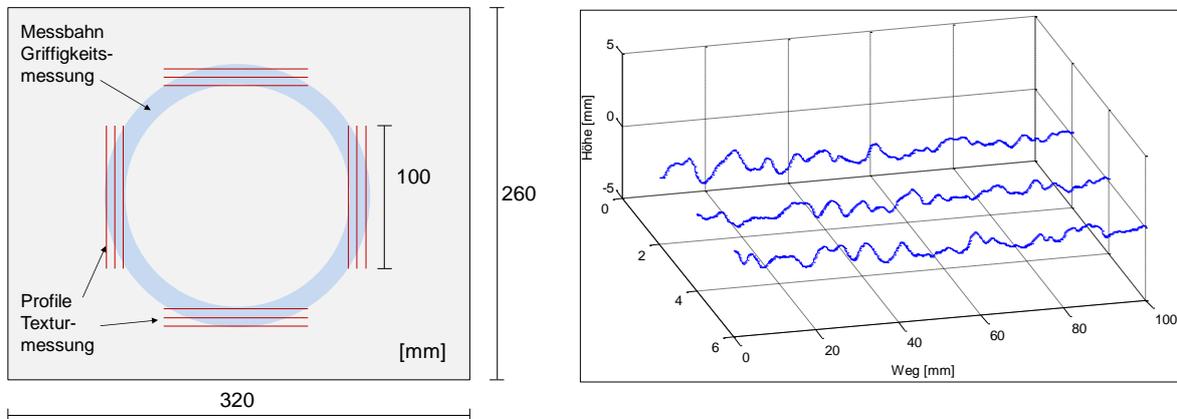
Der limitierende Faktor bei derartigen Messungen ist grundsätzlich die Anzahl der Messpunkte. Mit dem vorhandenen Messgerät können je Messung 2 Mio. Punkte aufgezeichnet werden. Die Realisierung von 3D-Texturmessungen im Mikrometer-Bereich bleibt daher auf kleinere Flächen begrenzt. Wie zuvor schon ausgeführt kann jedoch auf 3D-Messungen verzichtet werden, wenn die Oberfläche mit einer ausreichenden statistischen Sicherheit durch 2D-Profildaten charakterisiert werden kann. Diesem Ansatz wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gefolgt, indem von jeder Oberfläche mehrere 2D-Profile gemessen wurden. Der Frage, welche Anzahl an Profilen notwendig ist, um die Charakterisierung der Oberflächen sicherzustellen, wird im anschließenden Abschnitt nachgegangen.

### **3.2.3 Anordnung der Messlinien**

Der Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn ist unzweifelhaft ein 3-dimensionales Problem, so dass grundsätzlich eine 3D-Aufnahme der Fahrbahnoberfläche sinnvoll und wünschenswert ist. Beim Konzept der berührungslosen Griffigkeitsmessung handelt es sich jedoch um ein schnell-fahrendes Messsystem, das die Straßenoberfläche einmal im fließenden Verkehr erfassen soll. Aufgrund der dabei anfallenden hohen Datenrate kann es hilfreich sein, wenn die benötigten 3D-Informationen auch aus 2D-Informationen gewonnen werden können. Dieser Ansatz erscheint zudem gerechtfertigt, wenn man sich die selbstähnlichen Eigenschaften der Straßenoberfläche vor Augen führt.

Wie bereits erwähnt, orientierte sich die Anzahl und Anordnung der Messlinien an dem Griffigkeitsmessverfahren (s. Kapitel 5). Für das Texturparametermodell (s. Kapitel 5.1) und das Gummireibungsmodell (s. Kapitel 5.2) wurden die Reibwerte nach Wehner/Schulze (PWS) herangezogen, die auf einer Kreisbahn gemessen wurden (s. Kapitel 3.3.2). Die Profile mussten dementsprechend so angeordnet werden, dass diese möglichst im Kontaktbereich von Messgummi und Oberfläche lagen. Es wurden insgesamt 12 Profile à 10 cm je Probe aufgenommen,

wobei jeweils 3 Profile nebeneinander im Quadrat angeordnet waren. Die genaue Positionierung wird aus Bild 3-7 links ersichtlich. In Bild 3-7 rechts sind exemplarisch drei 10 cm lange Messprofile abgebildet, wie sie sich bei einer lateralen Auflösung von  $3,3 \mu\text{m}$  nach der beschriebenen Aufbereitung darstellen.



*Bild 3-7: Anzahl und Anordnung der Messlinien auf den Probekörpern (links) und exemplarische Darstellung der gemessenen 10 cm langen Texturprofile (rechts)*

Für das Parametermodell auf Basis von Mikrotexturdaten (s. Kapitel 5.3) erfolgten die Texturaufnahmen auf jeder Probeplatte nur an einer charakteristischen Messstelle von  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ . Die Auflösung lag in x-Richtung bei  $2 \mu\text{m}$  ( $10 \text{ mm}/5.000$  Profile) und in y-Richtung bei  $25 \mu\text{m}$  ( $10 \text{ mm}/400$  Profile), so dass für jede Messstelle insgesamt zwei Millionen Messpunkte vorlagen.

### 3.2.4 Qualität der Texturdaten

Die Primärdaten der Texturmessung waren vor der Auswertung aufzubereiten. Da es sich bei dem Messverfahren um ein optisches Messverfahren handelt, waren systembedingte Grenzen zu beachten. Die Auswertung des Messsignals, d. h. die Ableitung der Höheninformation aus dem reflektierten Lichtsignal, ist von der Beschaffenheit der Prüfoberfläche abhängig.

Im Allgemeinen sind zwei Arten von Messfehlern zu eliminieren (Schulze, 2011):

- **Ungültige Messwerte** sind i.d.R. auf eine unzureichende Reflektion des Lichtes zurückzuführen. Die Intensität des reflektierten Lichtsignals ist nicht ausreichend, um eine eindeutige Höheninformation zu erhalten. Oberflächen mit sehr schlechten Reflexionseigenschaften (spiegelnde oder sehr dunkle Flächen wie Asphaltflächen) oder besondere geometrische Formationen wie steile Flanken können zu einer unzureichenden Reflektion des Lichtes führen. Ungültige Messwerte werden im Messaufschrieb automatisch durch eine Codierung gekennzeichnet und können durch eine Interpolation unter Berücksichtigung der benachbarten, gültigen Messpunkte beseitigt werden.
- **Spikes (Ausreißer)** sind die Messwerte, die in der Höheninformation deutlich von den benachbarten Messwerten abweichen. Sie sind beispielsweise auf falsche Höheninformation durch eine Beugung des Lichtes an extrem scharfen Kanten zurückzuführen. Die Spikes werden im Messaufschrieb nicht automatisch gekennzeichnet. Sie müssen durch einen geeigneten Filter identifiziert und durch einen interpolierten Wert ersetzt werden.

Zur Erzielung bestmöglicher Ergebnisse mussten die Messparameter (Lichtempfindlichkeit, Abtastrate etc.) für die unterschiedlichen Oberflächen jeweils angepasst werden. Einige Proben wurden ein zweites, teilweise sogar ein drittes Mal vermessen, um mit angepassten Parameter-einstellungen zu besseren Ergebnissen zu gelangen. Trotzdem erwiesen sich die Messungen für einige dunkle und grobkörnige Oberflächen als sehr schwierig (Steinauer et al., 2012).

Für die gemessenen Texturprofile erfolgte eine Bereinigung von Fehlstellen und Ausreißern sowie die Eliminierung eines eventuell vorhandenen Trends mittels geeigneter Algorithmen (Schulze, 2011) (Wang, 2011). Die bereinigten Texturdaten bildeten die Grundlage für die weiteren Berechnungen der Kenngrößen und Texturindikatoren mit der Software MATLAB®.

### 3.3 Griffigkeitsmessungen im Labor

Zur Messung der Griffigkeit existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Messverfahren, die sich grundsätzlich danach unterscheiden lassen, ob die Messung im Labor oder auf der Strecke (in situ) durchgeführt wird (s. Kapitel 2.4).

Im Rahmen dieses Vorhabens kamen das international weit verbreitete SRT-Pendelgerät und das Griffigkeitsmessverfahren nach Wehner/Schulze zum Einsatz. Beide Verfahren werden im Folgenden kurz beschrieben.

#### 3.3.1 Messverfahren SRT

Das SRT-Pendelgerät (*engl.*: Skid Resistance Tester) wurde bereits in Kapitel 2.4.1 beschrieben. Aufgrund seiner Einsatzmöglichkeiten sowohl als Messgerät für wissenschaftliche Untersuchungen im Labor als auch für Routinemessungen auf der Straße ist dieses Verfahren international verbreitet und anerkannt und kommt somit auch in diesem Forschungsvorhaben zur Bewertung der Griffigkeit zum Einsatz. Das verwendete Gerät ist in Bild 3-8 dargestellt.

Aufgrund der relativ geringen Gleitgeschwindigkeit wird mit diesem Verfahren primär die Mikrotextur der Oberfläche bewertet, wogegen Aquaplaning-Effekte weitestgehend unberücksichtigt bleiben.



*Bild 3-8: SRT-Pendelmessgerät (links) und Gleitgummi (rechts)*

Die Messungen werden gemäß der Technischen Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau (FGSV, 2004a) standardmäßig bei 20°C durchgeführt. Bei abweichenden Temperaturen wird der Messwert korrigiert, um den viskoelastischen Eigenschaften des Gummis

Rechnung zu tragen. Da die Messungen in den Laborräumen des Instituts stattfanden, konnte die Bezugstemperatur von 20°C in aller Regel eingehalten werden, so dass keine Messwertkorrekturen nötig waren.

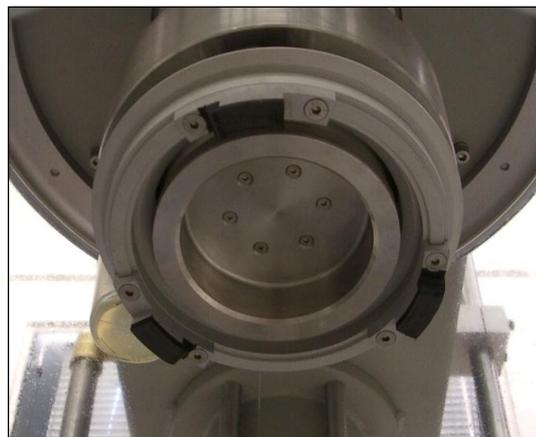
Im Rahmen eigener Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit einem namhaften Reifenhersteller die SRT-Gleitkörper neben der standardmäßigen BAM-Mischung (BAM = Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) mit handelsüblichen Laufflächenmischungen bestückt. Hierbei zeigten sich recht gute Korrelationen zu den Ergebnissen aus ABS-Bremstungen, die in einem vergleichbaren Geschwindigkeitsbereich regeln. Das SRT-Messverfahren scheint die Reibverhältnisse zwischen einem realen Pkw-Reifen und der Fahrbahn recht gut wiederzugeben und kann somit als Bezugswert für die Modellerstellung herangezogen werden.

### 3.3.2 Prüfstand nach Wehner/Schulze

Der Prüfstand nach Wehner/Schulze (PWS) wurde bereits in den 60er Jahren an der Technischen Universität Berlin entwickelt und ermöglicht die Messung der Griffigkeit bei hohen Gleitgeschwindigkeiten. Mittlerweile hat er Eingang in die europäische Normung gefunden und ist somit als standardisiertes Griffigkeitsmessverfahren zur Beurteilung der Griffigkeit von Deckschichten anerkannt (DIN, 2011). Das Prüfverfahren wurde in Kapitel 2.4 nicht aufgeführt, da es sich hierbei um ein reines Labormessverfahren handelt und somit auf der Straße nicht eingesetzt werden kann. Es soll daher an dieser Stelle etwas ausführlicher beschrieben werden.

Der Prüfstand besteht im Wesentlichen aus zwei Einheiten (s. Bild 3-9):

- einer Poliereinheit, zur zeittraffenden Verkehrssimulation, und
- einer Griffigkeitsmesseinheit, für Reibwertmessungen bei hohen Geschwindigkeiten (bis zu 100 km/h)



*Bild 3-9: Prüfstand Wehner/Schulze (links) mit Griffigkeitsmesseinheit (rechts)*

Im Rahmen dieses Vorhabens kam lediglich die Griffigkeitsmesseinheit zum Einsatz. Die Verschleißsimulationen zur Erzielung unterschiedlicher Reibwertniveaus wurde, wie zuvor beschrieben, mit Hilfe des Aachener-Ravelling-Tester realisiert.

Innerhalb der Griffigkeitsmesseinheit sind drei Messgummis auf einer Kreisbahn angeordnet. Jedes der drei Messgummis hat eine mittlere Länge von 30 mm, eine Breite von 14,5 mm und

weist eine Shore-A Härte von 65 Einheiten auf. Die Messgummis gleiten während des Messvorgangs auf einer Kreisbahn mit einem Durchmesser von 18 cm (s. Bild 3-9, rechts).

Für die Reibwertmessung werden die drei Messgummis auf eine Geschwindigkeit von 100 km/h beschleunigt und unter Zugabe von Wasser auf der Prüfoberfläche bis zum Stillstand abgebremst. Der mittlere statische Kontaktdruck beträgt  $0,2 \text{ N/mm}^2$ . Das auftretende Drehmoment wird während des Abbremsvorganges erfasst und der Reibwert aus Drehmoment und vertikaler Auflast ermittelt. Im Ergebnis erhält man eine über den gesamten Geschwindigkeitsbereich aufgezeichneten Reibwert mit einem charakteristischen Reibwert bei 60 km/h. In Bild 3-10 ist ein solcher Reibwertverlauf exemplarisch dargestellt, wobei der Plot von rechts nach links zu lesen ist. Die Bereiche größer 90 km/h und kleiner 10 km/h können aufgrund von Störeffekten (Einfahr-, Stick-Slip-Effekte) i. d. R. nicht verwertet werden.

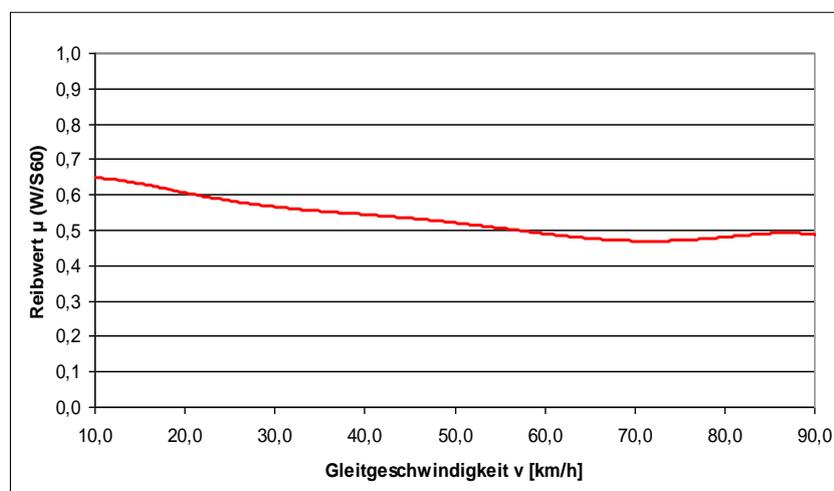


Bild 3-10: Messschrieb einer Griffigkeitsmessung im PWS (exemplarisch)

Während der Messung wird durch die kontinuierliche Wasserzufuhr ein konstanter Wasserfilm auf der Prüfoberfläche sichergestellt. Durch den konstanten Wasserfilm und die hohe Gleitgeschwindigkeit wird der Einfluss der Makrotextur auf den Reibwert des Prüfkörpers messbar. Insbesondere bei der Messung von Probekörpern mit einer äußerst geringen Makrotextur wird das fehlende Drainagevermögen durch einen niedrigen Reibwert bei hohen Geschwindigkeiten und einer starken Zunahme des Reibwertes bei abnehmender Geschwindigkeit deutlich. Im Bereich der niedrigen Geschwindigkeiten, gegen Ende der Griffigkeitsmessung, kommt primär die Mikrotextur des Probekörpers zum Tragen, so dass innerhalb einer Messung neben dem Einfluss der Makrotextur bei hohen Geschwindigkeiten gleichzeitig auch Aussagen bezüglich der Mikrotextur bei entsprechend niedrigen Geschwindigkeiten möglich werden.

Bei den Reibwertmessungen ist zu berücksichtigen, dass die Prüffläche durch das Rotieren der Messgummis auf der vorgegebenen Kreisbahn von den Messgummis mehrfach überstrichen wird, wodurch neben der reinen Reibwertmessung gleichzeitig eine polierende Beanspruchung erfolgt. Werden auf derselben Oberfläche wiederholt Griffigkeitsmessungen durchgeführt, ist eine stetige Abnahme des Reibwertes zu beobachten, die auf eine Erhitzung des Gummis, auf die polierende Wirkung der Messgummis und zum Teil auch auf Gummiabrieb zurückzuführen ist, der sich in der Messspur einlagert.

Auf den Prüfoberflächen werden nach jeder Belastungsstufe zwei Reibwertmessungen durchgeführt, so dass eine statistische Absicherung und Bewertung der Messergebnisse unter Berücksichtigung des Reibwertabfalls möglich ist und Messfehler ggf. aufgedeckt werden können.

### 3.4 Griffigkeitsmessungen in situ (ViaFriction)<sup>2</sup>

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden die Griffigkeitsmessungen in situ mit dem kontinuierlichem Griffigkeitsmesssystem ViaFriction durchgeführt. Der wichtigste Vorteil dieses Verfahrens gegenüber allen anderen kontinuierlichen Griffigkeitsmesssystemen liegt darin, dass der Schlupf variabel einstellbar ist und der ABS-Bremsvorgang eines Pkw-Reifens damit vergleichsweise realistisch simuliert werden kann.

Das ViaFriction-Messgespann besteht aus einem Triebfahrzeug (VW Transporter T5) sowie der Messeinheit (s. Bild 3-11). Diese ist auf einem Messanhänger auf der rechten Seite angeordnet, so dass eine Messung der Griffigkeit in der rechten Rollspur des Triebfahrzeuges erfolgt. Durch einen vollständigen Umbau des Messanhängers könnte ggf. auch eine Messung in der linken Rollspur realisiert werden. Diese Möglichkeit wird aber im Rahmen dieses Vorhabens nicht in Anspruch genommen, da die Griffigkeit in Deutschland standardmäßig in der rechten Rollspur gemessen und bewertet wird. Der Messanhänger besteht aus zwei einzeln aufgehängten Rädern. Auf der linken Seite befindet sich der Laufreifen und auf der rechten Seite die Messeinheit mit dem Messreifen.

Das Messprinzip des ViaFriction beruht auf einem elektrisch gebremsten Rad. Das Abbremsen des Messrades erfolgt durch eine Verbindung der Messreifenachse mit einer Umlenkwellen innerhalb der Messeinheit. An dieser Welle wird die Geschwindigkeit über eine Schlupfkupplung an einen weiteren Zahnriemen, der zum eigentlichen Bremsmechanismus bzw. zu einem Generator führt, übertragen. Hierdurch kann eine Beschädigung des Bremsmechanismus durch zu starke Beschleunigungen oder Geschwindigkeiten verhindert werden, da in diesem Falle ein Durchrutschen der Schlupfkupplung erfolgt.

Der o.g. Generator fungiert bei der Messung der Griffigkeit als elektrische Bremse, der den Messreifen über die geschilderten Zahnriemen auf den gewünschten Schlupfzustand abbremst. Der Reibungsbeiwert wird dabei aus der Geschwindigkeit des Triebfahrzeuges und der benötigten elektrischen Energie berechnet, die zum Abbremsen, d. h. zum Aufbau des Schlupfes, benötigt wird. Die erzeugte elektrische Energie wird an elektrischen Keramikwiderständen in Abwärme umgewandelt.

Im Rahmen des Projektes wurde auch der Einfluss der Temperatur und Geschwindigkeit auf den Reibwert des ViaFriction untersucht. Danach ergab sich folgende Korrekturformel:

$$\mu = \mu_{(mess)} + 0,00595 * (TA - 20) + 0,0081 * (TW - 20) + 0,004 * (v - 60) \quad (\text{Gl. 3-1})$$

mit:

$\mu_{(Mess)}$ : Messwert ViaFriction [-]

TA: Lufttemperatur in [°C]

---

<sup>2</sup> Weitergehende Informationen zur Griffigkeitsmessung mit dem ViaFriction finden sich im Anhang.

TW: Wassertemperatur in [°C]

v: Messgeschwindigkeit in [km/h]

Der Korrekturalgorithmus ermöglicht eine vergleichende Betrachtung der Reibwerte unter verschiedenen Randbedingungen. Insbesondere können damit abweichende Messgeschwindigkeiten und Messtemperaturen bei der weitergehenden Auswertung im Rahmen dieses Vorhabens berücksichtigt werden.



*Bild 3-11: Griffigkeitsmesssystem ViaFriction*

## 4 Statistische Verfahren

In diesem Kapitel werden die eingesetzten statistischen Verfahren kurz vorgestellt. Die Darstellung beschränkt sich auf die wesentlichen Aspekte der Analysemethoden. Die Einzelheiten zu den Verfahren sind der einschlägigen Statistikkliteratur wie (Molt, 2007), (Backhaus, 2006) und (Schatz, 2008) zu entnehmen. Auf darüber hinausgehende Besonderheiten wird in den jeweiligen Kapiteln gesondert hingewiesen.

### 4.1 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist ein statistisches Analyseverfahren. Ziel ist es, einen statistisch abgesicherten Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu finden. In der einfachen linearen Regression wird der Einfluss einer unabhängigen Variablen X (erklärende Variable) auf eine abhängige Variable Y (erklärte Variable) analysiert. Wird der Zusammenhang zwischen den Variablen durch mehr als eine unabhängige Variable beschrieben, wird nicht eine einfache, sondern eine multiple Regression angewendet.

Innerhalb einer Regressionsanalyse müssen Variablen, die zur weitestgehend vollständigen Beschreibung der Ursache-Wirkungs-Beziehung des zu bestimmenden Zusammenhanges erforderlich sind, zuerst erfasst werden (Backhaus, 2006).

#### 4.1.1 Regressionsfunktion

Eine geeignete Regressionsfunktion ist danach abzubilden, dass sie eine Minimierung der Abweichungsquadrate zwischen beobachteten und prognostizierten Werten ermöglichen kann (Backhaus, 2006).

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - \hat{y}_k]^2 \rightarrow \min! \quad (\text{Gl. 4-1})$$

mit:

$y_k$ : Beobachtungswert der abhängigen Variablen Y für  $x_k$

$\hat{y}_k$ : Ermittelter Schätzwert von Y für  $x_k$

$e_k$ : Residualgröße, Abweichung des Schätzwertes vom Beobachtungswert

K: Zahl der Beobachtungen

Die am häufigsten angewendeten Regressionsfunktionen sind nachfolgend dargestellt:

#### Einfache lineare Regression

Die Zielfunktion wird nach folgender Formel berechnet (Backhaus, 2006):

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - \hat{y}_k]^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_k)]^2 \rightarrow \min \quad (\text{Gl. 4-2})$$

mit:

$y_k$ : Beobachtungswert der abhängigen Variablen Y für  $x_k$

$\hat{y}_k$ : Ermittelter Schätzwert von Y für  $x_k$

- $e_k$ : Residualgröße, Abweichung des Schätzwertes vom Beobachtungswert
- $K$ : Zahl der Beobachtungen
- $b_0$ : Konstantes Glied
- $b_1$ : Regressionskoeffizient
- $x_k$ : Werte der unabhängigen Variablen ( $k = 1, 2, \dots, K$ )

### **Multiple lineare Regression**

Bei den meisten Untersuchungen ist es hilfreich, mehr als eine unabhängige Variable in das Modell aufzunehmen. Die Zielfunktion wird nach folgender Formel berechnet (Backhaus, 2006):

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_{1k} + b_2 x_{2k} + \dots + b_J x_{Jk})]^2 \rightarrow \min \quad (\text{Gl. 4-3})$$

mit:

- $y_k$ : Beobachtungswert der abhängigen Variablen Y für  $x_k$
- $\hat{y}_k$ : Ermittelte Schätzwert von Y für  $x_k$
- $e_k$ : Residualgröße, Abweichung des Schätzwertes vom Beobachtungswert
- $K$ : Zahl der Beobachtungen
- $b_0$ : Konstantes Glied
- $b_j$ : Regressionskoeffizient ( $j = 1, 2, \dots, J$ )
- $x_{jk}$ : Werte der unabhängigen Variablen ( $j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$ )
- $J$ : Zahl der unabhängigen Variablen

### **Einfache/Multiple nichtlineare Regression**

Die Nichtlinearität kann in vielen verschiedenen Formen auftreten. Generell lässt sich die Variable  $x$  (oder  $x_{jk}$  bei multipler Regression) durch eine Variable  $f(x)$  (oder  $f(x_{jk})$  bei multipler Regression) ersetzen, wobei  $f$  eine beliebige nichtlineare Funktion bezeichnet (Backhaus, 2006).

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - \hat{y}_k]^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - f(x_k)]^2 \rightarrow \min \quad (\text{Gl. 4-4})$$

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - f(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{Jk})]^2 \rightarrow \min \quad (\text{Gl. 4-5})$$

mit:

- $y_k$ : Beobachtungswert der abhängigen Variablen Y für  $x_k$
- $\hat{y}_k$ : Ermittelte Schätzwert von Y für  $x_k$
- $e_k$ : Residualgröße, Abweichung des Schätzwertes vom Beobachtungswert
- $x_{jk}$ : Werte der unabhängigen Variablen ( $j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$ )
- $J$ : Zahl der unabhängigen Variablen
- $K$ : Zahl der Beobachtungen

Für die obenstehenden Gleichungen sind die unbekannt Parameter der Regressionsfunktion, wie z. B. die Regressionskoeffizienten, so zu bestimmen, dass die Summe der quadrierten Residuen minimal wird.

Die Regressionskoeffizienten besitzen eine inhaltlich wichtige Bedeutung. Sie bestimmen den Betrag, um welchen sich die abhängige Variable bei einer Betragsänderung einer unabhängigen Variablen ändert. Das Vorzeichen der Regressionskoeffizienten gibt die Richtung des Einflusses (Zunahme oder Abnahme) an.

#### 4.1.2 Bestimmtheitsmaß $R^2$

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ist ein Maß der Statistik für den erklärten Anteil der Variabilität (Varianz) einer abhängigen Variablen Y durch ein statistisches Modell. Indirekt wird damit auch der Zusammenhang zwischen der abhängigen und der/den unabhängigen Variablen gemessen. Das Bestimmtheitsmaß ist der Prozentanteil der Variation von Y, der durch die lineare Regression erklärt wird. Es ist eine normierte Größe, deren Wertebereich zwischen Null und Eins liegt. Je höher das Bestimmtheitsmaß ist, desto vollständiger lässt sich die Variable Y durch das lineare Regressionsmodell erklären (Backhaus, 2006).

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^K (\hat{y}_k - \bar{y})^2}{\sum_{k=1}^K (y_k - \bar{y})^2} = \frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

mit:

$y_k$ : Beobachtungswert der abhängigen Variablen Y für  $x_k$

$\hat{y}_k$ : Ermittelter Schätzwert von Y für  $x_k$

#### 4.1.3 F-Statistik

Die F-Statistik stellt ein geeignetes Prüfkriterium für die Frage dar, ob das geschätzte Modell auch über die Stichprobe hinaus für die Grundgesamtheit Gültigkeit besitzt. In die Berechnung der F-Statistik geht neben der Streuungszerlegung zusätzlich der Stichprobenumfang K und die Zahl der Regressoren J ein.

Der F-Test läuft nach folgendem Schema ab (Backhaus, 2006):

- Berechnung des empirischen F-Wertes  $F_{emp}$

$$F_{emp} = \frac{\sum_{k=1}^K (\hat{y}_k - \bar{y})^2}{\sum_{k=1}^K \frac{(y_k - \hat{y}_k)^2}{K - J - 1}} \quad (\text{Gl. 4-7})$$
$$= \frac{\text{erklärte Streuung}/J}{\text{nicht erklärte Streuung}/(K - J - 1)}$$

mit:

$y_k$ : Beobachtungswert der abhängigen Variablen Y für  $x_k$

$\hat{y}_k$ : Ermittelter Schätzwert von Y für  $x_k$

K: Zahl der Beobachtungswerte

J: Zahl der Regressoren

K-J-1: Zahl der Freiheitsgrade

- Vorgabe eines Signifikanzniveaus in Abhängigkeit von der Vertrauenswahrscheinlichkeit (5% oder 1%),
- Auffinden des theoretischen F-Wertes  $F_{\text{tab}}$  in Abhängigkeit vom Signifikanzniveau (s. Abbildung 1.17 in (Backhaus, 2006)),
- Vergleich des empirischen  $F_{\text{emp}}$  mit dem theoretischen  $F_{\text{tab}}$ . Ist  $F_{\text{emp}}$  größer als  $F_{\text{tab}}$ , ist der Zusammenhang signifikant.

## 4.2 Korrelation

Während die Regressionsanalyse zur Beschreibung der Art eines Zusammenhangs mittels einer mathematischen Gleichung herangezogen wird, dient die Korrelationsanalyse vor allem dazu, die Stärke eines Zusammenhangs zu quantifizieren. Die Korrelationsanalyse ist in der Regel nur eine Zwischenstufe für andere Verfahren, wie zum Beispiel der Faktorenanalyse oder der Regressionsanalyse (Wirtschaftslexikon24, 2010).

### 4.2.1 Korrelationsarten

Es existieren verschiedene Methoden, um die Korrelation verschiedener Variablen zu prüfen. Abhängig von der Zahl der untersuchten Variablen wird zwischen der einfachen (bivariaten) und der multivariaten Korrelationsanalyse unterschieden (s. Bild 4-1).

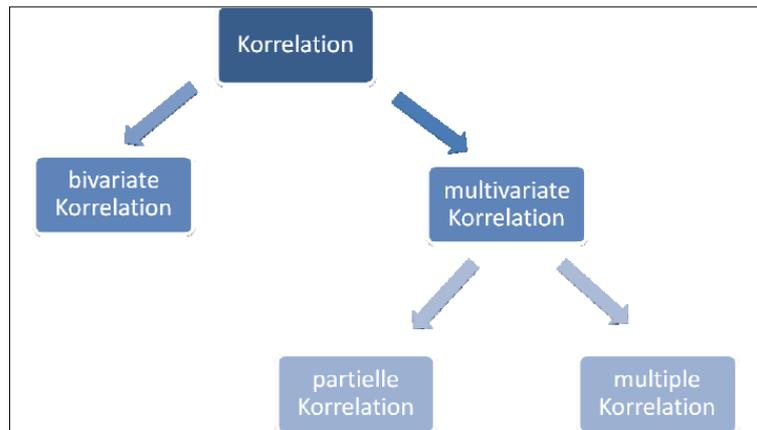


Bild 4-1: Übersicht der Korrelationsarten (Schatz, 2008)

Die bivariate Korrelation bildet den Zusammenhang von zwei Variablen ab. Möchte man die Korrelation für die Ränge der Variablenwerte darstellen, bietet sich beispielsweise der Kendall-Tau-b Korrelationskoeffizient an. Die Korrelation der Rangwerte der Variablen kann mit dem Spearman-Korrelationskoeffizienten abgebildet werden. Für die Korrelation von zwei intervallskalierten Merkmalen ist die Pearson-Korrelation von zentraler Bedeutung.

Mit der multivariaten Korrelationsanalyse können je nach Betrachtungsweise partielle oder multiple Korrelationskoeffizienten ermittelt werden. Der partielle Korrelationskoeffizient beschreibt die Strenge des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen unter der Annahme der Konstanz

der anderen Variablen. Beim multiplen Koeffizienten wird eine Aussage über den simultanen Zusammenhang zwischen einer Variablen und allen anderen getroffen.

#### 4.2.2 Ermittlung der Korrelationskoeffizienten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Korrelation nach Pearson, die partielle und die multiple Korrelation angewendet. Sie werden nachfolgend näher betrachtet.

Der Pearson-Koeffizient wird mit folgender Formel berechnet (Schatz, 2008):

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i) * (\sum y_i)}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (\text{Gl. 4-8})$$

mit:

$x_i, y_i$ : Messwerte aus Stichprobe

Sind zwei Zufallsvariablen also nach Pearson korreliert und signifikant, besteht immer noch die Gefahr, dass die Korrelation auf den gemeinsamen Einfluss einer dritten Zufallsvariablen zurückzuführen ist und dieser nicht erkannt wird. Die partielle Korrelation bietet die Möglichkeit, einen solchen Einfluss auf die Korrelation zweier Zufallsvariablen durch eine dritte zu messen. Seien X und Y die beiden korrelierten Zufallsvariablen und Z die dritte Zufallsvariable, deren Einfluss man messen möchte, so lautet die Formel für die partielle Korrelation (Schatz, 2008):

$$r_{xy \cdot z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} r_{yz}}{\sqrt{1 - r_{xz}^2} \sqrt{1 - r_{yz}^2}} \quad (\text{Gl. 4-9})$$

mit:

$r_{ij}$ : Korrelationskoeffizient von den Zufallsvariablen i und j (= x, y oder z)

x, y: Messwerte aus Stichprobe

z: Zufallsvariable

Der Korrelationskoeffizient für die multiple Korrelation mit drei Variablen wird nach folgender Formel berechnet (Schatz, 2008):

$$r_{a.bc} = \sqrt{\frac{r_{ab}^2 + r_{ac}^2 - 2r_{ab}r_{ac}r_{bc}}{1 - r_{bc}^2}} \quad (\text{Gl. 4-10})$$

mit:

a Zielgröße (abhängige Variable)

b, c Einflussgrößen (unabhängige Variable)

Die Entscheidung, nur die einfache oder die multiple Korrelation anzuwenden, hängt mit den Korrelationskoeffizienten zusammen (Schatz, 2008):

- $|r_{ab \cdot c}| < |r_{ab}|$ : Überschätzung von  $r_{ab}$  wegen c → partielle Korrelation oder  $r_{ac}$
- $|r_{ab \cdot c}| > |r_{ab}|$ : Unterschätzung von  $r_{ab}$  wegen c → partielle Korrelation
- $|r_{ab \cdot c}| = |r_{ab}|$ : → „einfache“ Korrelation
- $|r_{ab \cdot c}|$  und  $|r_{ac \cdot b}| \gg 0$ : → multiple Korrelation

Mit der Korrelationsanalyse wird der sogenannte Korrelationskoeffizient (s. Tabelle 4-1) ermittelt. Anhand des Korrelationskoeffizienten lässt sich bestimmen:

- ob eine Beziehung zwischen den untersuchten Variablen besteht;
- wie eng diese Beziehung ist;
- welche Richtung diese Beziehung hat.

Korrelationskoeffizienten können nur Werte zwischen + 1 und - 1 annehmen (s. Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Korrelationskoeffizient sowie seine Bedeutung in Anlehnung an (Schatz, 2008)

Beziehung	Korrelationskoeffizient	Korrelation
Negative	-1,0	Perfekte
	-1,0 ~ -0,6	Starke
	-0,6 ~ -0,4	Mittlere
	-0,4 ~ 0	Schwache
-	0	Keine
Positive	0 ~ 0,4	Schwache
	0,4 ~ 0,6	Mittlere
	0,6 ~ 1,0	Starke
	1,0	Perfekte

Ein Korrelationskoeffizient von  $\pm 1$  sagt aus, dass die Übereinstimmung zwischen den beiden Variablen vollständig ist. Werte zwischen + 1 und 0 geben die verschiedenen Grade eines positiven Zusammenhanges an. Ein Korrelationskoeffizient von 0 bedeutet, dass kein Zusammenhang besteht. Korrelationskoeffizienten zwischen 0 und - 1 geben die verschiedenen Grade eines negativen Zusammenhanges an. Der Korrelationskoeffizient ist abhängig von der Anzahl der korrelierten Proben. Bei einem Korrelationsfaktor von  $\pm 0,4$  ist schon eine deutliche Beziehung gegeben,  $> 0,6$  (oder  $< -0,6$ ) zeigt eine sehr gute Korrelierbarkeit an (Schatz, 2008).

#### 4.2.3 Statistischer Test

Da der Korrelationskoeffizient nicht ohne Vorsicht bewertet werden sollte, besteht die Möglichkeit einen Test auf Signifikanz durchzuführen. Die Signifikanz gibt die Wahrscheinlichkeit der Unterschiede zwischen Messgrößen oder Variablen in der Statistik an, dass die zuvor errechnete Korrelation durch Zufall zustande gekommen ist. Ein signifikantes Ergebnis ist also wesentlich aussagekräftiger als ein Ergebnis mit geringer Signifikanz.

Die maximal zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit wird auch als Signifikanzniveau  $\alpha$  bezeichnet. Das Signifikanzniveau beschreibt den Informationsgehalt eines Ereignisses bzw. einer Messung. Je kleiner das Signifikanzniveau ist, desto höher ist die Informationsqualität. Anschließend werden zwei Signifikanzniveaus vorgesehen:  $\alpha = 0,05$  und  $\alpha = 0,01$ . Beispielsweise bedeutet  $\alpha = 0,05$ , dass die maximal zulässige Wahrscheinlichkeit für irrtümliches Ablehnen einer eigentlich richtigen Nullhypothese 5 % beträgt. Umgekehrt beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass eine richtige Nullhypothese vom Test korrekt bestätigt wird, mindestens 95%. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse (d. h. die Korrelationskoeffizienten) werden erst für Aussagen herangezogen, wenn die mit Hilfe verschiedener Tests (t-Test, Chi<sup>2</sup>-Test usw.) errechnete Signifikanz in der Korrelationsanalyse das vorgesehene Signifikanzniveau ( $\alpha = 0,05$  und  $\alpha = 0,01$ ) nicht überschreitet.

## 5 Mathematische Verfahren für die Berührungslose Griffigkeitsmessung

Für die Berechnung der Straßengriffigkeit aus der Fahrbahntextur wurden drei unterschiedliche Ansätze verfolgt:

- Berechnung über eigens entwickelte Texturparameter,
- über ein Gummireibungsmodell sowie
- über die Spektrale Leistungsdichte der Fahrbahnoberfläche.

Diese Ansätze werden im Folgenden vorgestellt. Abschließend wird versucht, die drei Ansätze aus Kapitel 5.1 bis 5.3 bzw. einzelne, aussagekräftige Parameter mit Hilfe von Künstlichen Neuronalen Netzwerken (KNN) weiter zu optimieren. Die theoretischen Grundlagen der KNN werden in Kapitel 5.4 erläutert.

### 5.1 Texturparametermodell (Ansatz 1)

Dieses empirische Reibungsmodell basiert auf einer geometrischen Charakterisierung der Oberfläche. Die von Schulze (1970) eingeführte Rauheitsbeschreibung wird aufgegriffen und im Bereich der Makro- und Mikrotextrur erweitert. Nach Schulze (1970) wird die Makrotextrur durch das Drainagevermögen und die Mikrotextrur durch die Flächen- und Kantenschärfe gekennzeichnet. In dem hier entwickelten Ansatz wird die Makrotextrur zusätzlich zum Drainagevermögen durch die Drainagewirkung und die Mikrotextrur neben der Kantenschärfe durch die Kenngrößen Flächenschärfe 1. und 2. Ordnung charakterisiert.

Das Drainagevermögen kennzeichnet das Abführen des Wassers aus der Latschfläche. Die Drainagewirkung ist eine Funktion des Drainagevermögens und spiegelt dessen Einfluss auf den Reibwert bei hohen Geschwindigkeiten wider. Der Kantenschärfe wird der Einfluss der Form der Kanten und Spitzen auf den Reibwert zugeordnet. Die Flächenschärfe 1. und 2. Ordnung beschreibt die Mikrorauheit auf einem Gesteinskorn. Hier steht das Zusammenwirken kleiner, flächenhaft angeordneter Rauheitselemente im Vordergrund (Schulze, 2011).

Die beschriebenen Rauheitskenngrößen sind qualitativer Natur. Zur Quantifizierung der Kenngrößen werden Texturdeskriptoren eingeführt (s. Bild 5-1). Die Texturdeskriptoren sind mit mathematischen Algorithmen hinterlegt, die auf Basis von gemessenen Texturprofilen die Rauheitskenngrößen in Zahlenwerte überführen (Schulze, 2011).

Die Berechnung der einzelnen Texturdeskriptoren setzt eine funktionale Teilung des Texturprofils voraus. Aufgrund des nicht vollflächigen Kontaktes von Reifen und Fahrbahn ist zwischen einem Drainage- und einem Kontaktbereich zu unterscheiden. Die effektive Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn sowie die Eindringtiefe des Reifens in die Textur beträgt nur einen geringen Bruchteil der nominalen Latschfläche bzw. der maximalen Texturprofiltiefe. Die Eindringtiefe des Reifens trennt Drainage- und Kontaktbereich: Der Kontaktbereich erstreckt sich von der höchsten Erhebung des Texturprofils bis zur Unterkante des in die Textur eingedrungenen Reifens, während der Bereich unterhalb der Eindringtiefe dem Drainagebereich zuzuordnen ist. Im Kontaktbereich werden die Reibungskräfte aktiviert, während der Drainagebereich primär für die Abführung des Wassers aus der Latschfläche verantwortlich ist.

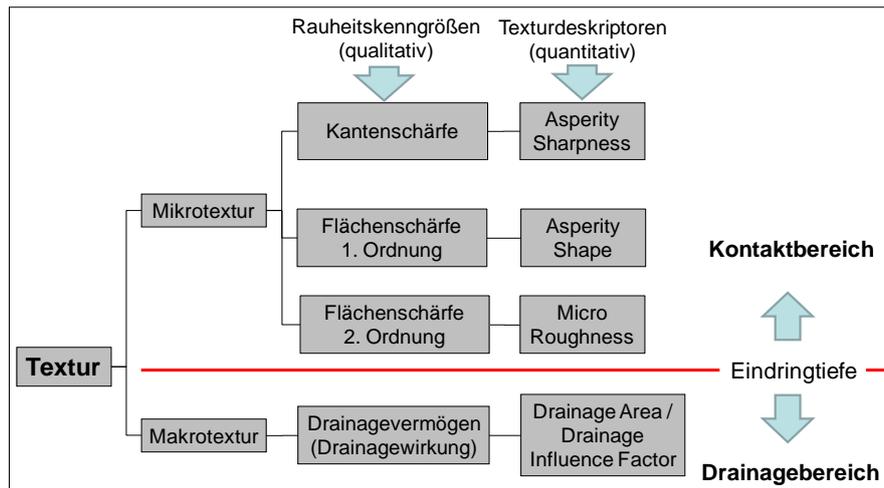


Bild 5-1: Charakterisierung der Textur mittels Rauheitskenngrößen und Texturdeskriptoren

Die Straßenoberfläche weist infolge der polierenden Wirkung der Reifen eine unterschiedliche Ausprägung der Mikrotextur über die Profilhöhe auf. Im Kontaktbereich wird die Mikrotextur infolge des Kontaktes zwischen Gummi und Fahrbahnoberfläche abgebaut, während im darunterliegenden Drainagebereich nahezu keine Änderung der Mikrotextur eintritt (s. Bild 5-2). Für eine griffigkeitsrelevante Charakterisierung der Oberfläche ist eine funktionale Teilung der Textur in den Kontakt- und Drainagebereich erforderlich. Dabei ist die Berechnung der Mikrotexturkennwerte auf den Kontaktbereich und die der Makrotextur auf den Drainagebereich zu beziehen (Schulze, 2011).

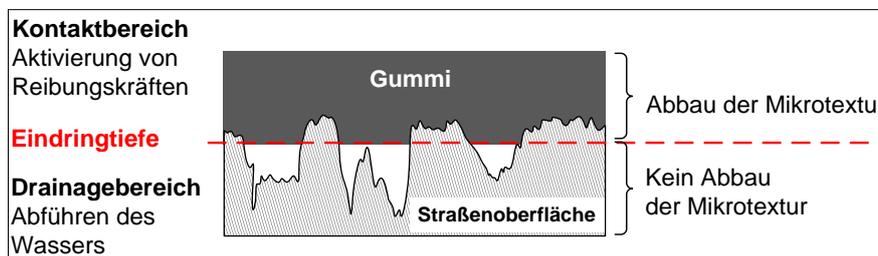


Bild 5-2: Funktionale Teilung des Texturprofils in Kontakt- und Drainagebereich, unterschiedliche Ausprägung der Mikrotextur über die Profilhöhe

### 5.1.1 Modellfunktion

Die einzelnen Texturdeskriptoren, die für die jeweils relevanten Bereiche zu ermitteln sind, gilt es durch eine geeignete Modellfunktion mathematisch miteinander zu verknüpfen. Die Aufstellung einer Modellfunktion sollte innerhalb einer multiplen Regressionsanalyse stets vor einem sachlogischen Hintergrund erfolgen. Es gilt den Einfluss und die Wirkungsbeziehung der einzelnen Texturdeskriptoren und die damit charakterisierten Rauheitselemente untereinander und auf den Reibwert bezogen abzuschätzen und die Modellfunktion entsprechend aufzustellen. Hier fließen die von Schulze (1970) qualitativ beschriebenen Zusammenhänge zwischen den Rauheitskenngrößen Drainagevermögen, Kantenschärfe, Flächenschärfe und dem Reibwert ein.

Es wird postuliert, dass der Reibwert eine Funktion des Drainagevermögens respektive der Drainagewirkung, der Kantenschärfe und der Flächenschärfe 1. und 2. Ordnung ist:

$$\mu_{\text{Textur}} = f(\text{Drainagewirkung}, \text{Kantenschärfe}, \text{Flächenschärfe 1. und 2. Ordnung}) \quad (\text{Gl. 5-1})$$

Das Drainagevermögen, das den Abfall des Reibwertes mit zunehmender Geschwindigkeit kennzeichnet, ist zur Formulierung der Modellfunktion in eine Drainagewirkung zu überführen. Die Drainagewirkung, die Werte zwischen Null und Eins annimmt, beschreibt den Einfluss des Drainagevermögens auf den Reibwert und wird auf Basis einer Ausgleichsfunktion, auf die im Weiteren noch eingegangen wird, aus dem Drainagevermögen berechnet. In der Modellfunktion wird die Drainagewirkung mit dem Grad der Schärfe, der den maximalen Reibwert bei ausreichendem Drainagevermögen bestimmt, multipliziert (Schulze, 2011).

Der Grad der Schärfe setzt sich aus der Kanten- und Flächenschärfe zusammen. Unter der Annahme, dass sich eine hohe Kanten- sowie eine hohe Flächenschärfe positiv auf den Reibwert, d.h. reibwerterhöhend, auswirken, werden diese additiv miteinander verbunden. Die Modellfunktion wird damit zu

$$\mu_{\text{Textur}} = f(\text{Drainagewirkung} \cdot (\text{Kantenschärfe} + \text{Flächenschärfe 1. und 2. Ordnung})) \quad (\text{Gl. 5-2})$$

formuliert. Zur Anwendung der multiplen Regressionsanalyse sind die abgeleiteten Texturparameter in die Modellfunktion einzusetzen. Die Gleichung nimmt dann folgende Form an:

$$\mu_{\text{Textur}} = (\text{DIF} \cdot \text{ASharpness} + C_2 \cdot \text{AShape} + C_3 \cdot \text{MRoughness} + C_4) \quad (\text{Gl. 5-3})$$

mit:

C1, C2, C3, C4 :	Regressionskoeffizienten
DIF:	Drainage Influence Factor
ASharpness;	Asperity Sharpness
AShape:	Asperity Shape
MRoughness:	Micro Roughness

Innerhalb der Regressionsanalyse werden die Regressionskoeffizienten bestimmt (s. Kapitel 5.1.6).

### 5.1.2 Bestimmung der Eindringtiefe

Die Eindringtiefe des Reifens in die Textur ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. So ist die empirische Bestimmung der Eindringtiefe eines rollenden Reifens („dynamischer“ Fall) aufgrund der hohen Komplexität bis heute nicht zufriedenstellend möglich. Die Messung der „statischen“ Eindringtiefe (stehendes Rad) kann unter Laborbedingungen relativ einfach und mit hoher Präzision durchgeführt werden, wodurch sich theoretische Berechnungen der Eindringtiefe anhand der empirisch ermittelten Werte validieren lassen.

Innerhalb des hier vorgestellten Modells wird ein vergleichsweise einfacher Algorithmus auf Basis der Materialanteilkurve zur Abschätzung der Eindringtiefe entwickelt. Zur Ableitung des Algorithmus wird zunächst die Eindringtiefe auf verschiedenen Oberflächen experimentell bestimmt, indem ein Messgummi unter kontinuierlicher Messung des Weges mit einer definierten Kraft auf die Oberfläche gepresst wird. Kraft und Weg des in die Oberfläche des Probekörpers

eindringenden Messgummis werden aufgezeichnet. Des Weiteren wird die Oberfläche der Probestkörper durch hochauflösende, dreidimensionale Texturmessungen exakt erfasst, so dass Datensätze bestehend aus aufgebrachter Kraft, resultierender Eindringtiefe und zugehöriger Textur erzeugt werden.

Aus den Texturdaten wird die jeweilige Materialanteilkurve ermittelt. Die empirisch bestimmte Eindringtiefe geht als Eingangsgröße in die Materialanteilkurve ein, ausgegeben wird der zugehörige Materialanteil  $MA_{\text{Eindringtiefe}}$  (s. Bild 5-3).

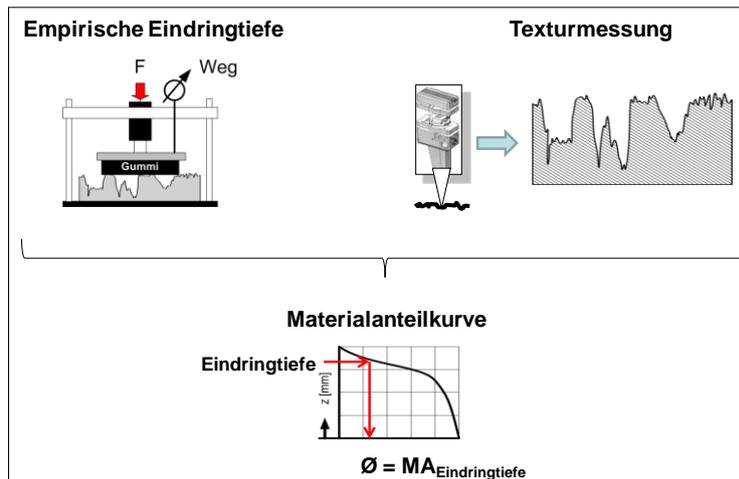


Bild 5-3: Empirische Bestimmung der Eindringtiefe und des zugehörigen Materialanteils

Für die auf den verschiedenen Oberflächen ermittelte Eindringtiefe wurde stets ein Materialanteil  $MA_{\text{Eindringtiefe}}$  in vergleichbarer Größenordnung ermittelt. Die Materialanteile  $MA_{\text{Eindringtiefe}}$  weisen eine Spannweite von 10% auf (s. Bild 5-4). Der Mittelwert  $\overline{MA_{\text{Eindringtiefe}}}$  beträgt 33%.

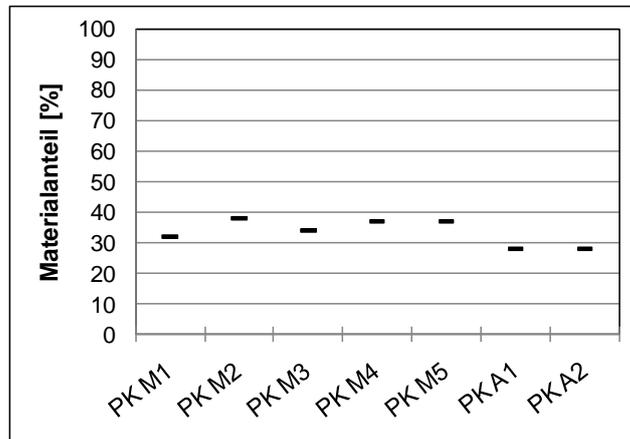


Bild 5-4: In Abhängigkeit der gemessenen Eindringtiefe ermittelter Materialanteil

Zur Abschätzung der Eindringtiefe aus dem Texturprofil wird der Umkehrschluss verwendet, d.h. die Eindringtiefe wird mittels eines für alle Oberflächen fest vorgegebenen Materialanteils  $\overline{MA_{\text{Eindringtiefe}}}$  über die Materialanteilkurve ermittelt (s. Bild 5-5).

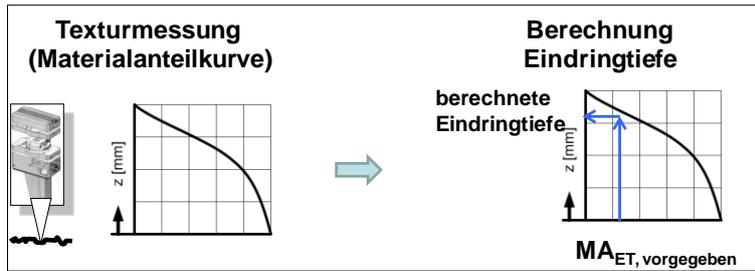


Bild 5-5: Ermittlung der Eindringtiefe aus der Textur mittels eines vorgegebenen Materialanteils

Die Abweichungen zwischen der experimentell ermittelten und der berechneten Eindringtiefe beträgt im Mittel 0,03 mm, maximal 0,06 mm (s. Bild 5-6). Aufgrund der verhältnismäßig geringen Abweichungen zwischen berechneter und gemessener Eindringtiefe wird die Materialanteilkurve zur Abschätzung der Eindringtiefe eingesetzt (Schulze, 2011).

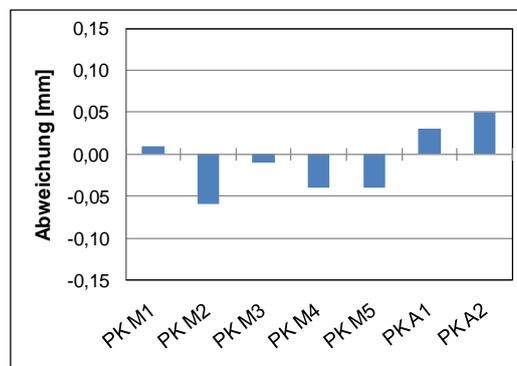


Bild 5-6: Abweichungen zwischen der gemessenen und aus der Textur berechneten Eindringtiefe

### 5.1.3 Charakterisierung der Makrotextur

Das Drainagevermögen wird von der Makrotextur und der damit verbundenen Eindringtiefe des Gummis bestimmt, wobei der freie Bereich zwischen dem in die Oberfläche eingedrungenen Gummi und der Straßenoberfläche, der zur Drainage des Wassers aus dem Latschbereich zur Verfügung steht, relevant ist. Dieser freie Bereich wird in einem zweidimensionalen Texturprofil als Querschnitt der wasserabführenden Kanäle sichtbar. Zur Quantifizierung des Drainagevermögens einer Oberfläche werden die Querschnittflächen der wasserabführenden Kanäle integriert und in dem Deskriptor Drainage Area wiedergegeben (s. Bild 5-7). Das Drainagevermögen (Drainage Area) ist anschließend in die Drainagewirkung (Drainage Influence Factor) zu überführen.

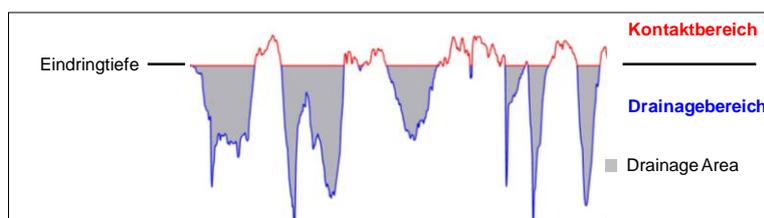


Bild 5-7: Kennzeichnung der zur Drainage zur Verfügung stehenden Querschnittfläche

$$DA = -\frac{1}{L_P} \int_{L_P} (y_D(x)) dx \quad (\text{Gl. 5-4})$$

mit:

DA: Drainage Area

LP: Länge des Profils

$y_D$ : Profil des Drainagebereiches

In einer speziellen Versuchsreihe wurde die Wirkung des Drainagevermögens auf den Reibwert untersucht. Dazu wurden Probekörper hergestellt, die eine Veränderung des Drainagevermögens unter nahezu vollständiger Beibehaltung der Kanten- und Flächenschärfe zulassen. Ausgehend von einem sehr geringen Drainagevermögen, das eine Aktivierung von Reibungskräften bei hohen Geschwindigkeiten, aufgrund des Aufschwimmens des Messgummis (vergleichbar mit Aquaplaning), nahezu ausschließt, wurde das Drainagevermögen sukzessive bis zu einem sehr ausgeprägten, höchst wirksamen Drainagesystem erhöht. Gleichzeitig wurde mit der Veränderung des Drainagevermögens der Reibwert in einem Geschwindigkeitsbereich von 100 bis 0 km/h aufgenommen.

Innerhalb der im Wehner/Schulze-Prüfstand durchgeführten Versuchsreihe ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmendem Drainagevermögen ein höherer Reibwert aktiviert wird, wobei ab einem gewissen Drainagevermögen ein asymptotischer Verlauf in Form eines nicht mehr steigenden Reibwertes zu beobachten ist. Mit zunehmendem Drainagevermögen wird das Wasser zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche schneller verdrängt, was mit einer Zunahme der Kontaktfläche von Reifen und Fahrbahn einhergeht. Die höheren Reibwerte können durch eine weitere Anregung des Gummis infolge der zunehmenden Kontaktfläche erklärt werden. Sobald das Wasser im ausreichenden Maße aus der Kontaktfläche verdrängt wird, stellt sich ein asymptotischer Verlauf ein, der durch keine weitere Erhöhung des Reibwertes bei weiterer Steigerung des Drainagevermögens gekennzeichnet ist (s. Bild 5-8).

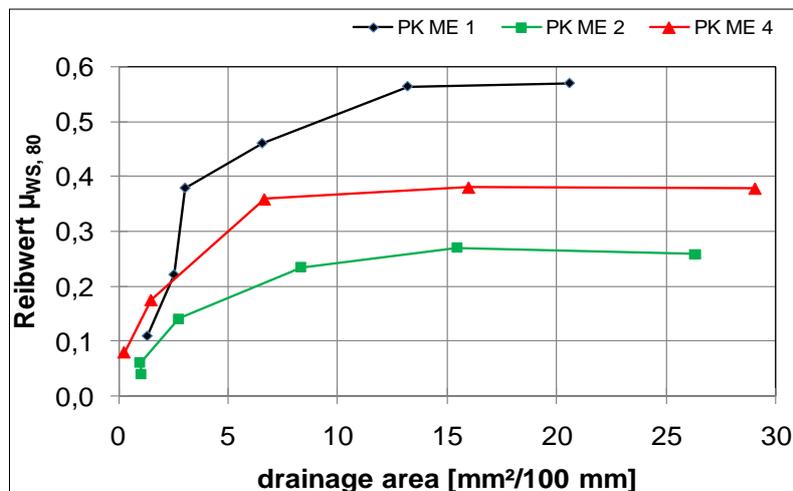


Bild 5-8: Reibwert in Abhängigkeit des Drainagevermögens bei gleicher Mikrotextur

Die Normierung der auf unterschiedlichen Oberflächen gewonnenen Drainagevermögen-Reibwert-Kurven auf den jeweiligen maximalen Reibwert ermöglicht eine Überführung des

Drainagevermögens in eine Drainagewirkung. Die normierten Kurven liegen innerhalb eines engen Korridors, die mittels einer nichtlinearen Regressionsfunktion abgebildet wird. Die ermittelte Regressionsfunktion hat die Form

$$DIF(DA) = 0,9934 \cdot e^{9,927 \cdot 10^{-5} \cdot DA} - 0,8759 \cdot e^{-0,2905 \cdot DA} \quad (\text{Gl. 5-5})$$

mit:

DIF: Drainage Influence Factor

DA: Drainage Area in [mm<sup>2</sup>/100mm]

und weist gegenüber der empirischen Datengrundlage ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,93$  auf. Diese Funktion beschreibt unter Berücksichtigung der Versuchsrandbedingungen die Wirkung der Drainage und nimmt Werte zwischen Null und Eins an (Drainage Influence Factor, s. Bild 5-9) (Schulze, 2011).

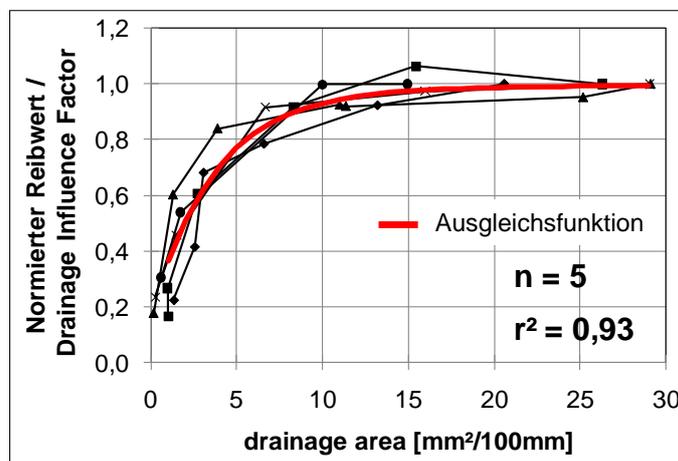


Bild 5-9: Normierter Reibwert in Abhängigkeit des Drainagevermögens

#### 5.1.4 Charakterisierung der Mikrotextrur

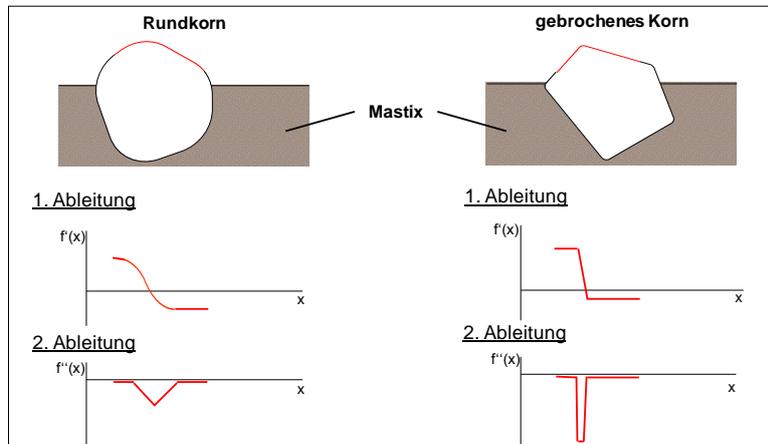
Die Feinrauheit (Mikrotextrur) der Straße wird durch die Kenngrößen Kantenschärfe und Flächenschärfe 1. und 2. Ordnung beschrieben. Hierzu sind hochauflösende Texturmessungen erforderlich, die bis in den Bereich von wenigen Mikrometern reichen. Die Beschreibung der Mikrotextrur und damit der Kanten- und Flächenschärfe ist auf den Kontaktbereich beschränkt.

##### Kantenschärfe

Die Ausprägung der Kanten bzw. der Kuppen der einzelnen Asperitäten beeinflusst den Kontaktdruck an den lokalen Kontaktstellen. Die Kontaktdruckverteilung steht mit der Deformationsamplitude und der Deformationsgeschwindigkeit des Gummis in Verbindung. Spitze Asperitäten sowie scharfe Kanten führen zu hohen lokalen Kontaktspannungen, die ein vergleichsweise schnelles und tiefes Eindringen einer Asperität in den Gummi ermöglichen. Die sich einstellende Deformationsamplitude und -geschwindigkeit bestimmt die Anregung des Gummis und damit die Energiedissipation infolge der Deformation.

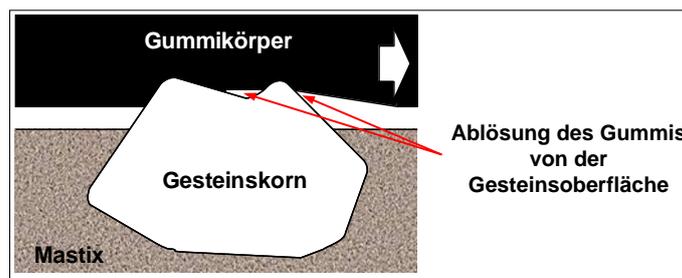
Die Kantenschärfe einer Oberfläche wird in dem hier vorgestellten Modell durch die Änderung der Steigung beschrieben. Dazu ist die zweite Ableitung des Höhenprofils zu berechnen. Die

erste Ableitung beschreibt die Steigung eines Profils, während die zweite Ableitung die Änderung der Steigung wiedergibt. Scharfe Kanten sind durch eine abrupte Änderung der Steigung gekennzeichnet, die im Vergleich zu einer abgerundeten Kante hohe Funktionswerte in der zweiten Ableitung bedingt (s. Bild 5-10).



*Bild 5-10: Differenzierung zwischen einem Rundkorn und einem Brechkorn auf Basis der Höhe der Funktionswerte der zweiten Ableitung (schematische Darstellung)*

Weiterhin ist die Kontaktdruckverteilung über die Höhe des Kontaktbereiches von Bedeutung. Der Kontaktdruck zwischen Gummi und Oberfläche nimmt über die Höhe (von oben nach unten) ab. Es ist leicht nachzuvollziehen, dass auf den Kuppen zweier Asperitäten ein höherer Kontaktdruck als in der Vertiefung zwischen diesen herrscht. Die Vertiefung zwischen zwei Asperitäten wird ggf. nicht vollständig ausgefüllt und es kommt zu Ablösungen des Gummis von der Oberfläche (s. Bild 5-11). Das lässt den Schluss zu, dass die Schärfe der hervorstehenden Kanten und der Kuppen einen größeren Einfluss auf den Reibwert hat, als die Schärfe einer Kerbe zwischen zwei Asperitäten.



*Bild 5-11: Kontaktbedingungen: Kontakt auf den Kuppen, Ablösungen im Bereich der Kerben*

Mathematisch kann anhand des Vorzeichens des Funktionswertes der zweiten Ableitung zwischen Kerben und Kuppen unterschieden werden. Die Kuppen der Asperitäten oder hervorstehende Kanten weisen in der zweiten Ableitung aufgrund ihres Steigungswechsels (von positiv zu negativ) negative Funktionswerte auf.

Zur Berechnung des Texturparameters Asperity Sharpness ist das Höhenprofil zweimal zu differenzieren. Der Texturdeskriptor Asperity Sharpness wird als Summe der negativen Funktionswerte der zweiten Ableitung definiert (Schulze, 2011):

$$ASharp = \frac{1}{2 \cdot n} \left[ \sum_{L_p} (|y_k''(x)|) - \sum_{L_p} (y_k''(x)) \right] \quad (\text{Gl. 5-6})$$

mit:

ASharp: Asperity Sharpness

n: Anzahl der Asperitäten

$L_p$ : Länge des Profils

$y_k$ : Profil des Kontaktbereiches

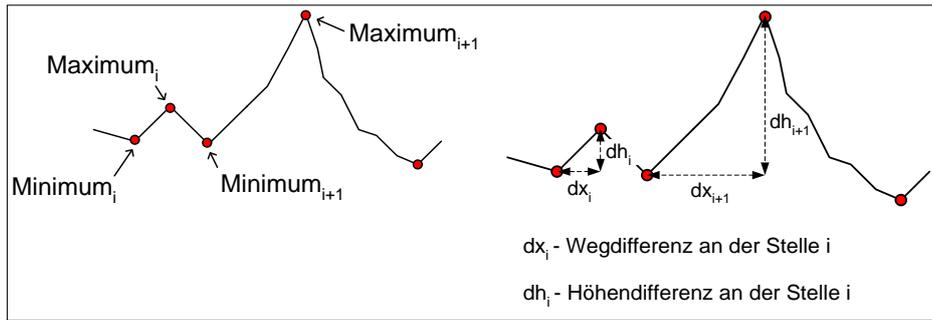
### 5.1.5 Flächenschärfe

Die Anregung des Gummis wird maßgebend durch die flächenhaft angeordneten Rauheitselemente bestimmt. Die lokalen Weg- und Höhendifferenzen zwischen den lokalen Extremstellen bestimmen seitens der Textur die Anregungsfrequenz und -amplitude des Gummis. Die tatsächliche Anregungsfrequenz und Deformationsamplitude ist jedoch von den vorherrschenden Kontaktverhältnissen abhängig. Nur bei vollständigem Kontakt, d.h., wenn sämtliche Kavitäten der Oberfläche oberhalb des Drainagebereiches vom Gummi ausgefüllt werden, sind Weg- und Höhendifferenzen vollständig wirksam. Die Kontaktverhältnisse werden u.a. durch die Textur der Oberfläche, die Dicke des Wasserfilms, die Gleitgeschwindigkeit des Gummis und seine viskoelastischen Eigenschaften bestimmt. Mit zunehmender Rauheit im Mikrotexturbereich werden die Rauheitselemente, die in tiefen Tälern zwischen zwei herausstechenden Spitzen liegen, nicht mehr vom Gummi erreicht, so dass die „wirksame“ Flächenschärfe abnimmt.

Zur Charakterisierung der Rauheitskenngröße Flächenschärfe werden zwei Texturdeskriptoren definiert. Der Texturdeskriptor Asperity Shape bildet die Form der einzelnen Asperitäten und damit die lokalen Rauheitselemente der Flächenschärfe ab (Flächenschärfe 1. Ordnung). Der Texturdeskriptor Micro Roughness beschreibt die übergeordnete Rauheit im Mikrotexturbereich (Flächenschärfe 2. Ordnung), die Lage der einzelnen Asperitäten im Profil, und trägt den rauheitsbedingten Kontaktverhältnissen Rechnung.

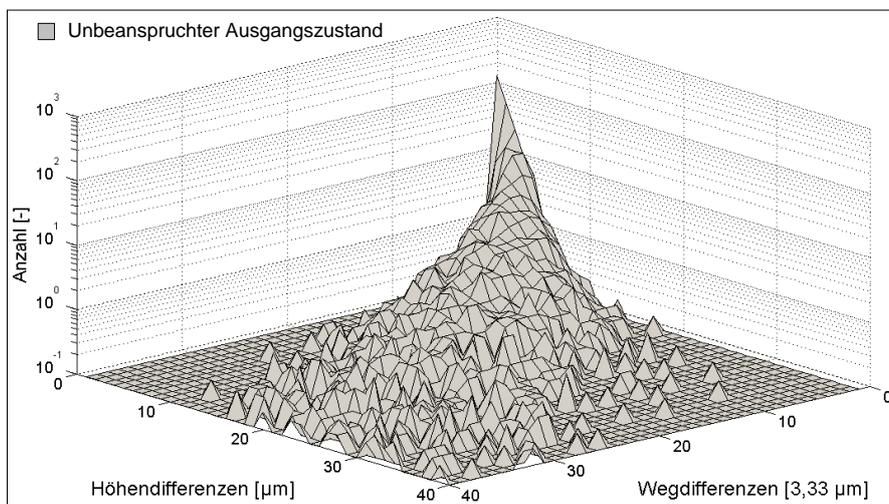
#### Flächenschärfe 1. Ordnung

Zur Berechnung der Flächenschärfe 1. Ordnung sind die lokalen Extremstellen zu identifizieren. Die Weg- und Höhendifferenzen zwischen den lokalen Maxima und Minima werden berechnet und in eine Häufigkeitsverteilung überführt (s. Bild 5-12). Die Häufigkeitsverteilung zeigt, wie oft Höhendifferenzen bei bestimmten Wegdifferenzen innerhalb der betrachteten Länge auftreten. Glatte Oberflächen beispielsweise weisen eine große Anzahl kleiner Höhendifferenzen zwischen den lokalen Minima und Maxima auf, während raue Oberflächen durch eine hohe Anzahl großer Höhenunterschiede gekennzeichnet sind.



**Bild 5-12:** Charakterisierung einzelner Rauheitselemente (Asperitäten) mittels Weg- und Höhendifferenzen

Die zunächst getrennt betrachteten Häufigkeitsverteilungen der Weg- und Höhendifferenzen sind anschließend in einer zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung zusammenzuführen. Die zweidimensionale Häufigkeitsverteilung bietet den Vorteil, jede Asperität in Abhängigkeit ihrer Weg- und Höhendifferenz abzubilden. So können beispielsweise die Fragen, welche Asperitätenhöhen primär auftreten und welcher Zusammenhang zwischen der Weg- und Höhendifferenz der einzelnen Asperitäten besteht, gleichzeitig beantwortet werden (s. Bild 5-13). Die Form einer Asperität (genauer die Ausprägung der der Bewegungsrichtung zugewandten Flanke) wird detailliert erfasst. Darüber hinaus wird eine detaillierte Analyse der Veränderung der Textur, z. B. infolge einer Polierbeanspruchung, ermöglicht. Hierzu sind die zweidimensionalen Häufigkeitsverteilungen verschiedener Beanspruchungsstufen zu überlagern<sup>3</sup>.

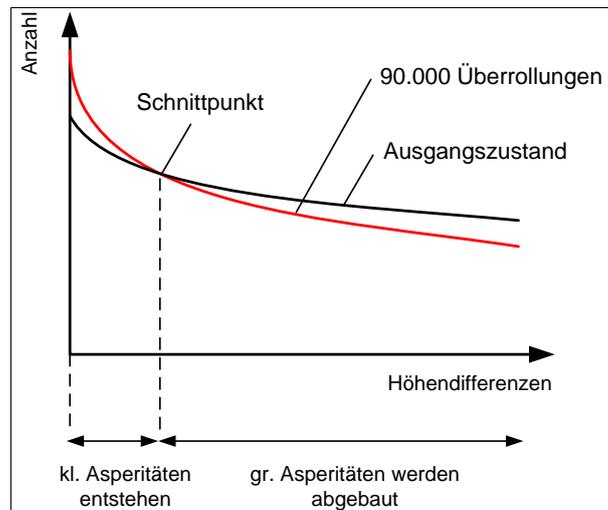


**Bild 5-13:** Beispiel einer zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung der Weg- und Höhendifferenzen

Anhand der Analyse der Häufigkeitsverteilungen können Rauheitselemente mit bestimmten Weg- und Höhendifferenzen identifiziert werden, die infolge der Polierbeanspruchung entstehen bzw. abgebaut werden. Die Abgrenzung der entstehenden Asperitäten von denen, die abgebaut werden, erfolgt auf Basis der Häufigkeitsverteilung der Weg- bzw. Höhendifferenzen. Die Häufigkeitsverteilungen der Weg- bzw. Höhendifferenzen unterschiedlicher Beanspruchungsstufen, z.B. des unbeanspruchten Ausgangszustandes und nach einer Polierbeanspruchung von

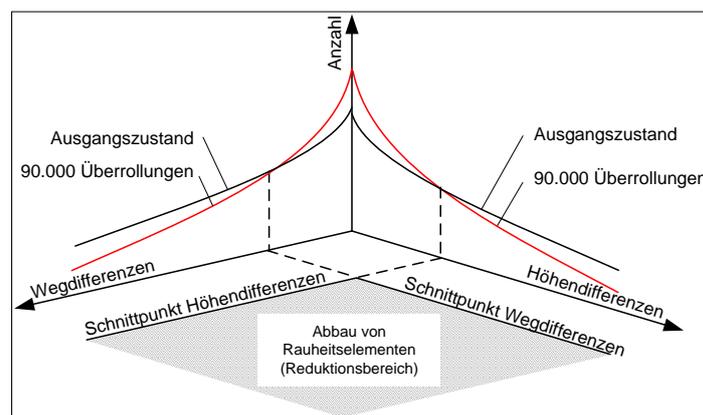
<sup>3</sup> Andere, die Textur beeinflussende Beanspruchungen, z.B. Witterungseinflüsse, können analog analysiert werden.

90.000 Überrollungen, weisen einen Schnittpunkt auf, der zur Bestimmung der Grenze zwischen entstandenen und abgebauten Asperitäten herangezogen wird (s. Bild 5-14).



*Bild 5-14: Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen, Kennzeichnung der Bereiche in denen Rauheitselemente entstehen bzw. abgebaut werden (qualitativ)*

Diese Grenzen lassen sich auf eine zweidimensionale Häufigkeitsverteilung übertragen. Diese bietet den Vorteil, jede Asperität in Abhängigkeit ihrer Weg- und Höhendifferenz abzubilden, zu übertragen und die Asperitäten, die infolge einer Polierbeanspruchung entstehen oder abgebaut werden, näher zu bestimmen. In der folgenden Abbildung sind die Häufigkeitsverteilungen der Weg- bzw. Höhendifferenzen, die Schnittpunkte der Verteilungen und die Übertragung der Schnittpunkte auf die zweidimensionale Häufigkeitsverteilung schematisch dargestellt. Der schraffierte Bereich kennzeichnet die Asperitäten, die infolge einer Polierbeanspruchung abgebaut werden (Reduktionsbereich, s. Bild 5-15).



*Bild 5-15: Schematische Darstellung der Übertragung der Schnittpunkte der Häufigkeitsverteilungen der Weg- und Höhendifferenzen auf die zweidimensionale Häufigkeitsverteilung der Flächenschärfe 1. Ordnung*

Die Grenzen des Reduktionsbereiches wurden in empirischen Untersuchungen an Mosaik-Probekörpern ermittelt. Die Grenze der Wegdifferenzen liegt im Mittel bei 40  $\mu\text{m}$ , die der Höhendifferenzen bei 12  $\mu\text{m}$ . Die Überlagerung der zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung beispielsweise des Ausgangszustandes und nach einer Polierbeanspruchung von 90.000 Überrollungen im Wehner/Schulze-Prüfstand bestätigen die ermittelten Grenzen (s. Bild 5-16).

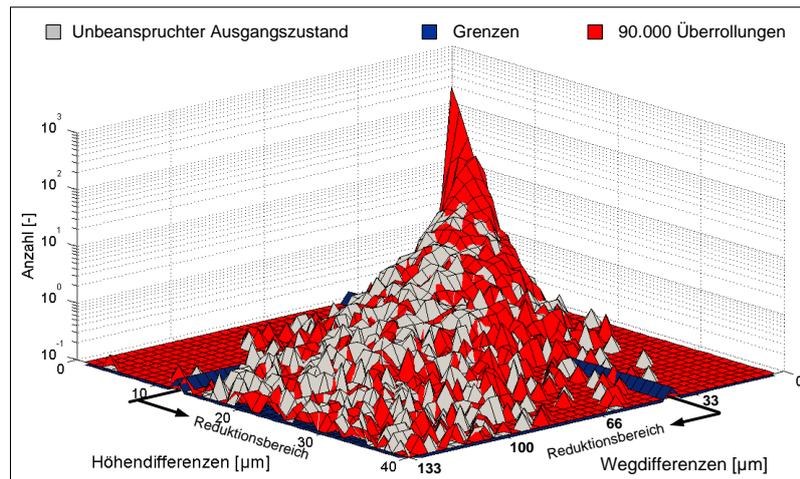


Bild 5-16: Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung des unbeanspruchten Ausgangszustandes überlagert mit einer Polierbeanspruchung von 90.000 Überrollungen

Der Texturdeskriptor Asperity Shape wird als Summe aller Rauheitselemente innerhalb des Reduktionsbereichs (Bild 5-15, schraffierter Bereich) definiert. Der Deskriptor ist auf eine Profillänge von 100 mm bezogen und berechnet sich nach folgender Gleichung (Schulze, 2011):

$$AShape = \sum_{i=a}^{i=b} \left( \sum_{j=c}^{j=d} x_{ij} \right) \quad (\text{Gl. 5-7})$$

mit:

AShape: Asperity Shape

$x_{ij}$ : Werte der Matrix der zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung der Flächenschärfe 1. Ordnung

a: Grenze (Schnittpunkt) Wegdifferenzen

b: Anzahl der Zeilen

c: Grenze (Schnittpunkt) Höhendifferenzen

d: Anzahl der Spalten

i: Wegdifferenzen der Flächenschärfe 1. Ordnung

j: Höhendifferenzen der Flächenschärfe 1. Ordnung

## Flächenschärfe 2. Ordnung

Neben der lokalen Betrachtung der einzelnen Asperitäten ist zusätzlich eine Beschreibung der übergeordneten Rauheit im Mikrotextrbereich (Flächenschärfe 2. Ordnung) erforderlich. Der zuvor definierte Deskriptor Asperity Shape gibt über die Form der einzelnen Asperitäten Aufschluss, enthält aber keine Informationen über deren Anordnung im Profil. Der Bezug zu den benachbarten Asperitäten wird nicht erfasst. Eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Texturprofilen, die eine identische Charakteristik bzgl. der lokalen Weg- und Höhendifferenzen

(Flächenschärfe 1. Ordnung) aufweisen, ist anhand des Deskriptors Asperity Shape nicht möglich (s. Bild 5-17).

Zur Erfassung der Flächenschärfe 2. Ordnung und damit zur Differenzierung zwischen Profilen lokal gleicher, aber „global“ unterschiedlicher Struktur im Mikrotextrbereich wird der Deskriptor Micro Roughness eingeführt. Dieser Deskriptor basiert auf der Definition einer Hüllkurve, die die lokalen Maxima des Texturprofils miteinander verbindet. Die Hüllkurve spiegelt die globale Rauheit im Bereich der Mikrotextr wider (s. Bild 5-17). Beispielsweise verläuft die Hüllkurve einer Oberfläche mit geringer Flächenschärfe 2. Ordnung glatt und eben.

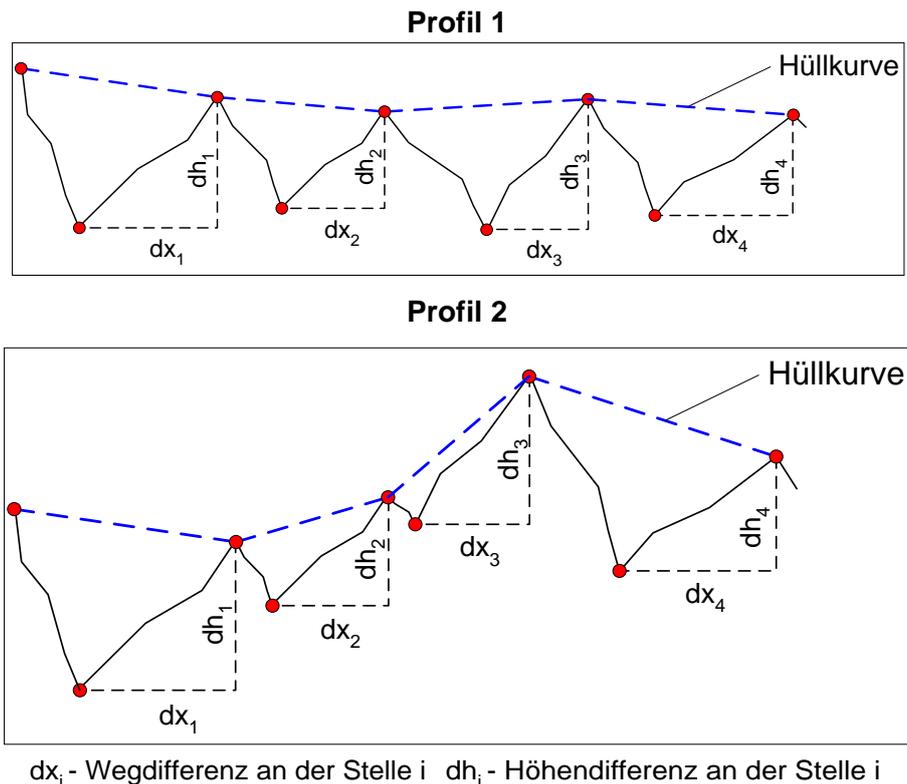


Bild 5-17: Definition der Hüllkurve für Profile unterschiedlicher globaler Rauheit (Flächenschärfe 2. Ordnung)

Die Analyse der Hüllkurve erfolgt weitestgehend analog zum Texturdeskriptor Asperity Shape. Es werden die lokalen Extremstellen (Minima und Maxima) der Hüllkurve bestimmt und die zugehörigen Weg- und Höhendifferenzen berechnet (s. Bild 5-18).

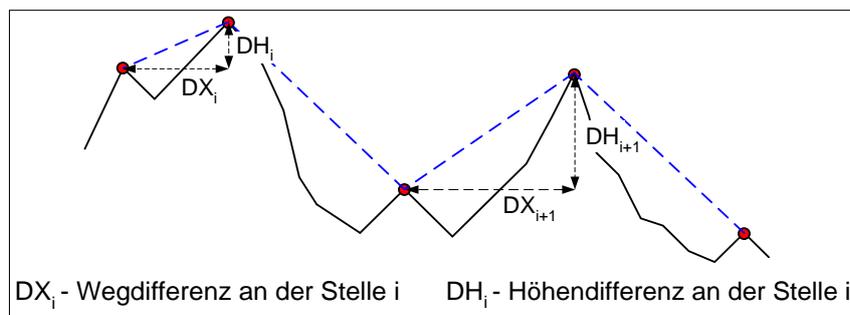


Bild 5-18: Charakterisierung der Hüllkurve anhand von Weg- und Höhendifferenzen

Die ermittelten Weg- und Höhendifferenzen werden zunächst in getrennten Häufigkeitsverteilungen ausgewertet und anschließend in eine zweidimensionale Häufigkeitsverteilung überführt (s. Bild 5-19). Die einfachen Häufigkeitsverteilungen der Weg- und Höhendifferenzen werden mit dem Ziel einer Abgrenzung der infolge der Polierbeanspruchung entstandenen bzw. abgebauten Elemente analysiert (Schnittpunkt der Verteilungen unterschiedlicher Polierstufen, analog zu Texturdeskriptor Asperity Shape).

Die identifizierten Schnittpunkte werden anschließend auf die zweidimensionale Häufigkeitsverteilung übertragen und der Reduktionsbereich bestimmt. Die empirisch ermittelten Schnittpunkte liegen bei 300 µm (Wegdifferenz) und 25 µm (Höhendifferenz).

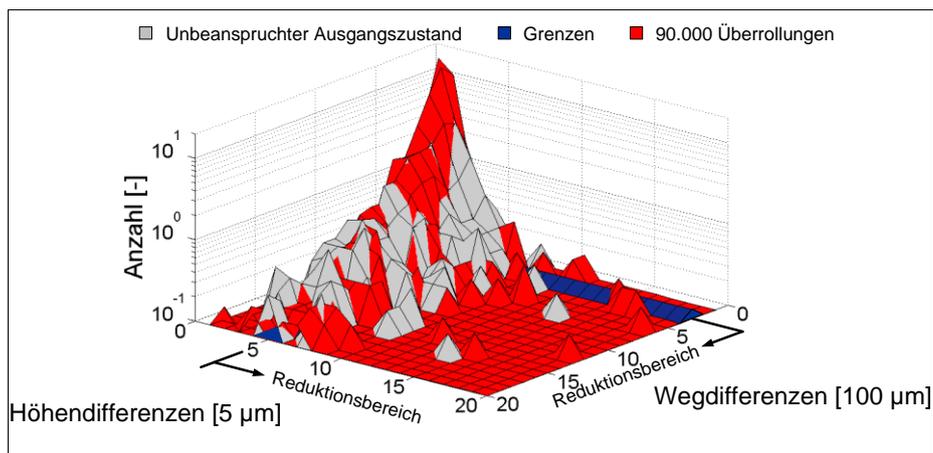


Bild 5-19: Zweidimensionale Häufigkeitsverteilung mit Grenzen

Die Berechnung des Texturdeskriptors Micro Roughness erfolgt durch die Summation der Weg- bzw. Höhendifferenzen über dem Reduktionsbereich der Flächenschärfe 2. Ordnung, bezogen auf eine Profillänge von 100 mm (Schulze, 2011):

$$MRoughness = \sum_{k=e}^{k=f} \left( \sum_{l=g}^{l=h} x_{kl} \right) \quad (Gl. 5-8)$$

mit:

MRoughness: Micro Roughness

$x_{kl}$ : Werte der Matrix der zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung der Flächenschärfe 2. Ordnung

e: Grenze (Schnittpunkte) Wegdifferenzen

f: Anzahl der Spalten

g: Grenze (Schnittpunkte) Höhendifferenzen

h: Anzahl der Zeilen

k: Wegdifferenzen der Flächenschärfe 2. Ordnung

l: Höhendifferenzen der Flächenschärfe 2. Ordnung

### 5.1.6 Multiple Regressionsanalyse

Die Modellfunktion beschreibt einen qualitativen Zusammenhang zwischen dem Reibwert und den identifizierten Rauheitskenngrößen. Die Rauheitskenngrößen werden mittels der oben beschriebenen Texturdeskriptoren quantifiziert. Zur Quantifizierung des Zusammenhanges sind die Texturdeskriptoren in die Modellfunktion einzusetzen und auf Basis einer empirischen Datengrundlage zu gewichten. Dies erfolgt im Rahmen einer multiplen Regressionsanalyse.

Die für die Durchführung der Regressionsanalyse erforderlichen Datensätze (Reibwert und Texturprofile) werden an Mosaik-Probekörpern gewonnen. Die Griffigkeitsmessungen werden mit dem Wehner/Schulze-Prüfstand durchgeführt, die Texturmessungen erfolgen mit einem Weißlichtinterferometer mit einer Auflösung von 3,33 µm.

Die auf einer Datenbasis von 39 Datensätzen berechnete Regressionsfunktion lautet:

$$\mu_{cal} = DIF(90,573 \cdot ASharp + 0,0058 \cdot AShape - 0,013 \cdot MRoughness - 0,198) \quad (\text{Gl. 5-9})$$

Im Bild 5-20 sind die gemessenen Reibwerte über den mittels der Regressionsfunktion berechneten Reibwerten aufgetragen. Die Werte decken einen weiten Reibwertbereich ab und streuen gleichmäßig um die Winkelhalbierende. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion beträgt  $R^2 = 0,90$ . D.h. 90% der gesamten Streuung werden durch das Modell erfasst. Die mittlere Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten Reibwerten beträgt 0,022 µ<sub>WS</sub>-Einheiten, die maximale 0,050 µ<sub>WS</sub>-Einheiten (Schulze, 2011).

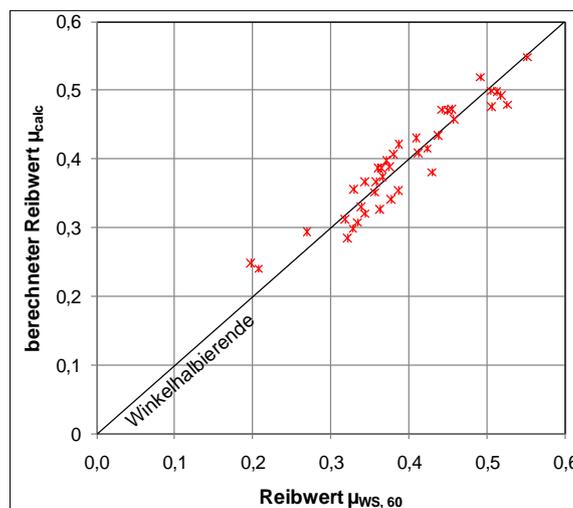


Bild 5-20: Aus der Textur berechneter Reibwert über gemessenen Reibwert

### 5.1.7 Fazit

Das hier vorgestellte Reibungsmodell basiert auf einer geometrischen Charakterisierung der Oberfläche mittels Texturdeskriptoren. Dazu werden zunächst die maßgebenden, griffigkeitsrelevanten Rauheitskenngrößen einer Straßenoberfläche identifiziert. Es werden die von Schulze (1970) beschriebenen Kenngrößen „Drainagevermögen“, „Kanten-“ und „Flächenschärfe“ aufgegriffen und um die Rauheitskenngrößen „Drainagewirkung“ und „Flächenschärfe 1. und 2. Ordnung“ erweitert. Es wird eine Modellfunktion abgeleitet, die den Zusammenhang zwischen Reibwert und Textur auf Basis der genannten Rauheitskenngrößen qualitativ beschreibt.

Die Grundlage der Beschreibung ist die funktionale Teilung des Texturprofils in den Kontakt- und den Drainagebereich. Dazu ist die Eindringtiefe des Gummis in die Textur zu bestimmen. Innerhalb dieses Texturparametermodells wird ein empirischer Ansatz entwickelt, der die Abschätzung der Eindringtiefe anhand der Materialanteilkurve ermöglicht.

Die verschiedenen qualitativen Rauheitskenngößen werden unter Berücksichtigung der Reifen-Fahrbahn-Interaktion den entsprechenden Texturbereichen (Drainage- und Kontaktbereich) zugeordnet und durch geeignete Texturdeskriptoren quantitativ beschrieben. Das Drainagevermögen respektive die Drainagewirkung wird dem Drainagebereich, die Kanten- und Flächenschärfe (1. und 2. Ordnung) dem Kontaktbereich zugewiesen.

Zur Quantifizierung der Rauheitskenngößen werden Texturdeskriptoren eingeführt. Das Drainagevermögen wird durch den Texturdeskriptor *Drainage Area*, die Kantenschärfe durch den Deskriptor *Asperity Sharpness* und die Flächenschärfe mittels der Deskriptoren *Asperity Shape* und *Micro Roughness* charakterisiert.

Der Texturdeskriptor *Drainage Area* beschreibt die zwischen dem in die Textur eingedrungenen Messgummi und der Probekörperoberfläche verbleibende Fläche. Zur Abbildung des Einflusses des Drainagevermögens auf den Reibwert bei hohen Geschwindigkeiten wird der *Drainage Influence Factor (DIF)* eingeführt. Der Deskriptor *Asperity Sharpness* charakterisiert die Schärfe der Spitzen der Asperitäten, die Flächenschärfe 1. Ordnung die geometrische Gestalt der einzelnen Asperitäten und die Flächenschärfe 2. Ordnung die übergeordnete Rauheit im Bereich der Mikrotextur.

Im Anschluss an eine Plausibilitätsprüfung der Deskriptoren werden diese in die Modellfunktion eingesetzt. Die resultierende Regressionsfunktion wird auf Basis einer umfassenden Datengrundlage berechnet und einer statistischen Prüfung unterzogen. Die Datengrundlage wird an Probekörpern gewonnen, die in Anlehnung an das Mosaik-Auslegeverfahren hergestellt wurden (Mosaik-Probekörper).

Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion beträgt  $R^2 = 0,90$ . D.h. 90 % der gesamten Streuung werden durch das Modell erfasst. Mit einer mittleren Abweichung von  $\pm 0,022 \mu_{WS}$ -Einheiten ermöglicht das Texturparametermodell eine exakte Berechnung des Reibwertes aus der Textur.

## 5.2 Gummireibungsmodell (Ansatz 2)

### 5.2.1 Allgemeines zur Gummireibung

Die Gummireibung setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen (Bachmann, 1996):

*Hysteresereibung:* entsteht infolge des Eindringens von Rauheitsspitzen des Straßenbelages in den Gummi beim Gleiten der Profilstollen über die Fahrbahn. Hierbei wird Energie im Gummi dissipiert.

*Adhäsionsreibung:* entsteht infolge von molekularen Verbindungen der Kettenmoleküle des Gummis mit Atomen der Straßenoberfläche im Kontaktbereich. In den

Bewegungszyklen von Dehnen der Molekülketten, Reißen und wieder Entspannen wird Energie im Gummi dissipiert.

*Kohäsionsreibung:* beschreibt den Reibkraftanteil, der durch die Erzeugung neuer Oberflächen an den Reibpartnern anfällt (Abrieb/Ausbruch, Rissbildung).

*Viskose Reibung:* beschreibt den Reibkraftanteil, der durch die Scherung einer zwischen den Reibpartnern eingeschlossenen Flüssigkeitsschicht entsteht. Viskose Reibung entsteht folglich auf nassen Fahrbahnen.

Die wichtigsten Reibungskomponenten sind die Hysterese- und die Adhäsionsreibung (Kummer und Meyer, 1967), wobei es in der Fachwelt unterschiedliche Ansichten über ihre jeweilige Bedeutung für den Reibwert und sogar über ihre Definition gibt. Nach Klüppel und Heinrich (2000) handelt es sich in beiden Fällen um denselben Mechanismus, nämlich Hysterese, auf den die Reibung zurückgeführt werden kann. Adhäsion stellt nach ihrer Auffassung lediglich eine andere Anregungsform, nicht jedoch einen anderen Reibmechanismus dar. Daher sprechen sie in diesem Zusammenhang auch von „adhäsionsinduzierter“ Hysterese.

Adhäsion spielt nur bei niedrigen (Relativ)Geschwindigkeiten zwischen den Reibpartnern (unter 0,1 m/s), ebenen (glatten) Kontaktflächen sowie trockenem, unverschmutztem Kontakt eine größere Rolle (Grosch, 1966; Kummer, 1966; Bachmann, 1996). Für die Griffigkeit bei Nässe, die im Straßenbau maßgebend ist, bestimmt die Hysteresereibung den Reibwert. Eigene Versuche mit einer Gummiprobe auf nassem Asphaltbelag ergaben, dass bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten (um 1 m/s) der Adhäsionsanteil mit 15% zum Gesamtreibwert beitrug. Das bestätigt allerdings auch die allgemein anerkannte Tatsache, dass selbst auf nassen Straßen der Wasserfilm auf den Rauheitsspitzen teilweise durchbrochen und damit trockener Kontakt mit den damit verbundenen Adhäsionseffekten hergestellt wird.

Die viskose Reibung spielt nur beim Aufschwimmen des Reifens (Aquaplaning) eine signifikante Rolle. Das Reifenprofil und die Drainageräume im Straßenbelag sorgen im Normalfall dafür, dass auch bei regennasser Straße genügend Kontakt zwischen Reifen- und Straßenoberfläche aufgebaut werden kann. Dieser Kontakt umfasst, auch auf trockener Straße, nur einen Bruchteil der nominellen Kontaktfläche; der Reifen stützt sich sozusagen nur auf den Rauheitsspitzen ab und sinkt, je nach Oberflächentopographie, Fahrgeschwindigkeit und Außentemperatur, mehr oder weniger stark in die Straßentextur ein (mittlere Eindringtiefe in der Größenordnung von 0,3 bis 1,5 mm (Bachmann, 1998)). Je höher die Geschwindigkeit und je niedriger die Temperatur, desto steifer reagiert das Gummi (viskoelastisches Materialverhalten, frequenzabhängig) und desto geringer ist damit die Eindringtiefe des Reifens.

Auch die Kohäsionsreibung kann im Normalfall vernachlässigt werden – erst recht bei Nässe. Nur in Extremsituationen (trockene, raue Oberfläche, Hitze, Vollbremsung, Rennsituationen) kommt sie zum Tragen.

Die Frage, wie eine Straßenoberfläche aussehen muss, damit sie dem Fahrzeug einen möglichst hohen Reibwert zur Verfügung stellt, kann im Prinzip durch einen Blick auf die Materialeigenschaften eines durchschnittlichen Laufflächengummis beantwortet werden. Die frequenzabhängigen (und zusätzlich dehnungs- und temperaturabhängigen) Verlustfaktoren üblicher Lauf-

flächenmischungen haben ihre Maxima typischerweise in einem Frequenzbereich zwischen  $10^4$  und  $10^6$  Hz (Persson, 1998; Heinrich et al., 1996). Anregungen in diesem Frequenzbereich führen also zu maximalen Reibungsverlusten. Setzt man mittlere Gleitgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 1 m/s für ABS- und 10 m/s für Blockierbremsungen an, dann müsste die Fahrbahn eine ausgeprägte Rauheit im Wellenlängenbereich  $\lambda = v/f = 1/10^6$  bis  $10/10^4$  m, d. h. 1 Mikrometer bis 1 Millimeter, zur Verfügung stellen. Diese grobe Abschätzung zeigt zunächst einmal, dass selbst Rauheitselemente im Mikrometer-Bereich für die Griffigkeit eine Bedeutung haben; die Straßenoberfläche sollte demzufolge eine ausgeprägte Feinstruktur aufweisen.

Neben der Feinrauheit muss der Straßenbelag aber auch genügend (große) Drainageräume zur Ableitung des Wassers zur Verfügung stellen. Die Drainage sorgt dafür, dass auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ein Durchbrechen des Wasserfilms an den Rauheitsspitzen und damit der „Grip“ gewährleistet ist.

Im Allgemeinen nimmt der Reibwert (bei Nässe) mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit ab. Das hängt zum Einen damit zusammen, dass die Zeiträume, die für die Wasserdrainage aus dem Kontaktbereich zur Verfügung stehen, zunehmend kleiner werden. Zum Anderen dringt durch die (geschwindigkeitsbedingte) Versteifung des Gummis der Reifen auch weniger in die Textur ein. In der Fachwelt ist man sich einig, dass der Abfall im Wesentlichen von der Drainagefähigkeit des Straßenbelages bestimmt wird (Bachmann, 1996; Rado, 1994; Huschek, 1996). Das Maß des Abfalls kann durch eine ausreichend große Makrotextur (Schulze, 1969) und/ oder eine ausreichend große Offenporigkeit minimiert werden. Mit „Makrotextur“ wird die Textur im Wellenlängenbereich von 0,5 bis 50 mm bezeichnet. Sie wird von der Größe der Gesteinskörner, im Wesentlichen des Größtkorns, und der Verdichtung beim Deckeneinbau bestimmt.

Der Abfall des Reibwertes mit der Gleitgeschwindigkeit ist jedoch kein typisches Nassreibungsphänomen – auch auf trockenen Straßen ist in den Reibwert-Schlupf- bzw. Reibwert-Schlupfgeschwindigkeitskurven dieser typische Abfall zu beobachten: mit zunehmendem Schlupf steigt der Reibwert eines Reifens zunächst steil an (die Anfangssteigung spiegelt den Deformationsschlupf und damit die Profilsteifigkeit wieder), um dann degressiv ansteigend bei etwa 10 - 15% Schlupf (auf trockenen Fahrbahnen) ein Maximum zu erreichen, das durch Adhäsions- und Hystereseeffekte bestimmt wird. Ab diesem Maximum fällt die Kurve dann flach auslaufend auf den Gleitreibwert ab, der bei 100% Schlupf bzw. maximaler Gleitgeschwindigkeit erreicht wird. Der Abfall wird in diesem Falle durch den abnehmenden Adhäsionsanteil und die starke Erwärmung des Gummis bestimmt (Persson, 2006), der auf trockener Straße mehr zum Tragen kommt als auf nasser. Je höher die Mikrorauheit (Textur im Wellenlängenbereich bis 0,5 mm) auf den Gesteinskuppen, desto höher ist das Reibwertmaximum. Ein festes Verhältnis von maximalem Reibwert und Gleitreibwert kann aufgrund der Vielfalt an Einflussgrößen im Reibungsprozess nicht angegeben werden (Bachmann, 1996).

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Gummireibungsmodelle erprobt: ein zweidimensionales Simulationsmodell bestehend aus mehreren miteinander verknüpften Zener-Elementen bestehend aus Federn und Dämpfern, das über die Verlustarbeit in den Dämpfern den Reibwert ermittelt, ein analytisches Modell nach dem Ansatz von Heinrich und Klüppel sowie ein Modell nach der Theorie von Persson. Alle drei Ansätze haben gemein, dass sie die Adhäsionsreibung

vernachlässigen und nur den Hystereseanteil der Gummireibung berücksichtigen (der für die Griffigkeit bei Nässe auch maßgebend ist). Die ersten beiden Ansätze wurden im Laufe des Projektes zurückgestellt, weil sie nicht die gewünschten Ergebnisse brachten. Weiterverfolgt wurde schließlich das Modell von Persson, das sowohl von der Rechenzeit als auch von der Theorie her am erfolgversprechendsten für die gestellte Aufgabe erschien. Dieses Modell wird im Folgenden dargestellt.

### **5.2.2 Das Gummireibungsmodell**

Da die Griffigkeit bei Nässe und bei hohen Gleitgeschwindigkeiten (60 km/h im Falle der PWS-Griffigkeitsmessung) betrachtet wird, können adhäsive Einflüsse auf die Griffigkeit zunächst vernachlässigt werden. Ferner wird vereinfachend unterstellt, dass stets eine ausreichende Drainage im Fahrbahn-Profilstollen-Bereich gegeben ist, sodass auch keine nennenswerten viskosen Effekte in die Griffigkeit eingehen. Dieser Punkt wird am Ende des Kapitels noch einmal aufgegriffen. Für einen ersten Vergleich von Theorie und Messung wurde also ein reines Hysteresereibungsmodell gewählt, das auf die Theorie von Persson zurückgreift.

Im Folgenden wird der Ansatz von Persson kurz vorgestellt. Für die Herleitung der Formeln sowie tiefere Einblicke in die Theorie wird auf die zahlreichen Veröffentlichungen verwiesen, die als Downloads im Internet zur Verfügung stehen (hier besonders: Persson 2001, 2006). Wichtig ist jedoch, von vornherein festzuhalten, dass der hier gewählte Ansatz noch kein Zwischenmedium enthält und eigentlich auf die trockene Straße abzielt. Die Wirkung des Wassers wird hier nur indirekt über die Temperatur, die Vernachlässigung der Adhäsion und die Beschneidung des Spektrums durch geeignete Grenzwellenlängen berücksichtigt.

Das Modell von Persson benötigt als Eingangsgröße die zweidimensionale Spektrale Dichte der Straßen- bzw. Probenoberfläche. Da die Texturinformation jedoch nur in Form von Längsprofilen vorlag, mussten die daraus berechneten eindimensionalen Spektralen Dichten unter der Annahme isotroper Oberflächeneigenschaften in zweidimensionale Spektrale Dichten umgerechnet werden. Das lässt sich damit begründen, dass die Griffigkeit von Straßenoberflächen allgemein als isotrop angenommen wird und alle für die Griffigkeit relevanten Informationen auch aus einer 2D-Analyse gewonnen werden können (vgl. auch Kapitel 3.2.3). Zudem hängt die Höhe der Griffigkeit (eine ausreichende Drainage vorausgesetzt) wesentlich von der Mikrorauheit auf dem einzelnen Gesteinskorn ab, welche bei der zufälligen Lage der Gesteinskörner im Raum als richtungsunabhängig angenommen werden kann. Da die Längsprofile zudem entlang einer Kreisbahn, orthogonal zueinander, aufgenommen wurden (vgl. Bild 5-21) und am Ende in Form einer aus allen Profilen gemittelten Spektralen Dichte in das Reibungsmodell gingen, war für eine ausreichende Berücksichtigung der Textur in ihrer flächenhaften Ausdehnung gesorgt.

Als Ausgangsgröße liefert das Gummireibungsmodell den stationären Reibwert eines Gummi- bzw. Profilstollenelementes in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit (= Relativgeschwindigkeit zwischen Gummi und Straßenoberfläche). Der Reibwert berechnet sich nach Persson wie folgt:

$$\mu_k = \frac{1}{2} \int_{q_L}^{q_1} dq q^3 C(q) P(q) \int_0^{2\pi} d\Phi \cos\Phi \operatorname{Im} \frac{E(qv \cos\Phi)}{(1-v^2)\sigma_0} \quad (\text{Gl. 5-10})$$

mit:

$$P(q) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty dx \frac{\sin x}{x} \exp(-x^2 G) = \operatorname{erf} \left( \frac{1}{2\sqrt{G}} \right) \quad (\text{Gl. 5-11})$$

und

$$G(q) = \frac{1}{8} \int_{q_L}^q dq q^3 C(q) \int_0^{2\pi} d\Phi \left| \frac{E(qv \cos\Phi)}{(1-v^2)\sigma_0} \right|^2 \quad (\text{Gl. 5-12})$$

In diesen Gleichungen bedeutet  $q$  die Wegkreisfrequenz der zweidimensionalen Spektralen Dichte sowie des E-Moduls des Gummis. Sie errechnet sich zu  $q = 2\pi f = 2\pi/\lambda$ , wobei  $f$  die Wellenzahl und  $\lambda$  die Wellenlänge bezeichnet.  $q_L$  ist die untere Grenzfrequenz, die sich aus der größten relevanten Wellenlänge ergibt. Diese entspricht der Länge eines Profilstollens, welche ihrerseits in der Größenordnung eines oder weniger Zentimeter liegt.  $q_1$  ist die obere Grenzfrequenz, die sich aus der kleinsten für die Reibung relevanten Wellenlänge ergibt. Diese liegt i.A. in der Größenordnung eines Mikrometers ( $10^{-3}$  mm). Verschmutzungen oder Gummiabrieb auf der Oberfläche können kleinste Kavitäten ausfüllen und auf diese Weise die obere Grenzfrequenz herabsetzen. Die obere Grenzfrequenz ergibt sich dann annähernd aus der durchschnittlichen Größe der Partikeldurchmesser ( $D$ ) zu  $q_1 = 2\pi/D$ . Auch Wassereinschlüsse im Kontaktbereich können die obere Grenzfrequenz herabsetzen und sogar auf mehreren Längenskalen zu einer Reduzierung der Anregungsamplituden führen. In Bild 5-21 ist der Verlauf der zweidimensionalen Spektralen Dichte  $C(q)$  für eine typische Straßenoberfläche im doppelt-logarithmischen Maßstab skizziert. Viele Straßenoberflächen weisen fraktale Eigenschaften auf, d.h. ihr Spektrum kann, wie in Bild 5-21 zu sehen, durch eine Gerade angenähert werden.

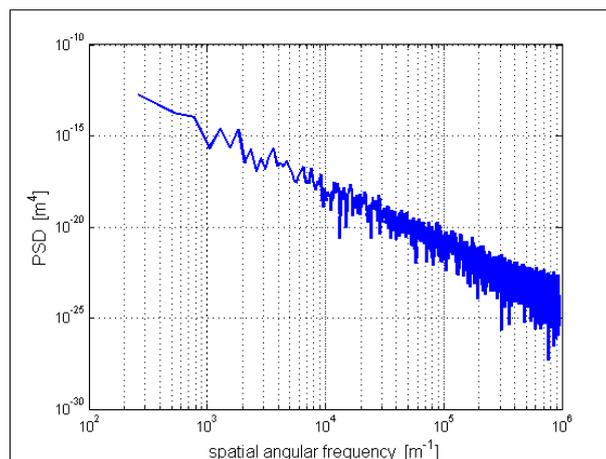


Bild 5-21: Beispiel für die Spektrale Dichte einer Straßenoberfläche

In Verbindung mit der Gleitgeschwindigkeit  $v$  ergeben sich Anregungsfrequenzen  $f = qv \cos\Phi$  auf den Gummistollen, die abhängig vom Winkel  $\Phi$  zwischen der betrachteten senkrechten Schnittfläche durch die Fahrbahnoberfläche und der Bewegungsrichtung des Gummis sind. Sie bestimmen den frequenzabhängigen E-Modul des Gummis, der direkt in Form seines imaginä-

ren Verlustmoduls  $\text{Im}(E(qv\cos\phi))$  über (Gl. 5-10) und indirekt in Form seines Absolutwertes  $|E(qv\cos\phi)|$  über (Gl. 5-11) und (Gl. 5-12) in den Reibwert eingeht. Dabei bestimmt letzterer (der Absolutwert) die Eindringtiefe des Gummis in die Straßenoberfläche und damit die Kontaktbedingungen während des Reibvorgangs.

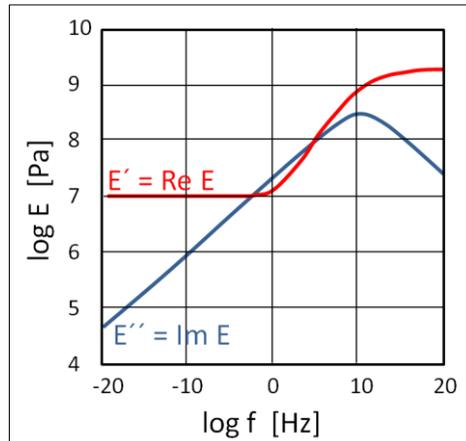


Bild 5-22: Beispiel für den E-Modul eines Gummis (idealisiert)

In Bild 5-22 ist der frequenzabhängige E-Modul eines Gummis abgebildet, typisiert in Form seines Real- und Imaginärteils: für niedrige Anregungsfrequenzen ist das Gummi relativ weich. Mit höheren Frequenzen versteift es sich zunehmend, um schließlich bei sehr hohen Anregungsfrequenzen eine Steifigkeit anzunehmen, die um ein Vielfaches größer ist (in diesem Beispiel um den Faktor 200) als die Steifigkeit bei niedrigen Frequenzen. In dem Übergangsbereich zwischen den beiden Frequenzbereichen erreicht der Verlustfaktor, das ist der Quotient aus Imaginär- und Realteil, sein Maximum. In diesem Bereich wird am meisten Energie dissipiert. Er stellt sozusagen den „Arbeitsbereich“ des Gummis dar, in dem theoretisch der größte Reibwert erreicht werden kann. Für das Gummireibungsmodell wurden von einem Reifenhersteller E-Modul-Daten einer aktuellen Laufflächenmischung zur Verfügung gestellt.

Der Reibwert in (Gl. 5-10) stellt eine Summation aller Verlustanteile über den gesamten relevanten Frequenzbereich von  $q_L$  bis  $q_1$  dar. Er ist abhängig von der Wegkreisfrequenz  $q$ , von der Gleitgeschwindigkeit  $v$ , vom E-Modul  $E(qv)$  und der Querkontraktionszahl  $\nu$  des Gummis (letztere kann zu 0,5 angesetzt werden), vom nominellen Kontaktdruck  $\sigma_0$ , von der Straßenoberfläche, die in Form ihrer zweidimensionalen Spektralen Dichte  $C(q)$  in den Reibwert eingeht, und zuletzt von den Kontaktbedingungen  $P(q)$ , die ihrerseits ebenfalls von all diesen Einflussgrößen abhängig sind und über die Gleichungen (Gl. 5-11) und (Gl. 5-12) ermittelt werden.

$P(q)$  ist das wegkreisfrequenzabhängige Verhältnis von realer Kontaktfläche zu nomineller Kontaktfläche (in Prozent),  $P(q) = A(q)/A_0$ , wobei die nominale Kontaktfläche  $A_0$  die „äußere“ Kontaktfläche zwischen dem Gummikörper und der Straßenoberfläche darstellt (bei einem quaderförmigen Gummikörper ergibt sich diese aus Länge x Breite des Gummis).

Die reale Kontaktfläche  $A(q)$  ist in der Regel viel kleiner als die nominelle Kontaktfläche, weil das Gummi nur auf einigen Spitzen (Asperitäten) die Straßenoberfläche berührt. Würden die Kontaktverhältnisse einer einzelnen Asperität wiederum unter dem Mikroskop betrachtet werden, würde man feststellen, dass selbst auf einer Asperität kein vollständiger Kontakt vorliegt,

weil die Asperität ihrerseits auch eine Rauheit besitzt und das Gummi auch dort nur mit einigen Spitzen Kontakt hat. Das Verhältnis von realer zu nomineller Kontaktfläche „ $P$ “ ist also skalenabhängig und hängt von der Auflösung ab, unter der man den Kontakt betrachtet.

Diesem Umstand wird im Kontaktmodell von Persson dadurch Rechnung getragen, dass die Kontaktfunktion  $P(q)$  eben wellenlängenabhängig ist ( $q = 2\pi/\lambda$ ), wobei  $\lambda$  bzw.  $q$  sozusagen die Auflösung (Vergrößerung) darstellt, unter der man den Kontakt betrachtet.

In Bild 5-23 ist die wegkreisfrequenzabhängige Kontaktfunktion  $P(q) = A(q)/A_0$  eines Gummis, der mit einer bestimmten Geschwindigkeit über eine Oberfläche  $C(q)$  gleitet, beispielhaft in doppelt-logarithmischem Maßstab dargestellt. Diese Kontaktfunktion wurde nach (Gl. 5-11) und (Gl. 5-12) bestimmt. Zu erkennen ist, dass im makroskopischen Maßstab  $P(q)$  gleich „1“ ist ( $\log P(q)=0$ ), während zu höheren Wegkreisfrequenzen (feineren Auflösungen) hin die reale Kontaktfläche bzw. das Verhältnis von realer zu nomineller Kontaktfläche  $A_q/A_0$  immer kleiner wird.  $q_m$  kennzeichnet eine Wellenlänge von 2 cm, was der maximalen Korngröße der Gesteinskörner in Straßenbelägen entspricht. Im Abbildungsmaßstab  $q_m$  entspricht (in diesem Beispiel) die reale Kontaktfläche 2% der nominellen Kontaktfläche ( $P(q_m) = 10^{-1,7}$ ).

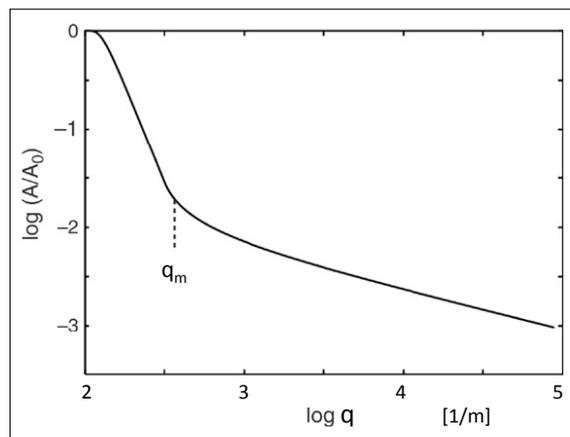


Bild 5-23: Beispiel für eine Kontaktfunktion  $P(q)$  eines Gummis (Persson, 2006)

### 5.2.3 Die „Flash“ Temperatur

In Bild 5-24 ist die Infrarotaufnahme eines bremsenden Reifens dargestellt. Ein Teil der Kontaktfläche ist in verschiedenen Farbstufen erkennbar. Bläuliche Bereiche sind Kontaktbereiche niedriger Temperatur, während rötliche oder gar gelbliche Farben Kontaktbereiche mit höheren Temperaturen darstellen. Man kann allgemein feststellen, dass im unmittelbaren Kontakt eines Gesteinskorns oder (feiner aufgelöst: einer Asperität) die Temperatur am höchsten ist und mit zunehmendem Abstand von diesem Punkt kontinuierlich abfällt. Neben dieser örtlichen gibt es auch eine zeitliche Abhängigkeit der Temperaturverteilung, denn die Kontaktzeiten währen immer nur Sekundenbruchteile, zwischen denen sich das Gummi immer wieder abkühlen kann. Diese örtlich und zeitlich veränderlichen Temperatur-„Spots“ nennt Persson „Flash“-Temperaturen. Sie sind insbesondere bei der Berechnung des Reibwertes auf trockenen Straßen und bei hohen Gleitgeschwindigkeiten zu berücksichtigen.

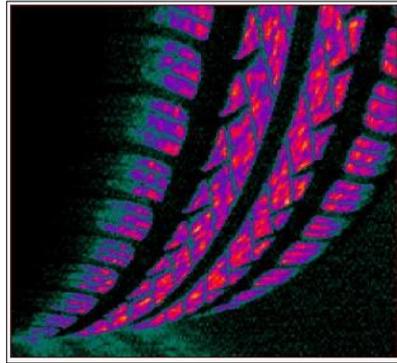


Bild 5-24: Infrarotaufnahme eines Reifens beim Bremsen (Persson, 2006)

Für die Temperaturabhängigkeit des Gummis kann für ungefüllte Elastomere die Temperatur-Frequenz-Äquivalenz-Beziehung nach Williams, Landel und Ferry (1955), die sogenannte WLF-Gleichung, verwendet werden. Sie besagt, dass eine Temperaturerhöhung, wie in Bild 5-25 dargestellt, einer Verschiebung des E-Moduls zu höheren Frequenzen entspricht. Damit geht eine Erhöhung der Elastizität bei gleichzeitiger Verringerung der Viskosität einher. Die WLF-Gleichung lautet:

$$\log(a_T) = \frac{-8,86 \cdot (T - T_g - 50)}{51,5 + T - T_g} \quad (\text{Gl. 5-13})$$

Darin stellt  $a_T$  den Verschiebungsfaktor dar, mit dem die Frequenz multipliziert werden muss, um den E-Modul  $E(a_T \omega)$  bei der betreffenden Temperatur  $T$  zu bestimmen.  $T_g$  ist die Glasübergangstemperatur des Gummis.

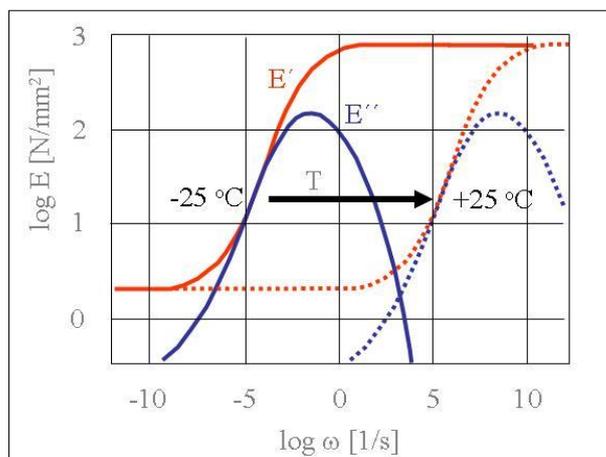


Bild 5-25: Effekt einer Temperaturerhöhung auf den E-Modul von Gummi

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben, wie die Temperaturverteilung im Gummi berechnet wird. Für die Temperaturverteilung benutzt Persson in Analogie zu seiner Kontaktverteilung bzw. Kontaktfunktion  $P(q)$  eine Funktion  $T(q)$ , die die Temperaturverteilung im Gummi in Abhängigkeit von der gewählten „Auflösung“  $q=2\pi/\lambda$  beschreibt. Allgemein formuliert besagt diese Funktion, dass unter feinerer (höherer) Auflösung höhere Temperaturspots in den Kontaktpunkten zu beobachten sind und unter gröberer Auflösung niedrigere, weil hier auch kühlere Randbereiche in die Temperatur eingehen. Mit anderen Worten, sie beschreibt, wie kleine Wel-

lenlängen mit hohen Temperaturen und große Wellenlängen mit niedrigen Temperaturen verbunden sind. Die Temperaturverteilungsfunktion ergibt sich aus der Wärmediffusionsgleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} - D\nabla^2 T = \frac{Q(x,t)}{\rho C_V} \quad (\text{Gl. 5-14})$$

in der  $\dot{Q}$  die Energieproduktion pro Volumen- und Zeiteinheit als Folge der inneren Reibung des Gummis darstellt.  $D$  beschreibt die Wärmeleitfähigkeit,  $\rho$  die Dichte und  $C_V$  die spezifische Wärmekapazität. Persson leitet daraus folgende Temperaturverteilungsfunktion  $T_q = T(q)$  ab (Persson, 2006):

$$T_q = T_0 + \int_0^\infty dq' g(q, q') f(q') \quad (\text{Gl. 5-15})$$

mit:

$$f(q) = \frac{vq^4}{\rho C_V} C(q) \frac{P(q)}{P(q_m)} \int d\phi \cos \phi \operatorname{Im} \frac{E(qv \cos \phi, T_q)}{1 - v^2} \quad (\text{Gl. 5-16})$$

und

$$g(q, q') = \frac{1}{\pi} \int dk \frac{1}{Dk^2} (1 - e^{-Dk^2 t_0}) \frac{4q'}{k^2 + aq'^2} \frac{4q^2}{k^2 + 4q^2} \quad (\text{Gl. 5-17})$$

Darin beschreibt  $f(q)$  im Wesentlichen die Energieproduktion in den lokalen Kontaktpunkten des Gummis mit der Straßenoberfläche und  $g(q, q')$  die Art und Weise, wie diese Energie von dort aus in das umliegende Volumen des Gummis hinein abfließt bzw. abnimmt.  $q$  bezeichnet die Wegkreisfrequenz ( $q=2\pi/\lambda$ ),  $v$  die Gleitgeschwindigkeit und  $t_0 = R/v$  die (halbe) durchschnittliche Kontaktzeit des Gummis auf den Gesteinskuppen mit dem Größtkorndurchmesser  $R$ . Die übrigen Einflussgrößen sind bereits unter Kap. 5.2.2 erklärt. Zu beachten bei der numerischen Umsetzung der Formeln ist der Umstand, dass die Zielgröße  $T_q$  in (Gl. 5-15) über (Gl. 5-16) zugleich Eingangsgröße in (Gl. 5-15) ist. Nach (Gl. 5-16) bestimmt die Temperaturverteilung  $T_q$  den E-Modul des Gummis. Diese geht als  $E(qv, T_q) = E(a_T qv)$  in die Berechnung des Reibwertes nach (Gl. 5-10) bis (Gl. 5-12) ein.

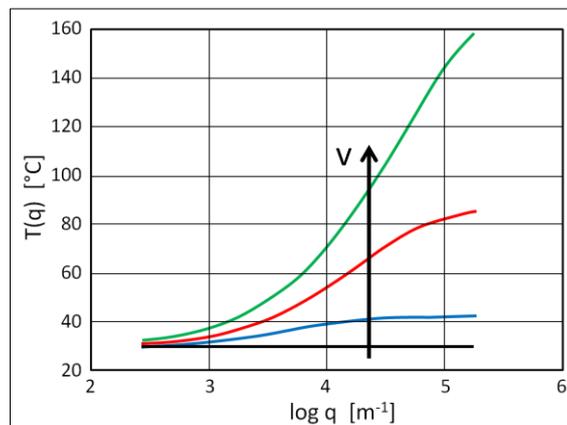


Bild 5-26: Temperaturverteilung für verschiedene Gleitgeschwindigkeiten  $v$  als Funktion der Wegkreisfrequenz  $q$

In Bild 5-26 sind beispielhaft Temperaturverteilungskurven  $T(q)$  für verschiedene Gleitgeschwindigkeiten abgebildet.

### 5.2.4 Reibwertberechnungen

In Bild 5-27 ist das Ergebnis einer Reibwertberechnung beispielhaft dargestellt. Es stellt den berechneten stationären Reibwert als Funktion der Gleitgeschwindigkeit für eine bestimmte Straßenoberfläche dar. Für sehr kleine Gleitgeschwindigkeiten ergibt sich in diesem Falle ein Reibwert von 0,55, der mit zunehmender Geschwindigkeit zunächst ansteigt. Dieser Anstieg ist dadurch begründet, dass sich mit zunehmender Geschwindigkeit das Anregungsspektrum zu höheren Frequenzen und damit zu höheren Hystereseverlusten im Gummi verschiebt. Durch die zunehmende Erwärmung tritt jedoch gleichzeitig ein gegenläufiger Effekt auf (s. Temperatur-Frequenz-Äquivalenz, Kapitel 5.2.3), der diesen Effekt wieder umkehrt und schließlich in einem Reibwert-Maximum von 0,82 bei einer Gleitgeschwindigkeit von  $10^{-0,3}$  m/s  $\approx 0,5$  m/s resultiert.

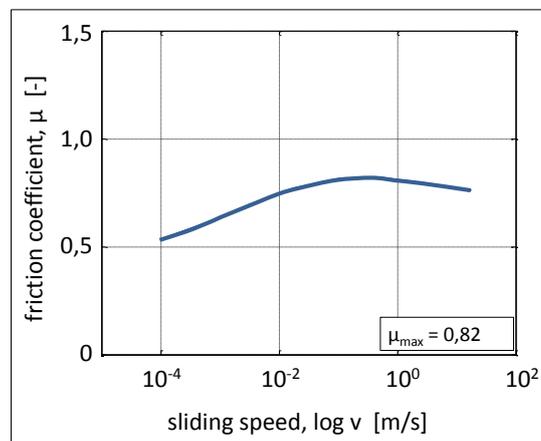


Bild 5-27: Ergebnis einer Reibwertberechnung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

### 5.3 Empirisches Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Mikrotextur und Griffigkeit (Ansatz 3)

Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Textur und Griffigkeit lassen sich zahlreiche Kennwerte (Texturindikatoren) zur Charakterisierung der Rauheitselemente berechnen. Beispielsweise wird in der DIN EN ISO 13473-1 (2004) die Profiltiefe (PD), die mittlere Profiltiefe (MPD) sowie die Texturtiefe (TD) beschrieben. Beckenbauer (2003) benutzt zur Kennzeichnung der Textur sogenannte Abbott-Kurven. Mean Peak Shape (MPS) und Winkelparameter werden von Pinnington (2007) genutzt. Mit den genannten Indikatoren ist jedoch keine Differenzierung zwischen Mikro- und Makrotextur zu erzielen. Tendenziell beziehen sie sich auch eher auf die Makrotextur, weniger auf die gerade für die Griffigkeit so maßgebende Mikrotextur (Steinauer et al., 2011).

Zur Beschreibung der Reibung von Gummiwerkstoffen auf rauen Oberflächen wurden analytische Modelle entwickelt, die eine exakte physikalische Charakterisierung der Materialeigenschaften des Gummis erfordern (Grosch, 1963; Kummer, 1966; Klüppel, 2000; Persson, 2001; Lindner, 2005). In Loeben (2007) werden Mikro- und Makrotexturkennwerte in Relation zur Griffigkeit gesetzt. Anhand der Ergebnisse konnte festgestellt werden, dass die Griffigkeit bei hoher

Geschwindigkeit besser mit Makrotexturkennwerten als mit Mikrotexturkennwerten korreliert. Nach Persson (1996, 2001, 2005) hängt die Haftreibung zwischen Reifen und Fahrbahn neben den Gummieigenschaften primär vom Verhältnis von Amplitude zu Wellenlänge der Oberflächentextur ab, welches durch das zweidimensionale Leistungsdichtespektrum der Oberfläche ausgedrückt werden kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine getrennte Betrachtung der Beiträge der Mikro- und Makrorauheit zur Griffigkeit mit den oben genannten Ansätzen nicht möglich ist. Ein quantitativer Zusammenhang zwischen Mikrorauheit und Griffigkeit mit ausreichender Genauigkeit (Bestimmtheitsmaß  $R^2 \geq 85\%$ ) konnte bisher noch nicht nachgewiesen werden. Daher wurde im Rahmen dieser Ausarbeitung auf Grundlage der in der Literatur vorzufindenden Erkenntnisse ein empirisches Modell entwickelt, um den Einfluss der Mikrotextur auf die Griffigkeit quantitativ beschreibbar zu machen.

### 5.3.1 Ermittlung von griffigkeitsrelevanten Mikrotexturkenngrößen

Für die Erstellung eines empirischen Gummireibungsmodells wurden massive Granitplatten (s. Kapitel 3.1.1) ausgewählt, die nahezu keine Makrotextur und somit kein Drainagevermögen besitzen (s. Bild 3-3).

Für jede Probeplatte wurden zunächst die Texturprofile erfasst. Texturprofile mit mehr als 20% Anteil an Fehlstellen und Ausreißern sind von der weiteren Auswertung ausgeschlossen worden. Aus den Texturdaten wurde zunächst das zweidimensionale Leistungsdichtespektrum (Persson, 2001) berechnet und unter Annahme der Selbstähnlichkeit der Oberfläche (s. Bild 2-9) mit Hilfe der „Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen“ linearisiert (Bild 2-10). Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , welches die Stärke der Linearität der spektralen Leistungsdichte beschreibt, liegt bei ca. 98% (s. Bild 5-28), so dass die Oberflächen aller untersuchten Probeplatten als im hohen Maße selbstähnlich betrachtet werden können (Wang, 2011).

Neben den Texturmessungen wurden auch Griffigkeitsmessungen an den Granitplatten durchgeführt. Diese wurden mit dem SRT-Pendelgerät vollzogen, das bekanntermaßen eine hohe Korrelation zur Mikrotextur der Straßenoberfläche aufweist (s. Kapitel 3.3.1).

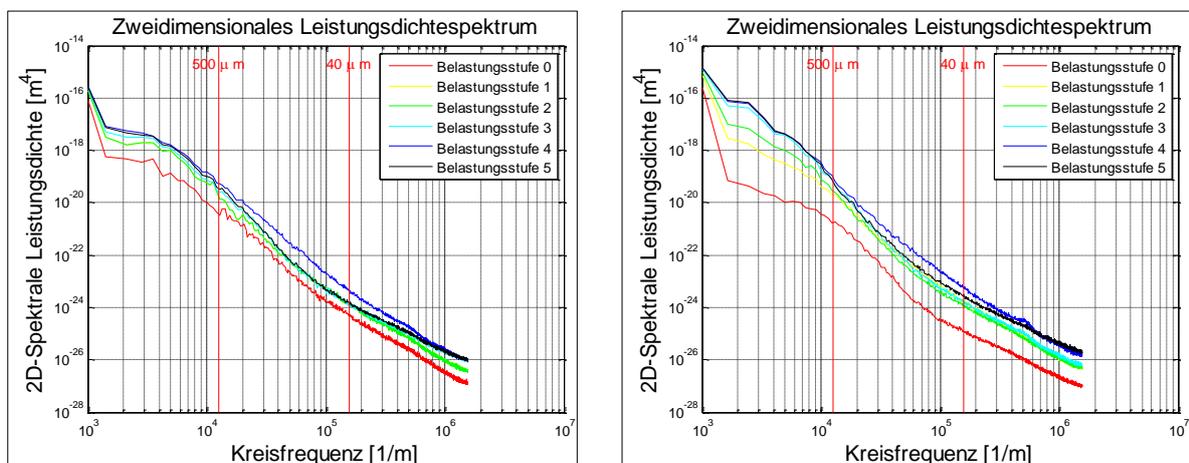


Bild 5-28: Spektrale Leistungsdichte der Granitplatten (polierter Anfangszustand) mit Quarzmehl poliert (links) und mit Quarzsand poliert (rechts)

Tabelle 5-1: Übersicht für die untersuchten Probekörper

Nr.	w	LPSD <sub>f=1</sub>	SRT-Wert	R <sup>2</sup> [%]	Nr.	w	LPSD <sub>f=1</sub>	SRT-Wert	R <sup>2</sup> [%]
1	1,53	-12,046	97,0	98,8	29	2,96	-8,223	38,0	99,4
2	1,06	-15,457	95,2	98,6	30	2,70	-9,342	37,6	98,0
3	1,94	-9,721	94,6	98,2	31	3,00	-7,445	37,5	99,1
4	1,80	-10,614	93,4	98,3	32	2,96	-7,708	37,5	98,5
5	1,48	-12,709	90,0	99,3	33	2,64	-9,538	37,5	95,8
6	2,26	-8,184	85,0	97,9	34	2,83	-8,837	37,0	96,9
7	2,97	-4,690	82,4	97,9	35	2,94	-7,726	36,9	98,6
8	2,78	-5,667	79,6	98,6	36	2,62	-9,673	36,9	95,9
9	3,14	-3,881	78,8	98,4	37	2,40	-10,755	36,7	95,4
10	3,25	-3,206	78,2	97,7	38	3,05	-7,601	36,0	98,0
11	2,32	-8,444	77,6	97,5	39	2,82	-9,022	35,8	97,6
12	3,17	-4,012	75,6	98,1	40	2,46	-10,654	35,7	96,0
13	2,87	-8,221	54,8	97,9	41	2,91	-8,269	35,6	97,6
14	3,01	-7,646	51,0	99,3	42	3,04	-7,654	35,6	97,9
15	3,07	-7,292	50,2	99,3	43	2,72	-9,549	35,4	98,8
16	3,00	-7,910	47,0	98,4	44	2,86	-8,707	35,4	97,3
17	3,04	-7,731	45,4	98,6	45	2,96	-7,710	35,1	98,5
18	2,75	-8,924	45,2	97,7	46	3,06	-7,547	34,4	97,9
19	3,00	-7,900	44,0	98,5	47	2,89	-8,609	34,3	98,7
20	2,97	-8,109	43,0	98,3	48	2,77	-9,201	34,3	98,5
21	2,77	-8,952	42,8	97,4	49	2,39	-10,860	33,9	94,5
22	2,99	-7,686	42,5	98,9	50	2,87	-8,519	33,6	98,4
23	3,06	-7,610	40,6	99,5	51	2,80	-8,843	32,4	97,9
24	2,91	-8,383	40,4	99,5	52	2,55	-10,467	29,1	95,5
25	2,96	-8,020	39,9	98,4	53	3,03	-7,481	29,1	98,8
26	2,98	-7,973	39,4	97,9	54	2,87	-8,981	27,2	98,8
27	2,97	-7,686	39,3	99,5	55	2,56	-11,314	18,4	96,5
28	2,94	-7,948	39,0	99,4	56	2,75	-10,172	16,2	98,5

Aus der linearisierten Leistungsdichte wurden darauf zwei Kenngrößen zur Beschreibung der Rauheit im Mikrotextrbereich (von 4 µm bis 500 µm) abgeleitet (s. Bild 5-29): der LPSD<sub>f=1</sub>, der dem logarithmierten PSD-Wert bei einer Kreisfrequenz von f = 1 Hz (d. h. log(f) = 0) entspricht, und die Welligkeit w, die die Steigung der Geraden im doppeltlogarithmischen Maßstab beschreibt. Eine große Welligkeit bedeutet, dass der langwellige Texturanteil gegenüber dem kurzwelligen dominiert. Die ermittelten w-, LPSD<sub>f=1</sub>-Werte sowie das berechnete Bestimmtheitsmaß sind in Tabelle 5-1 dargestellt und den gemessenen SRT-Werten gegenübergestellt.

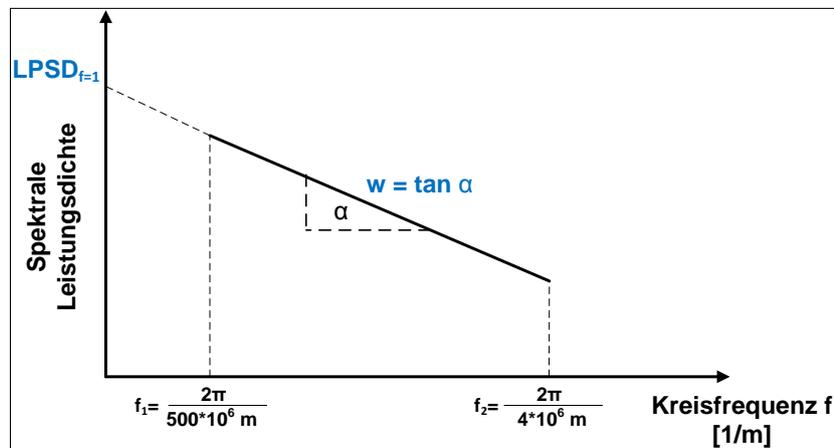


Bild 5-29: Ermittlung der Kennwerte zur Beschreibung der Mikrorauheit anhand der linearisierten Leistungsdichte

### 5.3.2 Ableitung eines Zusammenhangs zwischen Mikrotextur und Griffigkeit

Die Welligkeit  $w$  und der  $LPSD_{f=1}$  werden mit den SRT-Werten durch eine multiple Regressionsanalyse mittels der Software TabelCurve 3D verknüpft. Die Regressionsfunktion wird über die Minimierung der Abweichungsquadrate zwischen beobachteten und prognostizierten SRT-Werten bestimmt und lautet:

$$SRT = 538,975 - 228,112 \cdot w^{0,5} + 13,565 \cdot LPSD_{f=1} \quad (\text{Gl. 5-18})$$

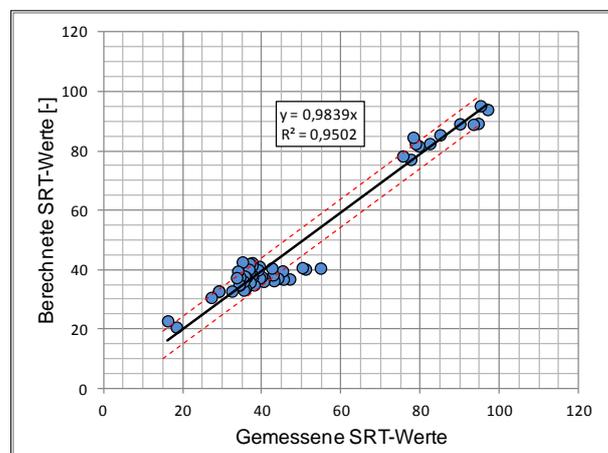
mit:

SRT: SRT-Wert [-]

$w$ : Welligkeit [-]

$LPSD_{f=1}$ : Logarithmierter PSD-Wert bei einer Kreisfrequenz von  $q = 1$  Hz

Bild 5-30 stellt den Vergleich zwischen den gerechneten und den gemessenen SRT-Werten dar. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion liegt bei 0,95, so dass der Zusammenhang zwischen dem SRT-Wert und der Welligkeit  $w$  sowie dem  $LPSD_{f=1}$  exakt charakterisiert werden kann. Anhand der Ergebnisse der F-Statistik ist das Signifikanzniveau kleiner als die Vertrauenswahrscheinlichkeit von 1%. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese vom Test bestätigt wird, mindestens 99% beträgt. Der hergestellte Zusammenhang ist somit statistisch abgesichert und eine eindeutige Beziehung zwischen dem SRT-Wert und den ausgewählten Texturindikatoren hergeleitet.



*Bild 5-30: Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten SRT-Werten ( $N = 55$ ) anhand der Ergebnisse mit Angabe der Standardabweichung (rote Linien)*

Anhand von (Gl. 5-18) ergibt sich, dass die Griffigkeit mit der Welligkeit  $w$  in einem negativen und mit dem  $LPSD_{f=1}$  in einem positiven Zusammenhang steht; d.h. die Griffigkeit steigt mit abnehmender Welligkeit und zunehmendem  $LPSD_{f=1}$ . Bei einem konstanten  $LPSD_{f=1}$ -Wert weist die Oberfläche, die eine geringe Welligkeit hat (also von kleinen Wellenlängen geprägt ist), eine höhere Griffigkeit auf als diejenige, die eine hohe Welligkeit besitzt (also von größeren Wellenlängen geprägt ist). Dieser Aspekt ist in Bild 5-31 illustriert.

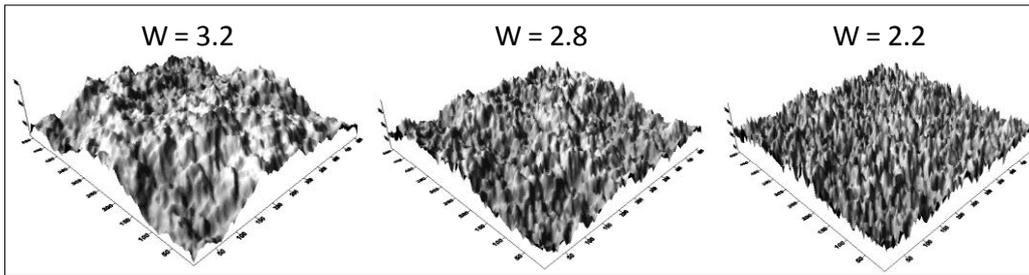


Bild 5-31: Oberflächen mit unterschiedlicher Welligkeit weisen (unter der Annahme konstanter  $LPSD_{f=1}$ -Werte) auch unterschiedliche Griffigkeiten auf:  $SRT_{w=3,2} < SRT_{w=2,8} < SRT_{w=2,2}$  (Kucheryavski, 2005)

Mit  $LPSD_{f=1}$  und  $w$  lässt sich also der SRT-Wert einer Oberfläche, wie in Bild 5-32 dargestellt, berechnen, so dass verschiedene Profile oder Oberflächen hinsichtlich ihrer Rauheit miteinander verglichen werden können.

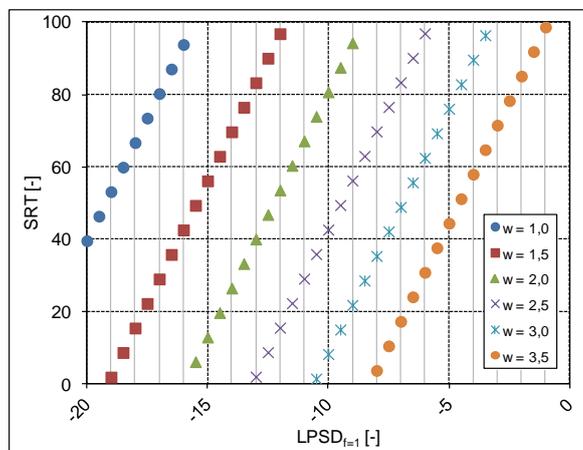


Bild 5-32: SRT-Wert in Abhängigkeit von  $w$  und  $LPSD_{f=1}$

### 5.3.3 Anwendung des Modells

Mit dem entwickelten, empirischen Modell wird es erstmals möglich, den Beitrag der Mikrotextur zur Griffigkeit zu ermitteln. Wie in Bild 5-33 exemplarisch dargestellt, kann ein Oberflächenprofil durch einen Filter (wie z. B. einen idealen Tiefpass) in zwei Bereiche – den Mikro- und Makrotexturbereich – eingeteilt werden. Für die gefilterte Mikrotextur kann die linearisierte spektrale Leistungsdichte berechnet und der entsprechende SRT-Wert anhand von (Gl. 5-18) ermittelt werden. Ein Beispiel für die berechnete und linearisierte Leistungsdichte ist in Bild 5-34 abgebildet.

In diesem Beispiel ergibt sich die Welligkeit zu 3,3923 und der  $LPSD_{f=1}$ -Wert zu -5,1777. Setzt man beide Werte in (Gl. 5-18) ein, ergibt sich ein SRT-Wert von:

$$SRT = 538,975 - 228,112 \cdot w^{0,5} + 13,565 \cdot LPSD_{f=1} = 48,6[-] \quad (\text{Gl. 5-19})$$

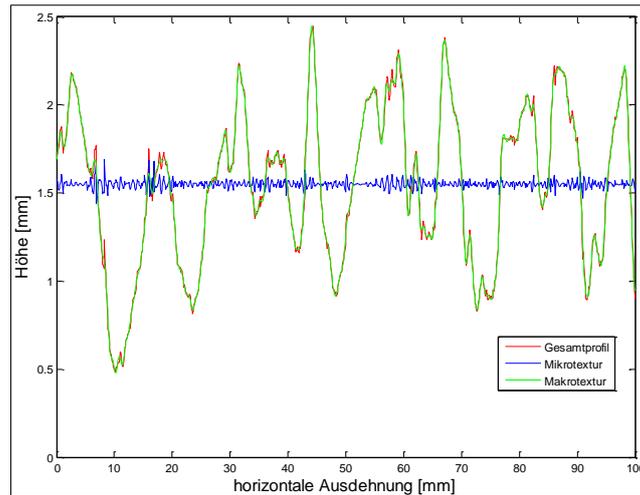


Bild 5-33: Zerlegung eines Profils in Makro- und Mikrotextur (exemplarisch für einen Bohrkern)

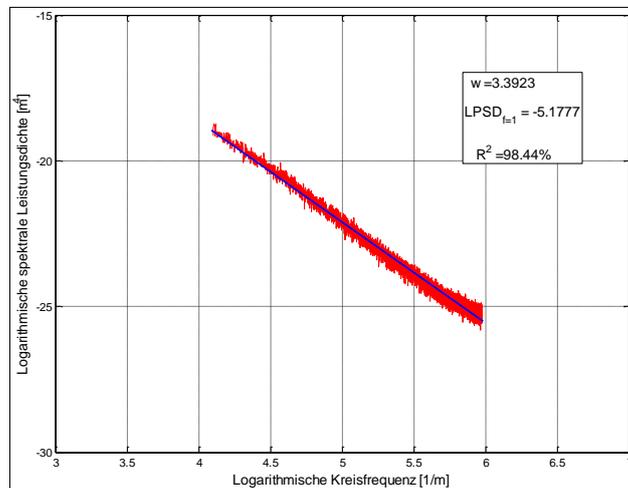


Bild 5-34: Linearisierte Leistungsdichte und abgeleitete Texturindikatoren

### 5.3.4 Ergänzung des Modells durch einen Parameter für Makrotextur

Da die Gleitgeschwindigkeit des SRT-Pendelgeräts nur ca. 10 km/h beträgt, wird primär die Mikrotextur der Oberfläche bewertet und Einflüsse infolge des Drainagevermögens bleiben unberücksichtigt. Um Aussagen bezüglich des Drainagevermögens, respektive der Makrotextur zu erhalten, kommt zusätzlich der Ausflussmesser nach Moore zur Anwendung. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde die Ausflusszeit an Probekörpern realer Oberflächen (s. Kapitel 3.1) gemessen und mit dem Texturparameter „mittlere Makrotexturtiefe“ (s. Bild 2-4) verknüpft. Die Ergebnisse sind in Bild 5-35 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Ausflusszeit mit zunehmender Makrotexturtiefe rapide verringert. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 91,3% kann ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen beiden Kenngrößen hergestellt werden. Damit liegt neben den zwei Mikrotexturparametern auch ein geeigneter Parameter für die Kennzeichnung der Makrotextur vor.

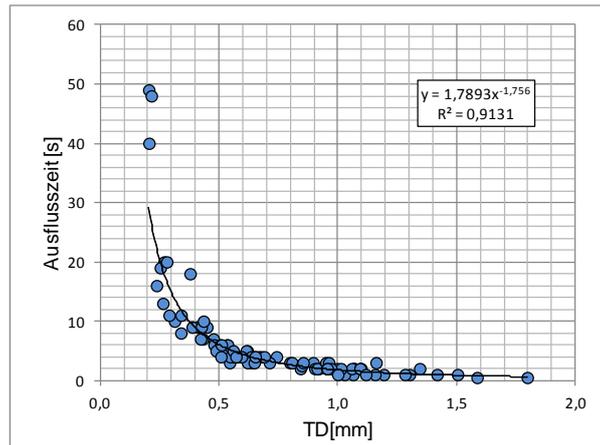


Bild 5-35: Ausflusszeit in Abhängigkeit von der mittlere Makrotexturtiefe der Proben

### 5.3.5 Fazit

Die Hysterese, die den wesentlichen Einflussfaktor auf die Griffigkeit bei Nässe darstellt, ist vor allem von der Topographie der Oberfläche (der Makro- und der Mikrotextur) abhängig. Eine große Makrotextur hilft, das Wasser abzuführen, so dass die Kraftübertragung zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn durch die Mikrotextur aktiviert werden kann.

Um den Einfluss der Mikrotextur auf die Griffigkeit quantitativ darzustellen, wurden Untersuchungen an massiven Steinplatten und Sandpapier vorgenommen. Bei derartigen Probekörpern ist das Drainagevermögen vernachlässigbar klein, so dass der Einfluss der Makrotextur auf die Griffigkeit unberücksichtigt bleiben kann. Die Oberflächen der Probekörper wurden dreidimensional vermessen und die Griffigkeit mit dem SRT-Pendel bestimmt. Zur Beschreibung der topographischen Eigenschaften der Oberflächen wurden verschiedene Texturindikatoren (Welligkeit  $w$  und  $LPSD_{f=1}$ ) aus den Oberflächenprofilen mithilfe der Spektralanalyse abgeleitet und danach mit dem SRT-Wert durch eine nichtlineare multiple Regressionsanalyse verknüpft. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsfunktion liegt bei 0,95 und die mittlere Abweichung zwischen beobachteten und prognostizierten SRT-Werten beträgt  $\pm 4,7$  SRT-Einheiten. Die Wirkung der Mikrotextur auf die Griffigkeit bei Nässe wurde somit ermittelt und geeignete, die Griffigkeit erklärende Mikrotexturkenngößen identifiziert.

Die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche hängt aber nicht nur von der Mikro-, sondern auch von der Makrotextur ab. In der Messpraxis kommt deshalb eine kombinierte Methode zur Anwendung, bei der das SRT-Pendelgerät durch den Ausflussmesser nach Moore ergänzt wird (es sei denn, dass mit dem SRT-Pendelgerät primär nur die Mikrotextur der Oberfläche bewertet und Einflüsse infolge des Drainagevermögens nicht berücksichtigt werden sollen). Um den beiden Mikrotexturindikatoren einen geeigneten Makrotexturindikator zur Seite stellen zu können, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes daher die Ausflusszeit an Probekörpern aus realen Oberflächen (s. Kapitel 3.1) gemessen und nach Texturparametern gesucht, die eine möglichst gute Korrelation zum Ausflussmesser bieten. Mit dem Texturparameter „mittlere Makrotexturtiefe“ (s. Bild 2-4) wurde ein geeigneter Indikator gefunden. Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Ausflusszeit und der mittleren Makrotexturtiefe konnte mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,913 hergestellt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich der SRT-Wert und die Ausflusszeit mit drei Texturparametern (Welligkeit  $w$ ,  $LPSD_{f=1}$  und mittlere Makrotexturtiefe) berechnen lassen, so dass die Griffigkeit der Oberfläche im Rahmen einer kombinierten Messung anhand ihrer Texturdaten beurteilt werden kann.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die hier gewonnenen Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf alle Oberflächen und Messverfahren übertragen werden dürfen. Weiterer Forschungsbedarf liegt vor allem darin, die Mikrotexturindikatoren mit der Griffigkeit bei hoher Geschwindigkeit (wie z. B. bei 60 km/h) zu verknüpfen und den Beitrag verschiedener Texturwellenlängen zur Griffigkeit zu differenzieren.

## **5.4 Künstliche Neuronale Netzwerke (Ansatz 4)**

Künstliche Neuronale Netzwerke stellen ein mächtiges und umfangreiches Instrumentarium für die Datenauswertung dar. Im Vergleich zu klassischen multivariaten Analysemethoden (wie z. B. die Regressionsanalyse), die häufig bei nichtlinearen funktionalen Zusammenhängen zwischen Input- und Outputvariablen versagen, können Künstliche Neuronale Netzwerke ihr Wissen so generalisieren und anpassen, dass Probleme nicht durch explizites Programmieren, sondern durch automatisierte Lernprozesse (anhand von Trainingsbeispielen) gelöst werden können. Sie sind in der Lage, eine beliebige Funktion  $y=f(x)$  auszuführen (Neuronales Netz, 2010) und die Zusammenhänge exakt darzustellen. Die Plausibilität der Ergebnisse hängt nur von der Architektur des Netzwerks und der Datenmenge ab.

Der Einsatz von KNN bietet sich immer an, wenn die Wirkungszusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen nicht unbedingt aufgedeckt werden müssen, sondern die Genauigkeit der Ergebnisse im Vordergrund steht (Backhaus, 2006). Daher eignet sich das KNN insbesondere für Aufgaben, bei denen es primär auf die Ergebnisse und nur sekundär auf die Art und Weise ankommt, wie dieses Ergebnis zustande kommt und erklärt werden soll (Backhaus, 2006).

### **5.4.1 Theoretischer Hintergrund für Künstliche Neuronale Netzwerke**

Der Begriff des Künstlichen Neuronalen Netzwerks wurde erstmals 1943 von dem Neurophysiologen W.S. McCulloch und dem Mathematiker W. Pitts definiert. Künstliche Neuronale Netzwerke fallen in den Bereich der künstlichen Intelligenz und entstanden aus dem Versuch, die grundlegenden Mechanismen des menschlichen Gehirns zu simulieren. Menschen können in Sekundenbruchteilen komplizierte Signale und Bilder oder Tonfolgen erkennen und inhaltlich interpretieren, während mit einem Computer nur solche Probleme lösbar sind, zu denen ein in einer für den Computer verständlichen Sprache formuliertes Programm vorhanden ist.

Analog zu dem informationsverarbeitendem System im Gehirn, das hochgradig parallel und auf Informationen austauschenden Nervenzellen basiert, wird ein künstliches Neuronales Netzwerk auf der Grundlage einer Vielzahl von Neuronen aufgebaut. Die Neuronen können die Informationen in Form der Aktivierung der Zellen aufnehmen, verarbeiten und über gerichtete Verbindungen weiterleiten. Deswegen sind KNN durch eine hohe Parallelität bei der Informationsverarbeitung und eine hohe Fehlertoleranz ausgezeichnet.

Ihre Modellierung ist jedoch recht kompliziert und aufwändig und setzt immer eine hohe Rechenkapazität voraus. Deswegen ist die praktische Anwendung der KNN beschränkt und nicht

in jedem Fall empfehlenswert.

Da sich die KNN an der Grundidee des menschlichen Nervensystems orientiert, wird im Folgenden zunächst ein Einblick in Biologische Neuronale Netzwerke (BNN, oder anders ausgedrückt Natürliche Neuronale Netzwerke NNN) geworfen. Anschließend werden der Aufbau, die grundlegenden Funktionen und Lernregeln genauer beschrieben.

Die Grundlage für ein funktionierendes Nervensystem ist die Erregungsleitung, die durch Milliarden von hoch spezialisierten, sich überall im Körper befindenden Nervenzellen (Neuronen) erfolgt. Die Neuronen sind die Schalter mit einem Informationseingang sowie -ausgang und dafür verantwortlich, Informationen zu empfangen und/oder an andere Zellen innerhalb des Körpers weiterzuleiten.

Ein Neuron, wie im nachfolgenden Bild schematisch dargestellt, besteht aus vier Teilen: Dendriten, Zellkern (Nukleus, oder Nervenzellkörper), Synapsen und Axon. Dendriten sollen die Erregungen von Sinnesrezeptoren oder anderen Zellen empfangen. Der Zellkern integriert und verarbeitet empfangene Informationen von Dendriten. Synapsen bilden die Schnittstellen zwischen Axon und Nervenzelle. Sie können biochemische Reaktionen auslösen, sodass eine Information weitergeleitet (aktiviert) oder gehemmt (deaktiviert) werden kann. Der Schalter wird aktiviert, wenn genug Reize anderer Neuronen am Informationseingang auftreffen. Die aktivierten Informationen werden durch das Axon durch elektrische Impulse an andere Neuronen weitergeleitet. Die Informationsverarbeitung erfolgt also nicht streng sequentiell, sondern parallel (Backhaus, 2006).

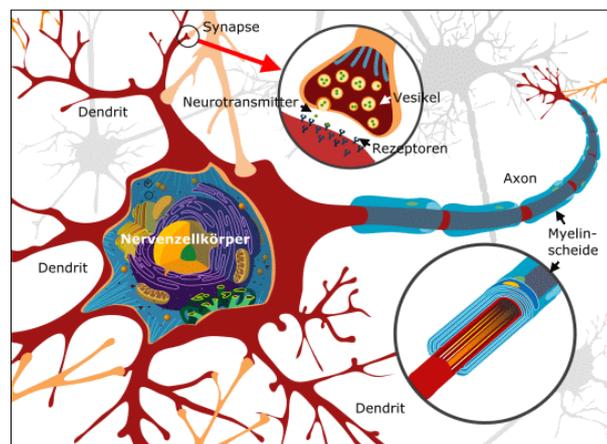


Bild 5-36: Aufbau einer Nervenzelle (Ploner, 2010)

#### 5.4.2 Aufbau eines künstlichen Neurons

Biologische Neuronen empfangen und verarbeiten Aufgaben und geben zum Schluss die Lösung aus. KNN sind von biologischen Neuronen abgeleitet, jedoch stark vereinfacht. Künstliche Neuronale Netzwerke bestehen aus den miteinander verbundenen Neuronen sowie gerichteten, gewichteten Verbindungen zwischen diesen. So verhält sich ein KNN wie ein BNN, bei dem die Informationsverarbeitung als Zusammenspiel vieler Neuronen betrachtet wird.

Analog zur biologischen Nervenzelle hat jedes Neuron drei wichtige Komponenten. Sie sind in Bild 5-37 schematisch dargestellt:

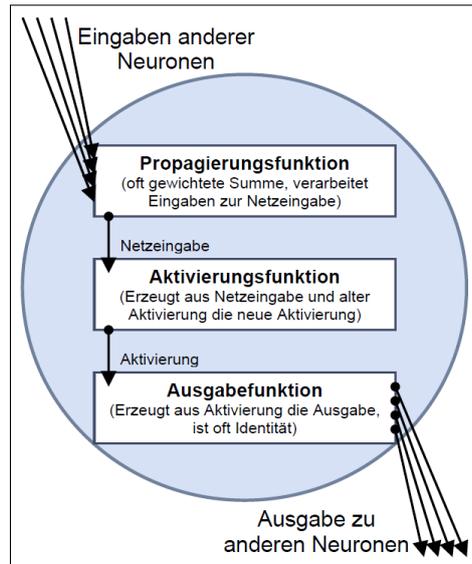


Bild 5-37: Datenverarbeitung eines Neurons (Kriesel, 2010)

Die Propagierungsfunktion dient vor allem dazu, die Eingaben von anderen aktivierten Neuronen zu erhalten und zusammenzufassen. Wenn man ein Neuron  $j$  betrachtet, so findet man meistens eine ganze Menge Neuronen, von denen eine Verbindung zu  $j$  ausgeht, die also Ausgaben an  $j$  weiterleiten. Die Propagierungsfunktion nimmt für ein Neuron  $j$  Ausgaben  $o_{1,j}, \dots, o_{n,j}$  anderer Neuronen  $1, 2, \dots, n$  entgegen (von denen eine Verbindung zu  $j$  existiert) (s. Bild 5-38).

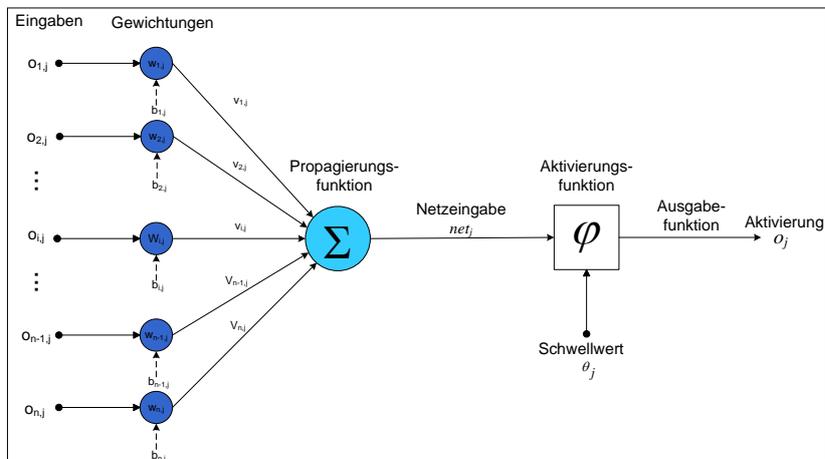


Bild 5-38: Struktur eines Neurons

Die Propagierungsfunktion verarbeitet diese unter Berücksichtigung der Verbindungsgewichte  $w_{1,j}, w_{2,j}$  bis  $w_{n,j}$  und der Bias-Werten der Neuronen  $b_{1,j}, b_{2,j}$  bis  $b_{n,j}$  addiert zur Netzeingabe  $net_j$ , welche als das Ergebnis der Propagierungsfunktion von der Aktivierungsfunktion weiterverwendet werden kann.

$$net_j = \sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^n (w_{i,j} \cdot o_{i,j} + b_{i,j}) \quad (\text{Gl. 5-20})$$

Das Gewicht  $w_{i,j}$  beschreibt die Stärke der Verbindung zwischen zwei Neuronen  $i$  und  $j$ . Je größer der Absolutbetrag des Gewichtes ist, desto größer ist der Einfluss eines Neurons auf ein anderes Neuron. Generell gilt (Kriesel, 2010):

- Ein positives Gewicht bedeutet, dass ein Neuron auf ein anderes Neuron einen exzitatorischen, erregenden Einfluss ausübt.
- Ein negatives Gewicht bedeutet, dass der Einfluss inhibitorisch, hemmend ist.
- Ein Gewicht von Null besagt, dass ein Neuron auf ein anderes Neuron derzeit keinen Einfluss ausübt.

Ergebnis der Addition sind die Signale  $net_j$ . Diese Signale werden durch die Aktivierungsfunktion verarbeitet und zu den Neuronen der nächsten Schicht (Hidden-Layer oder Output-Layer) weitergeleitet. Die Weiterleitung der Signale erfolgt über Synapsen. Die Gleichungen für die Verarbeitung und Normierung der Signale werden im Folgenden abgeleitet.

$$o_j = \varphi(net_j, \theta_j) = \varphi\left(\sum_{i=1}^n (w_{i,j} \cdot o_{i,j} + b_{i,j}), \theta_j\right) \quad (\text{Gl. 5-21})$$

Die Aktivierungsfunktion  $\varphi$ , die abhängig von Schwellenwert und Netzeingabe ist, gibt den Aktivierungszustand an, also wie stark ein Neuron aktiviert ist. Der Aktivierungszustand  $a_j$ , kurz Aktivierung genannt, ist der „Schaltzustand“ eines Neurons und bezeichnet den Grad der Aktivität des Neurons  $j$ . Da nach dem Vorbild der Natur jedes Neuron zu jeder Zeit zu einem bestimmten Grad aktiv ist, werden die Neuronen erst aktiviert, wenn die Netzeingabe ihren Schwellenwert der Aktivierungsfunktion überschreitet. Biologisch gesehen stellt der Schwellenwert die Reizschwelle dar, ab der ein Neuron aktiviert wird (Kriesel, 2010).

Allgemein sollte die Aktivierungsfunktion nichtlinear, differenzierbar und monoton steigend sein (Backhaus, 2006). Werden lineare Aktivierungsfunktionen in versteckten Schichten eingesetzt, können mehrere aufeinanderfolgende lineare Transformationen durch eine einzige lineare Transformation dargestellt werden, so dass die versteckten Schichten ihre Aufgaben verlieren (Backhaus, 2006). Für Aufgaben der Funktionsapproximation hat es sich als sinnvoll erwiesen, als Aktivierungsfunktion aller versteckten Neurone die hyperbolisch-tangenten Funktion (hyperbolic tangent sigmoid transfer function) zu verwenden (s. Bild 5-39 rechts), während eine lineare Aktivierungsfunktion über keinen Schwellenwert in der Ausgabe verfügt (s. Bild 5-39 links).

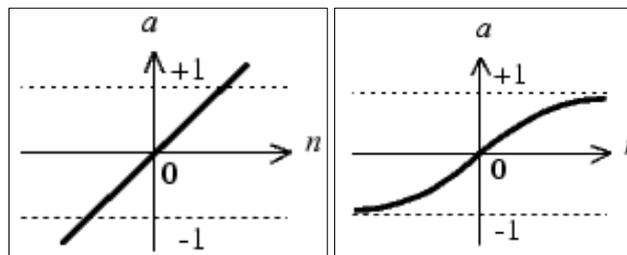


Bild 5-39: Die lineare Aktivierungsfunktion (links) und die hyperbolisch-tangenten Aktivierungsfunktion (rechts) (Mathworks, 2010)

$$o_j = \tanh(net_j) = \frac{e^{\beta(net_j - \theta_j)} - e^{-\beta(net_j - \theta_j)}}{e^{\beta(net_j - \theta_j)} + e^{-\beta(net_j - \theta_j)}} \quad (\text{Gl. 5-22})$$

Die Ausgabefunktion eines Neurons  $j$  berechnet die Werte, die an die anderen Neuronen, zu welchen eine Verbindung von  $j$  besteht, weitergegeben werden.

### 5.4.3 Architektur des Künstlichen Neuronales Netzwerks

Bei einem Künstlichen Neuronales Netzwerk werden die Neuronen in der Regel in mehreren Schichten angeordnet. Die Leistungsfähigkeit Künstlicher Neuronales Netzwerke und die Qualität erzielter Ergebnisse sind im hohen Grad von der Netzwerkarchitektur abhängig.

Bild 5-40 zeigt beispielsweise ein Künstliches Neuronales Netzwerk, welches aus einem Input-Layer mit  $n$  Eingangsneuronen (entsprechend  $n$  Eingangsgrößen oder Einflussgrößen) und einem Output-Layer mit  $m$  Ausgangsneuronen (entsprechend  $m$  Ausgangsgrößen oder Zielgrößen) besteht. Zwischen den Input-Layer und den Output-Layer sind zwei Hidden-Layer geschaltet, die jeweils drei Neuronen enthalten.

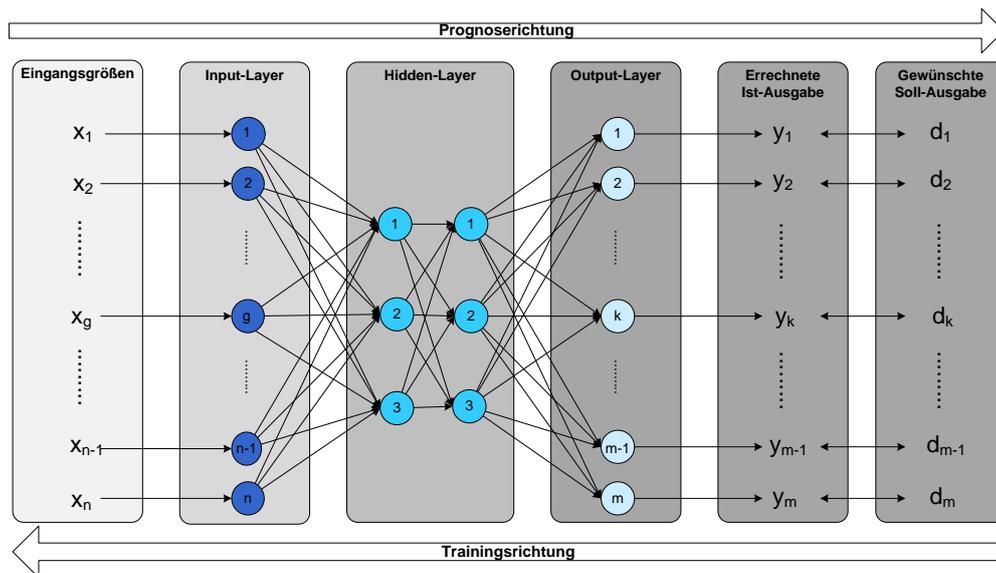


Bild 5-40: Architektur eines Künstlichen Neuronales Netzwerkes

Der Input-Layer verfügt über Eingangsneuronen, die den einzelnen Eingangsgrößen des Netzwerkes entsprechen. Die Anzahl der Neuronen ist möglichst gering zu halten. Die Eingabeschicht ist auf Neuronen zu beschränken, die einen mittels Korrelations- und Regressionsanalyse bereits nachgewiesenen, relevanten Einfluss auf die Netzausgabe haben. Der Output-Layer verfügt über Ausgangsneuronen, die den einzelnen Zielgrößen entsprechen. Die Anzahl der Eingabe- und Ausgabeneuronen ist somit durch die Problemstellung fest definiert.

Die Hidden-Layer (versteckte Schicht) stellen eine Zusammenfassung von wesentlichen Merkmalen von Gegenständen der Außenwelt und Sachverhalten dar. Sie sind erforderlich, wenn das Problem nicht linear separierbar ist. Die Anzahl der versteckten Schichten liegt in der Regel bei 2 oder 3. Da in (Kriesel, 2010) mathematisch bereits bewiesen worden ist, dass mit drei versteckten Neuronenschichten das KNN theoretisch bereits beliebige Funktionen beliebig genau approximieren kann, werden mehr als drei versteckten Schichten nur extrem selten benötigt.

Die Zahl der versteckten Neuronen entspricht grundsätzlich der Zahl der freien Parameter des zu repräsentierenden Problems. Es gibt keine Regelung, wie viele Neuronen zu verwenden sind. Theoretisch soll die Anzahl der Neuronen so gering wie möglich, aber so groß wie nötig sein. Eine zu große Anzahl von Neuronen erhöht den Rechenaufwand des Neuronales Netzes stark und es wird eine größere Anzahl an Trainingsdatensätzen zum Trainieren des Netzes benötigt. Bei Verwendung von mehr Neuronen in den versteckten Schichten kann das KNN jedoch

den Zusammenhang zwischen Eingabe und Ausgabe möglicherweise besser approximieren (Backhaus, 2006). Aber eine möglichst gute Approximation der Trainingsdatensätze bedeutet nicht unbedingt, dass das trainierte KNN auch für neue Datensätze optimal funktioniert. Es besteht vielmehr die Gefahr des „Übertrainierens“, d. h. dass das KNN „die Trainingsmuster einschließlich der darin vorhandenen Fehler auswendig lernt und nicht die Struktur des Problems herausarbeitet“ (Backhaus, 2006). Aus diesem Grund darf die Anzahl der Neuronen in den versteckten Schichten nicht zu hoch gewählt werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist zunächst mit wenigen Neuronen trainiert worden. Anschließend wurden so lange neue Netze mit mehr Neuronen trainiert, wie das Ergebnis (z. B. Bestimmtheitsmaß der Regression) noch signifikant verbessert werden konnte und vor allem die Generalisierungsleistung nicht beeinträchtigt wurde (Bottom-Up-Ansatz). Auf diese Weise wurde die Anzahl der Neuronen für jede versteckte Schicht für den optimalen Trainingserfolg ermittelt.

In nachfolgender Tabelle ist die Architektur vom Künstlichen Neuronalen Netzwerk in Bild 5-40 zusammengestellt.

*Tabelle 5-2: Architektur des aufgebauten Künstlichen Neuronalen Netzwerks in Bild 5-40*

	Nummer	Anzahl der Neuronen	Eingang	Ausgang
Input-Layer	0	n	$x_g (1 \leq g \leq n)$	$o_{0,h} (1 \leq h \leq 3)$
Hidden-Layer I	1	3	$o_{0,h} (1 \leq h \leq 3)$	$o_{1,i} (1 \leq i \leq 3)$
Hidden-Layer II	2	3	$o_{1,i} (1 \leq i \leq 3)$	$o_{2,j} (1 \leq j \leq 3)$
Output-Layer	3	m	$o_{2,j} (1 \leq j \leq 3)$	$y_k (1 \leq k \leq m)$

Der Input-Layer verfügt über n Eingangsneuronen, die die Eingangssignale  $x_1, x_2$  bis  $x_n$  aufnehmen. Die Eingangssignale werden in den Neuronen des Input-Layers verarbeitet, d. h. mit den Wichtungsfaktoren  $w_{1,j}, w_{2,j}$  und  $w_{n,j}$  multipliziert und zu den Bias-Werten der Neuronen  $b_{1,j}, b_{2,j}$  bis  $b_{n,j}$  addiert. Ergebnis der Addition sind die  $net_{1,j}$ , welche durch die Aktivierungsfunktion  $\varphi$  verarbeitet und als Signale  $o_{1,j}$  zu den Neuronen des ersten Hidden-Layers weitergeleitet werden.

$$net_{0,h} = \sum_{g=1}^n (x_g \cdot w_{g,h} + b_{g,h}) \quad (\text{Gl. 5-23})$$

$$o_{0,h} = \varphi(net_{0,h}, \theta_{0,h}) = \varphi\left(\sum_{g=1}^n (x_g \cdot w_{g,h} + b_{g,h}), \theta_{0,h}\right) \quad (\text{Gl. 5-24})$$

Innerhalb der Neuronen des ersten Hidden-Layers erfolgt wiederum eine Verarbeitung der Signale durch die Aktivierungsfunktion.

$$net_{1,i} = \sum_{h=1}^3 (o_{0,h} \cdot w_{h,i} + b_{h,i})$$

$$= \sum_{h=1}^3 \left\{ \left[ \varphi\left(\sum_{g=1}^n (x_g \cdot w_{g,h} + b_{g,h}), \theta_{0,h}\right) \right] \cdot w_{h,i} + b_{h,i} \right\} \quad (\text{Gl. 5-25})$$

$$o_{1,i} = \varphi(net_{1,i}, \theta_{1,i}) \quad (\text{Gl. 5-26})$$

$$= \varphi \left\{ \sum_{h=1}^3 \left[ \varphi \left( \sum_{g=1}^n (x_g \cdot w_{g,h} + b_{g,h}), \theta_{0,h} \right) \cdot w_{h,i} + b_{h,i} \right], \theta_{1,i} \right\}$$

Als Ergebnisse werden die aktivierten  $o_{2,i}$  ausgegeben. Sie werden zu den Neuronen des zweiten Hidden-Layers weitergeleitet.

$$\begin{aligned} \text{net}_{2,j} &= \sum_{i=1}^3 \{ o_{1,i} \cdot w_{i,j} + b_{i,j} \} \\ &= \sum_{i=1}^3 \left\{ \varphi \sum_{h=1}^3 \left[ \varphi \left( \sum_{g=1}^n (x_g \cdot w_{g,h} + b_{g,h}), \theta_{0,h} \right) \cdot w_{h,i} + b_{h,i} \right] \cdot w_{i,j} + b_{i,j} \right\} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 5-27})$$

$$\begin{aligned} o_{2,j} &= \varphi(\text{net}_{2,j}, \theta_{2,j}) \\ &= \varphi \left\{ \sum_{i=1}^3 \left\{ \varphi \sum_{h=1}^3 \left[ \varphi \left( \sum_{g=1}^n (x_g \cdot w_{g,h} + b_{g,h}), \theta_{0,h} \right) \cdot w_{h,i} + b_{h,i} \right] \cdot w_{i,j} + b_{i,j} \right\}, \theta_{2,j} \right\} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 5-28})$$

Auf analoge Weise erfolgt nun auch die Weiterleitung und Verarbeitung der Signale durch die Synapsen und Neuronen des Output-Layers. Das Output-Layer steht am Ende der Signalkette und gibt die Ausgabesignale  $y_k$  aus. Im Gegensatz zu den versteckten Schichten, bei denen als Aktivierungsfunktion der Tangens Hyperbolicus verwendet wird, kommt eine lineare Aktivierungsfunktion in der Ausgabe zur Anwendung (Wellner, 2007).

$$\begin{aligned} y_k &= \varphi \left[ \sum_{j=1}^3 (o_{2,j} \cdot w_{j,k} + b_{k,j}), \theta_k \right] \\ &= \varphi \left\{ \sum_{j=1}^3 \varphi \left\{ \sum_{i=1}^3 \left\{ \varphi \sum_{h=1}^3 \left[ \varphi \left( \sum_{g=1}^n (x_g \cdot w_{g,h} + b_{g,h}), \theta_{0,h} \right) \cdot w_{h,i} + b_{h,i} \right] \cdot w_{i,j} + b_{i,j} \right\}, \theta_{2,j} \right\} \cdot w_{j,k} \right. \\ &\quad \left. + b_{k,j}, \theta_k \right\} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 5-29})$$

Die Signalkette gibt den funktionalen Zusammenhang zwischen den Eingangssignalen und den Ausgabesignalen an. Sie ist von den Wichtefaktoren und den Bias-Werten abhängig. Zur Berechnung der Bias-Werte und Wichtefaktoren wird ein Optimierungsverfahren eingesetzt.

#### 5.4.4 Training des Künstlichen Neuronalen Netzwerks (Lernprozess)

Künstliche neuronale Netze ahmen die Eigenart des Gehirns nach, sich durch Lernvorgänge (oder anders ausgedrückt Training) selbst zu organisieren. Durch diese Lernvorgänge sind die KNN in der Lage, sich nach einer vorgegebenen Lernregel zu verändern und für eine vorgegebene Eingabe (Eingangssignale) eine gewünschte Ausgabe zu produzieren.

Lernregeln geben dabei die Art und Weise an, wie das neuronale Netz diese Veränderungen vornimmt. Prinzipiell kann die Lernregel bestehen aus (Kriesel, 2010):

- Entwicklung neuer Verbindungen,
- Löschen existierender Verbindungen,
- Modifikation der Gewichte,
- Modifikation des Schwellenwertes,
- Modifikation der Aktivierungs- bzw. Ausgabefunktion,
- Entwicklung neuer Zellen und
- Löschen bestehender Zellen.

Von diesen Möglichkeiten wird das Lernen durch Veränderung der Gewichte am häufigsten verwendet, weil der aktuelle Wissensstand durch die Stärke der Verbindung zwischen den einzelnen Neuronen (d. h. durch die Gewichte) gespeichert ist (Backhaus, 2006). Neue Zellen zu entwickeln bzw. wenig genutzte zu löschen, wird meist erst eingesetzt, wenn trotz erfolgter Optimierung der Gewichte im KNN die Ergebnisse noch immer nicht zufriedenstellend sind (Backhaus, 2006).

Kern des Lernens von KNN ist somit die Modifikation der Verbindungsgewichte zwischen den Neuronen im Netz. Die Lernregeln lassen sich in folgende Kategorien einteilen:

- Überwachtes Lernen (supervised learning) und
- unüberwachtes Lernen (unsupervised learning).

In den meisten Fällen wird überwachtes Lernen bevorzugt, da hier eine bessere Kontrolle über den Lernvorgang ermöglicht wird. Beim überwachten Lernen wird die Differenz der tatsächlichen zur korrekten (erwünschten) Ausgabe durch einen externen Lehrer berechnet und angegeben. Anhand dieser Differenz wird dann das Netz über die Lernregel modifiziert, bis diese Differenz durch Training einen akzeptablen Wert erreicht. Beim unüberwachten Lernen gibt es keinen externen Lehrer. Das Netz versucht ohne Beeinflussung von außen die präsentierten Daten in Ähnlichkeitsklassen aufzuteilen. Es wird dem Netz selbst überlassen, eine Ordnung zu finden.

Für ein mehrschichtiges Netzwerk mit versteckten Schichten wird in der Regel die Back-Propagation-Regel (Abkürzung: BP, auch Backpropagation of Error oder Fehlerrückführung oder auch Rückpropagierung genannt) angewendet, welche beim überwachten Lernen am häufigsten zum Einsatz kommt. Beim Lernprozess von neuronalen Netzen unterscheidet man typischerweise zwischen einer Trainingsphase und einer Testphase. In der Trainingsphase lernt das neuronale Netz anhand der vorgegebenen Lernregeln, während in der Testphase auf Grundlage der Trainingsphase überprüft wird, ob das Netz über das Lernen in der Lage ist, Aufgaben zu lösen.

Dazu wird die Differenz zwischen Ausgabesignalen des Netzes und gewünschten Ausgaben berechnet und durch eine Fehlerfunktion beschrieben. Die Fehlerfunktion wird durch den quad-

ratischen Fehler definiert (Kriesel, 2010):

$$\text{Ziel: } \min E = \sum_{k=1}^n \frac{1}{2} \cdot (d_k - y_k)^2 \quad (\text{Gl. 5-30})$$

mit:

E: der Fehler

$d_k$ : die gewünschte Soll-Ausgabe (oder Zielwert, Target genannt)

$y_k$ : die errechnete Ist-Ausgabe (oder Ausgabesignale, Output genannt)

n: die Anzahl der Ausgabesignale (= Anzahl der Zielwerte)

Der Backpropagation-Algorithmus läuft in folgenden Phasen (Bourg, 2006), (Gorski, 2010), (Kriesel, 2010), (Wellner, 2007):

1. Initialisieren der Bias-Werte  $b$  und Wichtefaktoren  $w$  auf zufällige Werte.
2. Trainingsmuster wählen (d. h. die Lernrate und die Trainingsrunde vorsehen).
3. Vorwärtsschritt durchführen (den Output des Künstlichen Neuronalen Netzes berechnen). Dabei die Bias-Werte und Wichtefaktoren der einzelnen Neuronen abspeichern.
4. Für die Eingangssignale sind die Ausgabesignale zu berechnen und den gewünschten Ausgaben gegenüber zu stellen. Der Fehler  $E$  wird mit der Fehlerquadratmethode bestimmt.
5. Der Fehler wird dann im Backpropagation-Schritt wieder über die Ausgabe- zur Eingabeschicht zurück auf die Gewichte der einzelnen Schichten aufgeteilt.
6. Die Gewichte werden dabei so modifiziert, dass sich der Fehler möglichst schnell reduziert. Dabei werden die Gewichtungen der Neuronenverbindungen abhängig von ihrem Einfluss auf den Fehler geändert, um bei den erneuten Gewichtungen eine Annäherung an die gewünschte Ausgabe zu erreichen.
7. Die Gewichtsänderung erfolgt in der Regel schrittweise, d.h. zunächst werden die Werte der Ausgabeschicht verbessert, danach die Werte der zweiten versteckten Schicht, dann die der ersten versteckten Schicht usw. Zur schrittweisen Verbesserung wird das Gradientenabstiegsverfahren angewandt.
8. Das Einlernen wird wiederholt und erst abgeschlossen, wenn die vorgesehene Anzahl der Trainingsrunden oder die gewünschte Ausgabe (i. A dargestellt durch die Bestimmtheitsmaße) erreicht wird. I.d.R. sind bis zu 10.000 Trainingsrunden zu absolvieren um eine gute Übereinstimmung zwischen Trainingsdaten und Ergebnissignalen zu erzielen.

Für das Training eines Künstlichen Neuronalen Netzwerks spielt die Auswahl der Lernrate eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich ist festzustellen, dass eine höhere Lernrate einen kürzeren Lernvorgang zur Folge hat, da die Gewichte des Netzes in größeren Schritten angepasst wer-

den. Mit einer höheren Lernrate können sich aber auch Nachteile ergeben, da gute globale Minima (der kleinste Fehler) häufiger übersprungen werden (s. Bild 5-41). Eine niedrigere Lernrate bedeutet kleinere Schritte beim Gradientenabstiegsverfahren und führt dazu, dass gute globale Minima nicht so leicht übersprungen werden können. Den Vorteilen steht jedoch auch die große Trainingszeit bis zum Erreichen eines Minimums gegenüber. Es gibt derzeit keine optimale Lernrate für alle Arten Künstlicher Neuronaler Netzwerke. Eine mögliche Strategie ist die schrittweise Verringerung einer anfangs hohen Lernrate im Laufe des Verfahrens.

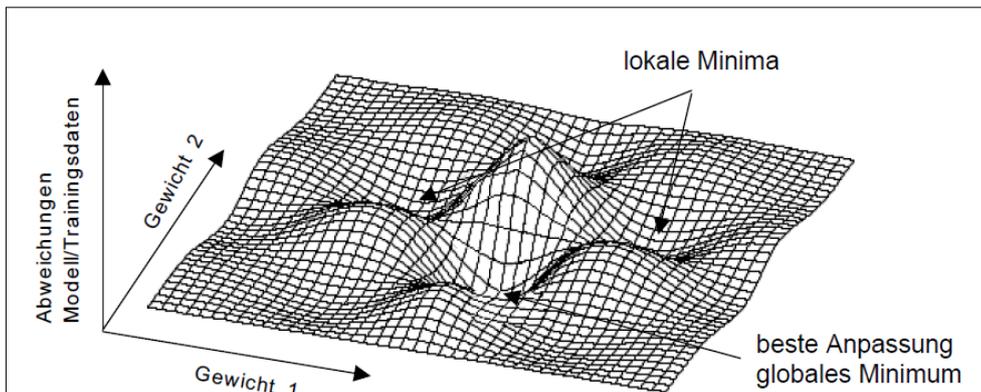


Bild 5-41: lokale und globale Minima (Neuronales Netz, 2010)

Das Backpropagation-Verfahren basiert auf einem Gradientenabstieg und beinhaltet eine Reihe von Problemen. Beispielsweise kann mit diesem Verfahren nicht das globale, sondern nur das lokale Minima erreicht werden. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit Backpropagation mit einem variablen Momentum angewandt. Durch dieses Momentum werden Probleme der Backpropagation-Regel in den lokalen Minima vermieden. Da zum Beispiel in flachen Plateaus der Gradient der Fehlerfunktion sehr klein wird, käme es ohne Trägheitsterm unmittelbar zu einem "Abbremsen" des Gradientenabstiegs. Dieses "Abbremsen" wird durch die Addition des Trägheitsterms verzögert, so dass ein flaches Plateau schneller überwunden werden kann.

## 6 Anwendung der mathematischen Verfahren

Die in Kapitel 5 beschriebenen Rechenverfahren werden an einer breiten Datenbasis geprüft. Dazu gehörten einerseits Bohrproben aus Aachen und seiner näheren Umgebung und andererseits Proben, die im Labor des Instituts selbst hergestellt wurden (s. Kapitel 3.1). Hierbei wurde darauf geachtet, dass es sich um repräsentative, praxisnahe Fahrbahnoberflächen handelt, die das gesamte, in der Realität angetroffene, Griffigkeitsspektrum widerspiegeln.

### 6.1 Anwendung des Texturparametermodells auf Asphaltoberflächen

Das in Kapitel 5.1 beschriebene Texturparametermodell wurde auf der Basis von Mosaik-Probekörpern erstellt und validiert. Eine Anwendung auf Asphaltoberflächen erfolgte bisher nur in begrenztem Umfang. Die bisherige Anwendung zeigte insbesondere für Oberflächen mit einer mittleren bis ausgeprägten Makrotextur sehr gute Ergebnisse (Schulze, 2011).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird das Modell innerhalb dieses Projektteils an einer breiten Datenbasis geprüft. Die Datenbasis umfasst insgesamt 70 Datensätze. Es sind alle gängigen Walzasphalte in verschiedenen Verschleißzuständen sowie Betonoberflächen im Probekörperkollektiv enthalten. Dabei wird die gesamte Bandbreite der Makro- und Mikrotextur abgedeckt.

Die Probekörper wurden hochauflösenden Texturmessungen sowie Reibwertmessungen im Prüfstand nach Wehner/Schulze unterzogen (s. Kapitel 3.3.2). Die beobachtete Reibwertspanne erstreckt sich von ca. 0,15 bis 0,7  $\mu_{WS, 60}$ -Einheiten und deckt damit den gesamten relevanten Reibwertbereich ab.

Besondere Aufmerksamkeit ist der Qualität der Texturdaten zu schenken. Bei ungünstigen Reflektionseigenschaften wurden zum Teil über 50% ungültige Messwerte festgestellt.

Entsprechend der Anzahl der ungültigen Messwerte wird das Probekörperkollektiv in 2 Serien unterteilt:

- Serie 1 enthält Probekörper mit einem Anteil an ungültigen Messwerten von unter 30%.
- Serie 2 beinhaltet Probekörper mit einem Anteil zwischen 30 und 40% ungültiger Messwerte.

Probekörper mit mehr als 40% ungültige Messwerte wurden nicht berücksichtigt

Die mit dem Messverfahren „ViaFriction“ ermittelten Daten können mit dem Texturparametermodell nicht ausgewertet werden. Die dem Texturparametermodell hinterlegte Regressionsfunktion ist auf das Messverfahren nach Wehner/Schulze abgestimmt. Zur Implementierung des „ViaFriction“-Messverfahrens ist die Regressionsfunktion neu zu berechnen. Die Anzahl der verfügbaren Datensätze mit einer ausreichenden Texturdatenqualität ist dafür jedoch nicht ausreichend.

#### 6.1.1 Ergebnisse

Für die Serie 1 mit insgesamt 51 Datensätzen (Reibwertspektrum von 0,15 bis 0,67  $\mu_{WS, 60}$ -Einheiten) wurde der Reibwert mit Hilfe des Parametermodells aus der Textur be-

rechnet und den gemessenen Reibwerten gegenübergestellt (s. Bild 6-1). Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  beträgt 0,9. Die mittlere Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Reibwerten beträgt 0,056  $\mu_{WS, 60}$ -Einheiten.

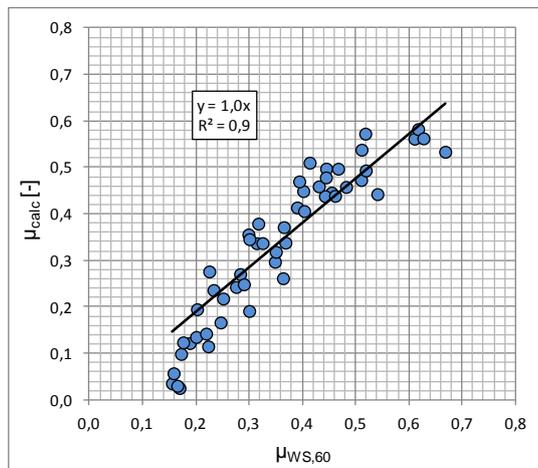


Bild 6-1: Aus der Textur berechneter Reibwert über gemessenen Reibwert (Probekörperserie 1)

Für die Serie 2 mit insgesamt 19 Probekörpern und einem Reibwertspektrum von 0,23 bis 0,50  $\mu_{WS, 60}$ -Einheiten wird eine mittlere Abweichung von 0,063  $\mu_{WS, 60}$ -Einheiten erreicht. In dem folgenden Bild 6-2 ist der aus der Textur berechnete Reibwert über dem gemessenen Reibwert für beide Probekörperserien aufgetragen.

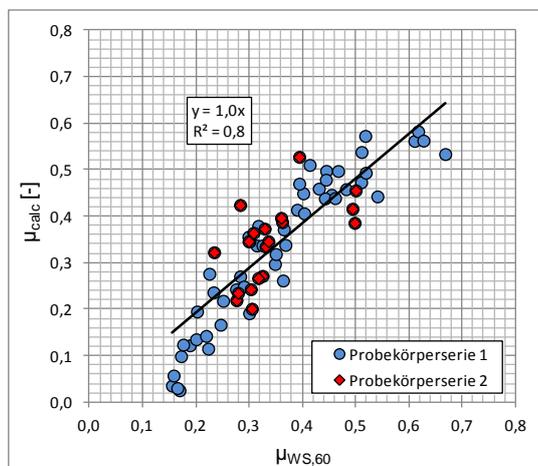


Bild 6-2: Aus der Textur berechneter Reibwert über gemessenen Reibwert (Probekörperserie 1 und 2)

Die Zunahme der Anzahl der ungültigen Messwerte ist mit einer Zunahme der Abweichungen zwischen berechnetem und gemessenem Reibwert verbunden. Das Texturparametermodell beinhaltet eine sehr detaillierte Analyse der Mikrotextur anhand verschiedener Texturdeskriptoren. Es ist leicht nachzuvollziehen, dass bei einem Anteil von 30 - 40% ungültiger Messwerte eine Bewertung der Mikrotextur - insbesondere für Wellenlängen kleiner als 20  $\mu\text{m}$  - nur eingeschränkt möglich ist. Folglich können bei einem hohen Anteil ungültiger Messwerte die Texturdeskriptoren *Asperity Shape* und *Micro Roughness* nicht exakt berechnet werden, was sich negativ auf die Präzision des Modells auswirkt.

Aufbauend auf der Arbeit von Schulze (2011) und den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes ist eine Charakterisierung der Mikrotextrur bis zu einem Anteil von 30% ungültiger Messwerte möglich. Texturprofile mit mehr als 30 % ungültigen Messwerten werden nicht weiter berücksichtigt.

Weiterhin ist zu bedenken, dass das Texturparametermodell auf der Basis von Mosaik-Probekörpern entwickelt wurde. Bei einer Adaption auf Asphalt- und Betonoberflächen wird eine Steigerung der Präzision erwartet. Dafür müssen in weiterführenden Arbeiten Asphalt- und Betonprobekörper definierten Polierbeanspruchungen mit begleitenden Texturmessungen unterzogen und die Rechenalgorithmen der Texturdeskriptoren entsprechend angepasst werden.

### **6.1.2 Fazit**

Das Texturparametermodell leistet einen wesentlichen Beitrag zur Berührungslosen Griffigkeitsmessung. Es ermöglicht die Berechnung des Reibwertes aus der Textur von Asphalt- und Betonoberflächen, hier mit einer mittleren Abweichung von  $0,056 \mu_{WS, 60}$ -Einheiten. Die dem Modell hinterlegten Rechenalgorithmen sind so gestaltet, dass der Reibwert in nahezu Echtzeit aus der Textur berechnet werden kann. Für eine Steigerung der Präzision ist das an Mosaik-Probekörpern entwickelte Modell auf Asphalt- und Betonoberflächen zu adaptieren.

Neben der Berechnung des Reibwertes aus der Textur werden die qualitativen Kenngrößen „Kanten-“ und „Flächenschärfe“ erstmals quantifiziert. Der Beitrag der einzelnen Größen am Reibwert kann bestimmt werden. Gleichzeitig ist mit dem Modell eine exakte Analyse des Poliervorganges möglich. Es können die Rauheitselemente identifiziert werden, die infolge einer Polierbeanspruchung abgebaut werden oder neu entstehen. Unter Einbeziehung der Mineralogie kann somit das Polierverhalten von Mineralstoffen und die Entwicklung der Griffigkeit von Straßen zusätzlich detailliert analysiert werden.

## **6.2 Anwendung des Gummireibungsmodells (Ansatz 2)**

Als Anwendungsfälle für das Gummireibungsmodell wurden zwei Messgeräte rechnerisch parametrisiert:

- Das Reibmessverfahren nach Wehner/Schulze (Labormessverfahren) und
- das Straßenmessverfahren „ViaFriction“ der Firma ViaTech aus Norwegen

Das erste Messverfahren repräsentiert quasi den Bremsmodus „Blockierbremsung“ (100% Bremsschlupf), während das zweite den Modus „ABS-Bremsung“ darstellt, bei dem der Reifen unter kontrollierten Schlupfbedingungen im Bereich seines Reibwertmaximums abgebremst wird (s. auch Kapitel 3.3 und 3.4). Über die Ergebnisse wird im Folgenden berichtet.

### **6.2.1 Berücksichtigung des Wasserfilms**

Bei der Anwendung des Gummireibungsmodells wird der Wasserfilm indirekt berücksichtigt. Dies erfolgt durch folgende Voraussetzungen bzw. Annahmen:

- Die Adhäsionsreibung kann gegenüber der Hysteresereibung vernachlässigt werden,
- eine ausreichende Drainage ist stets gewährleistet, sodass viskose Einflüsse auf die Reibung vernachlässigt werden können,

- Kontakt findet nur auf den Texturspitzen statt (i.d.R. im oberen Drittel der Textur), wo der Wasserfilm durchbrochen werden kann,
- durch den kühlenden Einfluss des Wassers treten z.T. deutlich niedrigere Temperaturen im Gummi auf als bei trockener Reibung,
- das Zwischenmedium Wasser stellt eine Begrenzung für das Anregungsspektrum des Gummis zu hohen Frequenzen hin dar: es gibt feine Kavitäten auf den Gesteinskuppen, aus denen das Wasser aufgrund der kurzen Kontaktzeiten nicht mehr abgeführt werden kann.

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse dargestellt.

### **6.2.2 Rechnerische Nachbildung des Griffigkeitsmessverfahrens nach Wehner/Schulze**

Im Verlaufe des Forschungsprojektes wurden sehr viele Oberflächenproben für die Versuche mit dem Griffigkeitsmessverfahren nach Wehner/Schulze beschafft. Dazu gehörten einerseits Bohrproben (Asphalt) aus Aachen und seiner näheren Umgebung und andererseits Proben, die im Labor des Instituts selbst hergestellt wurden. Letztere wurden sowohl aus Asphalt als auch aus Beton angefertigt. Von dem Gesamtumfang blieben schließlich 70 Proben übrig, die eine ausreichend genaue optische Oberflächenerfassung zuließen. Eignungskriterium war, dass die optisch abgetastete Oberfläche nicht mehr als 40% ungültige Werte aufweisen durfte. Mittels eines Rechenprogrammes wurden die vermessenen Oberflächen geprüft und die ungültigen Werte anschließend über geeignete Interpolationsverfahren ersetzt. Eine Fehlerrate von 40% erwies sich dabei als eine Grenze, bei der die Oberfläche für die Verwendung im Gummireibungsmodell noch geeignet war. Die 70 Proben verteilten sich auf insgesamt 33 „typische“ Oberflächen, die durch Ort der Probennahme bzw. Herstellungsrezeptur und –verfahren vorgegeben waren. Im Durchschnitt war jede Oberfläche also zweifach belegt; die Belegung schwankte im Einzelfall aber zwischen 1 und 4, in dem einen Fall, weil nicht jede Probe die optische Eignung erfüllte, und in dem anderen, weil zu einer Probennahme mehr als 2 Proben vorlagen. Bei den Oberflächen wurde darauf geachtet, dass es sich um repräsentative, praxisnahe Fahrbahnoberflächen handelt, die das gesamte, in der Realität angetroffene, Griffigkeitspektrum widerspiegeln.

In Tabelle 6-1 findet sich eine Übersicht über Herkunft und Untersuchungsergebnisse der untersuchten Oberflächen.

Das Wehner/Schulze-Messverfahren ist in Kapitel 3.3.2 dargestellt. Seine drei auf einer Kreisbahn angeordneten Gummikörper stellen gewissermaßen die Profilstollen eines Fahrzeugreifens dar. Sie werden zunächst auf eine Geschwindigkeit von 100 km/h beschleunigt und dann auf die Prüf- bzw. Straßenoberfläche abgesenkt. Die Abbremsung von 100 km/h bis zum Stillstand erfolgt unter kontinuierlicher Wasserzufuhr. Der Kontaktdruck zwischen Gummi und Probenoberfläche beträgt  $0,2 \text{ N/mm}^2$ . Das entspricht dem typischen Kontaktdruck von Fahrzeugreifen. Ausgegeben wird der Reibwert in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit während der Bremsung. Der Reibwert bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h wird als charakteristischer Reibwert der Prüfoberfläche nach Wehner-Schulze, hier als  $\mu_{WS,60}$  bezeichnet. Die gemessenen und gerechneten Reibwerte können Tabelle 6-1 entnommen werden. Sie sind ebenfalls in Bild

6-3 dargestellt, in dem der berechnete über dem jeweiligen gemessenen Reibwert aufgetragen ist. In Ermangelung der genauen Materialdaten des Wehner-Schulze-Prüfgummis wurde die Berechnung mit den Daten einer aktuellen Laufflächenmischung eines Pkw-Reifens durchgeführt. Sie wurden uns freundlicherweise von einem bekannten Reifenhersteller zur Verfügung gestellt.

*Tabelle 6-1: Übersicht und Ergebnisse für die untersuchten Oberflächen*

Nr.	Probe/Oberfläche	$\mu_{WS,60}$ gemessen	$\mu_{WS,60}$ gerechnet	Belegung	Herkunft
1	BG001/006	0,43	0,42	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 0
2	BG001/006	0,62	0,61	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 1
3	BG001/006	0,42	0,44	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 2
4	BG001/006	0,43	0,41	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 3
5	BG002/005	0,45	0,44	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 0
6	BG002/005	0,64	0,64	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 1
7	BG002/005	0,47	0,47	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 2
8	BG002/005	0,45	0,48	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 3
9	BG003/004	0,36	0,31	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 0
10	BG003/004	0,53	0,52	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 1
11	BG003/004	0,32	0,34	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 2
12	BG003/004	0,37	0,38	2	Waschbeton (Labor), gl. Morphologie, Pol.stufe 3
13	BG024(0,2,3)/075	0,24	0,25	4	Aachen, Goethestraße 13
14	BG025/071	0,20	0,22	2	Aachen, Boxgraben 22 (Polierstufe 0)
15	BG025/071	0,18	0,17	2	Aachen, Boxgraben 22 (Polierstufe 2)
16	BG025/071	0,19	0,20	2	Aachen, Boxgraben 22 (Polierstufe 3)
17	BG026(0,2,3)/076	0,17	0,20	4	Aachen, Lütticher Straße 21 (versch. Pol.stufen)
18	BG027	0,30	0,28	1	Aachen, Wallstraße 57
19	BG028/078	0,30	0,29	2	Aachen, Lütticher Straße 56, li.+re.FS
20	BG029(0,2,3)/070	0,24	0,23	4	Aachen, Lütticher Straße 56, li. FS (versch. Polierst)
21	BG073	0,28	0,28	1	Aachen, Boxgraben 32
22	BG077	0,28	0,28	1	Aachen, Lütticher Straße 21, Radweg
23	BG098/100/103	0,33	0,35	3	Aachen, Rüd. Ring, in der Rollspur (inhom. Oberfl.)
24	BG099/101/102	0,50	0,55	3	Aachen, Rüd. Ring, Nebenflächen (inhom. Oberfl.)
25	BG120	0,36	0,38	1	Aachen, Madrider Ring
26	BG129/130	0,30	0,27	2	Eschweiler (36+37), li. + re. FS
27	BG138	0,28	0,26	1	Aachen, Parkplatz Prinzenhofstraße (1), grober Belag
28	BG139/143	0,31	0,29	2	Aachen, Parkplatz Prinzenhofstraße (2), feiner Belag
29	BG140/144	0,32	0,30	2	Aachen, Parkplatz Prinzenhofstraße (3), feiner Belag
30	BG141/142	0,36	0,35	2	Aachen, Parkplatz Prinzenhofstraße (4), feiner Belag
31	BG145/146	0,33	0,34	2	Aachen, Parkplatz Prinzenhofstraße (5), feiner Belag
32	BG147	0,35	0,33	1	Aachen, Schleidener Straße
33	BG204(0,1)/205/209	0,46	0,47	4	Waschbeton (Labor), gleiche Morphologie

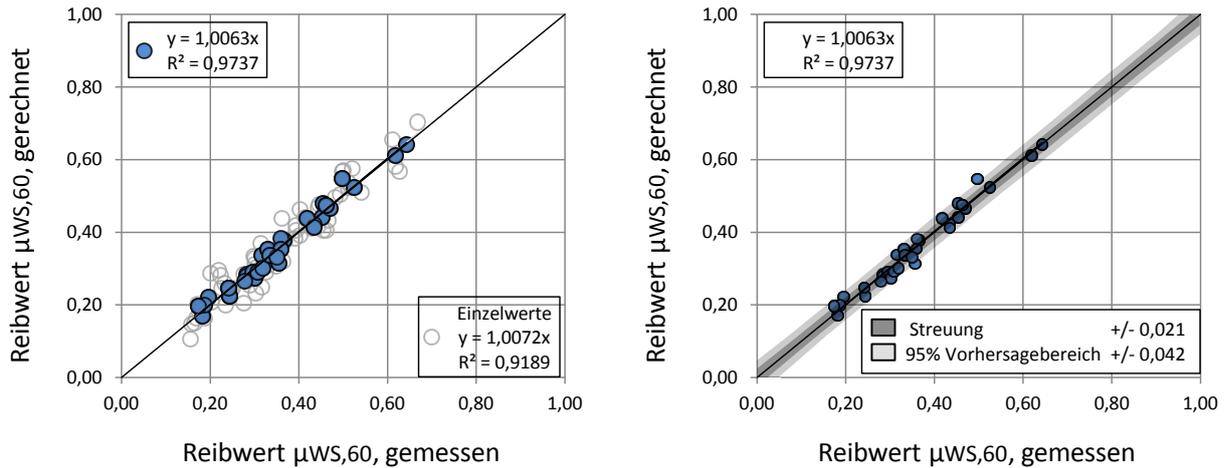


Bild 6-3: Korrelation zwischen gemessenem und gerechnetem Reibwert (Wehner/Schulze); rechts: dazugehörige Vertrauensbänder

Wie man erkennen kann, ist die Übereinstimmung zwischen gemessenen und gerechneten Reibwerten sehr groß. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei  $R^2 = 0,97$ . In der rechten Hälfte sind die dazugehörigen Konfidenzbänder dargestellt: in dunkelgrau die mittlere Abweichung und in hellgrau der 95%-Konfidenzbereich. Die Untersuchung ergibt, dass 95% aller gerechneten Werte sich in einem Bereich von  $\pm 0,04$  um den Erwartungswert (Wehner/Schulze) befinden. Die mittlere Abweichung (Streuung) liegt bei 0,02. Damit kann nachgewiesen werden, dass sich der Reibwert mit einer hohen Genauigkeit aus der Textur berechnen lässt. In Tabelle 6-2 sind nochmal die maßgebenden physikalischen Einflussgrößen für das Gummireibungsmodell (Wehner/Schulze) zusammengestellt.

Tabelle 6-2: Einflussgrößen für das Gummireibungsmodell (Wehner/Schulze)

Kontakt- druck	Gleitge- schwindigkeit	Wellenlängenbereich		Mittl. Temperatur des Gummis im unmittelbaren Kontaktbereich
		gesamt	maßgebend	
0,2 N/mm <sup>2</sup>	60 km/h	20µm bis 50 mm	60µm bis 1 mm	55 bis 60 °C

### 6.2.3 Rechnerische Nachbildung des ViaFriction-Messverfahrens

Um auch die Griffigkeit unter ABS-ähnlichen Bedingungen rechnerisch bestimmen zu können, wurde der Vergleich mit dem Straßenmessverfahren „ViaFriction“ des norwegischen Herstellers ViaTech herangezogen. Das Messverfahren ist in Kapitel 3.4 und näher im Anhang beschrieben. Es besteht im Wesentlichen aus einem Einradanhänger, dessen Rad nach dem Wirbelstromprinzip gezielt abgebremst werden kann. Dabei wird der Reibwert zwischen Rad und Straßenoberfläche aufgezeichnet. Die Messung erfolgt unter kontinuierlicher Wasserzufuhr auf angefeuchteter Straße. Das Gerät kann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Schlupfeinstellungen betrieben werden. Standard ist 60 km/h bei 20% Bremsschlupf. Der Reifen hat die Dimensionen eines Scooterreifens. Der Kontaktdruck zwischen Reifen und Fahrbahn liegt bei 0,2 N/mm<sup>2</sup>.

Leider haben wir von der Straßenbauverwaltung nur für 5 Streckenabschnitte die Erlaubnis bekommen, Bohrkerne zu ziehen. Für die optische Texturvermessung waren wir auf diese Bohr-

kernentnahmen angewiesen, weil unser Texturmessgerät ein reines Labormessverfahren und nicht mobil einsetzbar ist. Das heißt, für die rechnerische Nachbildung des ViaFriction-Messverfahrens standen nur 5 verschiedene Oberflächen mit jeweils 2 Bohrkernen, also insgesamt 10 Bohrkern, zur Verfügung. Trotz dieser Einschränkungen, konnten jedoch sehr gute Übereinstimmungen zwischen gemessenen und gerechneten ViaFriction-Reibwerten erzielt werden. Tabelle 6-3 und Bild 6-4 geben eine Übersicht über Herkunft und Untersuchungsergebnisse der untersuchten Oberflächen. Die Ergebnisse gelten für eine Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h und einen Bremsschlupf von 20%.

Tabelle 6-3: Übersicht und Ergebnisse für die untersuchten Oberflächen

Nr.	Oberfläche	$\mu_{VF60-20}$ gemessen	$\mu_{VF60-20}$ gerechnet	Belegung	Herkunft
1	BG301/302	0,71	0,73	2	SMA 0/8; B56 FR Puffendorf; Station 1+200 li., Abschn. 15.2
2	BG303/304	0,65	0,66	2	SMA 0/8; B56 FR Aldenhoven; Station 1+200 re., Abschn. 15.2
3	BG305/306	0,78	0,78	2	SMA 0/11; B55 FR Elsdorf; Station 2+400 rechts, Abschn. 5
4	BG307/308	0,68	0,68	2	AC 0/11; L366 FR Hompesch; Station 0+600 re., Abschn. 1
5	BG309/310	0,68	0,66	2	AC 0/11; L366 FR A44; Station 0+600 links, Abschnitt 1

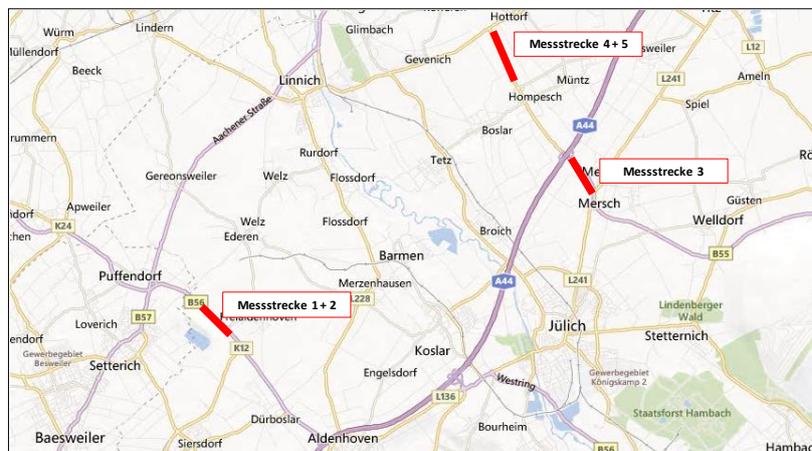
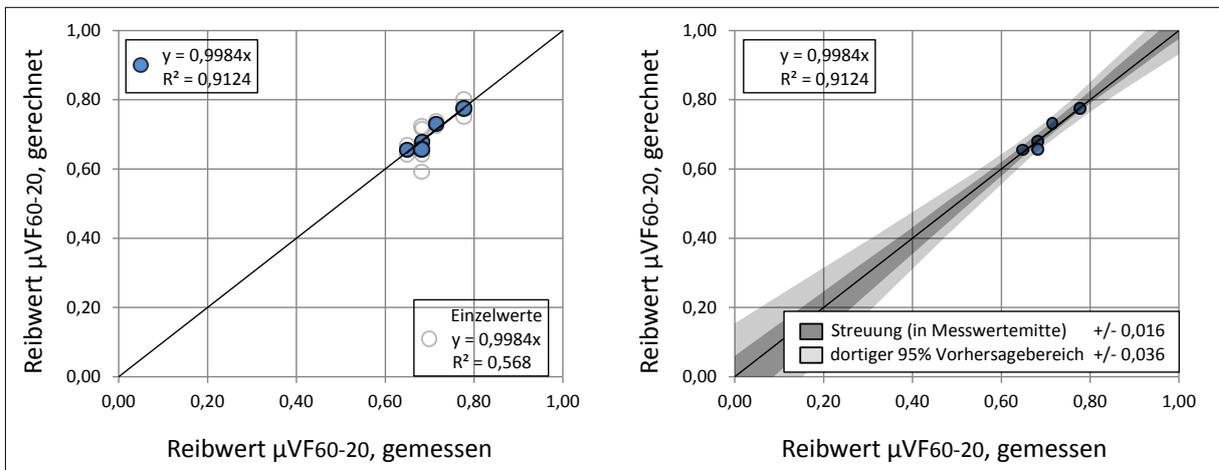


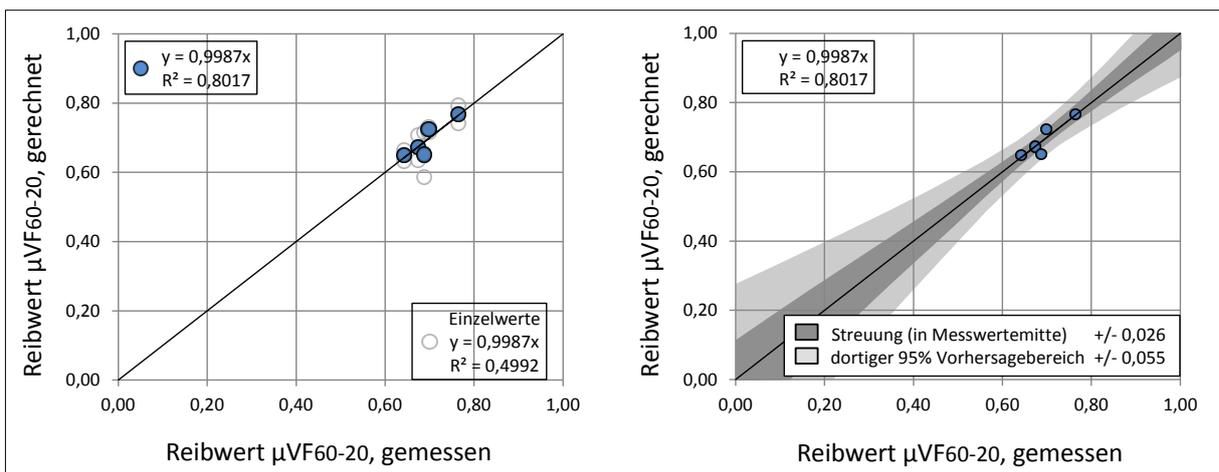
Bild 6-4: Lage der Messstrecken

Die Ergebnisse sind ebenfalls in Bild 6-5 dargestellt, in dem der berechnete über dem jeweiligen gemessenen Reibwert aufgetragen ist. In Ermangelung der genauen Reifendaten wurde auch hier die Berechnung zunächst mit den Materialdaten einer aktuellen Laufflächenmischung eines Pkw-Reifens durchgeführt (s. Kapitel 6.2.2). Wie man erkennen kann, ist die Übereinstimmung zwischen gemessenen und gerechneten Reibwerten sehr groß. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei  $R^2 = 0,91$ . In der rechten Hälfte sind die dazugehörigen Konfidenzbänder dargestellt: in dunkelgrau die mittlere Abweichung (Streuung) und in hellgrau der 95%-Konfidenzbereich. Der Konfidenzbereich in Messwertemitte liegt bei  $\pm 0,036$  um den Erwartungswert (ViaFriction), die dazugehörige mittlere Abweichung bei 0,016. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes ist statistisch eine Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur für das

ViaFriction-Messgerät ermittelt worden (s. Kapitel 3.4 und Anhang). Das Ergebnis für die temperatur- und geschwindigkeitskorrigierten Messdaten ist in Bild 6-6 dargestellt. Der 95%-Konfidenzbereich in Messwertemitte liegt hier bei  $\pm 0,055$  um den Erwartungswert (ViaFriction) und die dazugehörige mittlere Abweichung bei 0,026. Nimmt man diese beiden Ergebnisse zusammen, liegt damit die mittlere Abweichung für das ViaFriction-Messfahren auf gleichem Niveau wie für das PWS-Verfahren: bei 0,02 Reibwerteinheiten. Damit erreicht die Genauigkeit der berührungslosen Griffigkeitsmessung das Niveau der herkömmlichen, berührenden Verfahren (vgl. Kapitel 2.4.2). Allerdings muss die Datenbasis noch deutlich erweitert werden, um zu abgesicherten Bewertungshintergründen zu kommen. In Tabelle 6-4 sind nochmal die maßgebenden physikalischen Einflussgrößen für das Gummireibungsmodell (ViaFriction) zusammengestellt.



**Bild 6-5:** Korrelation zwischen gemessenem und gerechnetem Reibwert (ViaFriction); rechts: dazugehörige Vertrauensbänder – ohne Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur



**Bild 6-6:** Korrelation zwischen gemessenem und gerechnetem Reibwert (ViaFriction); rechts: dazugehörige Vertrauensbänder – mit Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur

Tabelle 6-4: Einflussgrößen für das Gummireibungsmodell (ViaFriction)

Kontakt- druck	Gleitge- schwindigkeit	Wellenlängenbereich		Mittl. Temperatur des Gummis im unmittelbaren Kontaktbereich
		gesamt	maßgebend	
0,2 N/mm <sup>2</sup>	12,5 km/h	20µm bis 50 mm	20µm bis 1 mm	45 bis 50 °C

### 6.2.4 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Griffigkeit mithilfe des Gummireibungsansatzes mit hoher Genauigkeit aus der Textur bestimmt werden kann. Der Reibwert sowohl unter Blockierbremsbedingungen als auch unter ABS-ähnlichen Bremsbedingungen konnte mit einer mittleren Abweichung von nur  $\sigma(\mu) = 0,02$  berechnet werden, und das bei einer im Durchschnitt nur doppelten Belegung.

Berücksichtigt man noch, dass die Berührungslose Griffigkeitsmessung auf einer Vielzahl von Messpunkten entlang der Straße beruht, kann von einer sehr zuverlässigen Vorhersage der Griffigkeit aus der Textur ausgegangen werden. Ein wichtiger nächster Schritt auf diesem Weg ist allerdings die Erweiterung der Messdatenbasis zur Schaffung eines abgesicherten Bewertungshintergrundes.

## 6.3 Auswertung mit Hilfe von Künstlichen Neuronen Netzwerken

Die nachfolgenden Ausführungen beschäftigen sich mit der Frage, ob die Ansätze bzw. einzelnen, aussagekräftigen Parameter (Kapitel 5.1 bis 5.3) mit Hilfe von Künstlichen Neuronen Netzwerken (KNN) weiter optimiert werden können. In diesem Kontext werden nur die Reibwerte aus den Labormessverfahren (Wehner/Schulze und SRT) herangezogen. Die Reibwerte des ViaFriction werden aufgrund der geringen Datenbasis für das KNN nicht berücksichtigt.

### 6.3.1 Implementierung der Künstlichen Neuronen Netzwerke mit dem computergestützten Programm MATLAB

Die theoretischen Grundlagen der KNN wurden mit MATLAB implementiert (s. Bild 6-7).

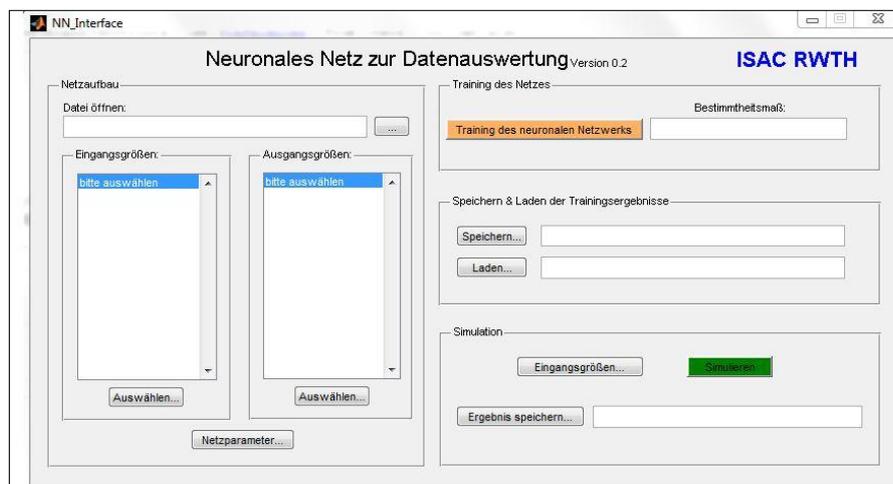


Bild 6-7: Künstliches Neuronales Netzwerk mit dem computergestützten Programm MATLAB

In Anlehnung an (Backhaus, 2006) werden die folgenden Ablaufschritte für die Feedbackforward-KNN vorgesehen (s. Bild 6-8):

- Problemstrukturierung und Netztypauswahl,
- Festlegung der Anzahl der Ein- und Ausgabeneuronen,
- Festlegung der Netztopologie (Bestimmung der Anzahl der versteckten Schichten und der versteckten Neuronen je Schicht),
- Bestimmung der Informationsverarbeitung in den Neuronen (Auswahl der Propagierungs- und Aktivierungsfunktion),
- Bestimmung der Lernrate und des Abbruchkriteriums
- Trainieren des Netzes und
- Anwendung des trainierten Netzes.

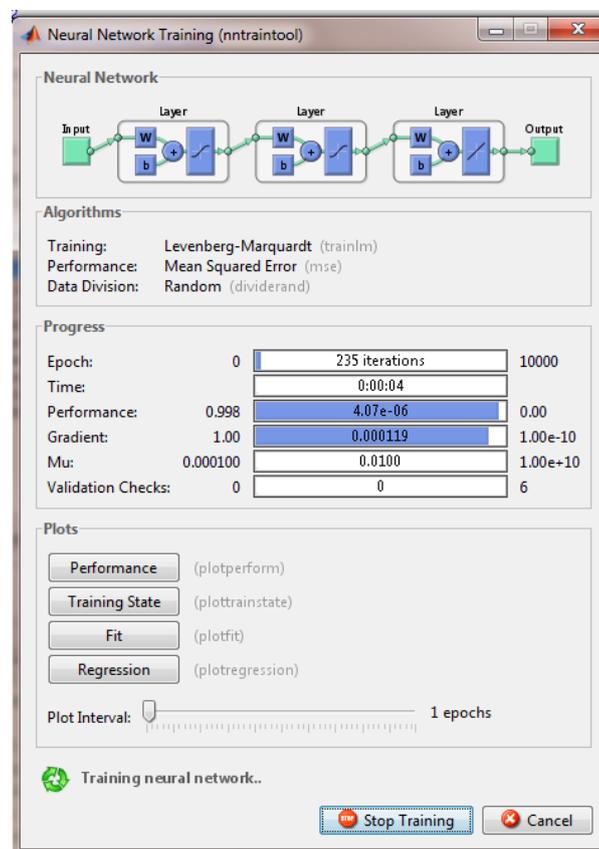


Bild 6-8: Training des KNN

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden die Künstlichen Neuronalen Netzwerke zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Textur- und Griffigkeitskennwerten unter Laborbedingungen (SRT- und Wehner/Schulze-Werte) angewendet. Hierbei werden die Ergebnisse aus den drei in Kapitel 5.1 bis 5.3 vorgestellten Rechenverfahren (Reibwert oder Texturparameter) als Eingabe in das KNN verwendet.

Eine Übersicht über die untersuchten Varianten sowie die Eingangs- und Ausgangsgrößen für das KNN bietet die nachstehende Tabelle.

Tabelle 6-5: Datenauswertung mit KNN

Ansatz	Rechenalgorithmen	Eingangsgrößen	Ausgangsgrößen
1	Geometrisches Texturparametermodell (s. Kapitel 5.1)	ASharp, AShape MRoughness, DIF	PWS
2	Gummireibungsmodell (s. Kapitel 5.2)	Reibwert aus dem Gummireibungsmodell nach Persson	PWS
3	Parametermodell auf Basis von Mikrotexturdaten (s. Kapitel 5.3)	W, LPSD <sub>f=1</sub>	SRT

### 6.3.2 Ergebnisse: Approximation der Rechenalgorithmen durch den Einsatz eines Künstlichen Neuronalen Netzwerkes

Nach der 10<sup>4</sup>-ten Trainingsrunde wird die Approximationsgenauigkeit des Netzes ermittelt, indem die Lerndaten den durch das Netz prognostizierten Daten gegenüber gestellt werden und das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> ermittelt wird (s. Bild 6-9, Bild 6-10 und Bild 6-11):

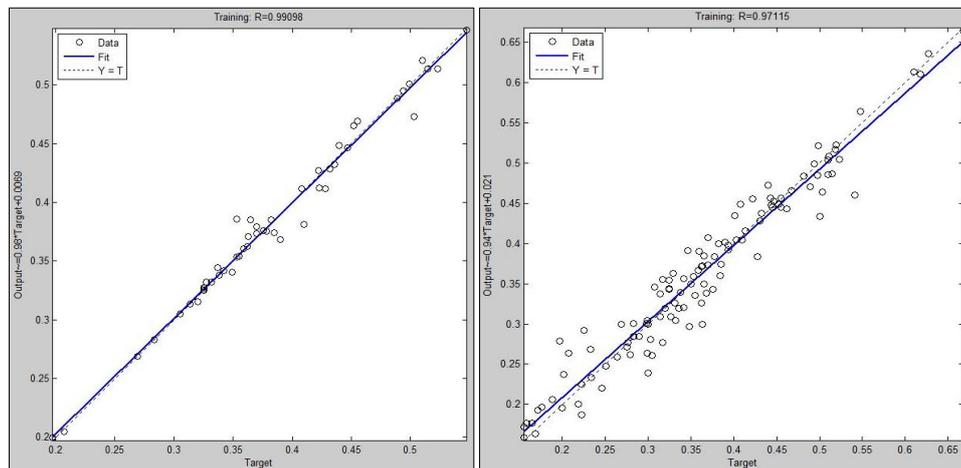


Bild 6-9: Approximationsgenauigkeit und Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> des KNN für das Texturparametermodell (s. Kapitel 5.1). Links: auf Basis der Daten aus den gelegten Steinplatten für die Modellierung. Rechts: auf Basis der Daten aus den realen Oberflächen für die Validierung.

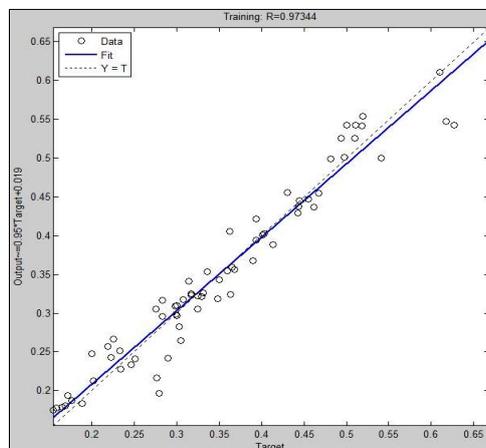
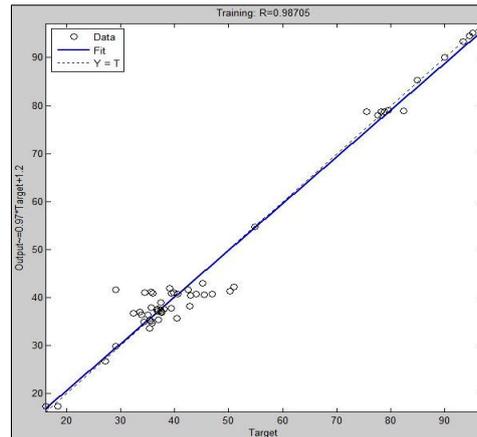


Bild 6-10: Approximationsgenauigkeit und Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> des KNN für das Gummireibungsmodell (s. Kapitel 5.2)



*Bild 6-11: Approximationsgenauigkeit und Bestimmtheitsmaß  $R^2$  des KNN für das Parametermodell auf Basis von Mikrotextrurdaten (s. Kapitel 5.3)*

Für das Texturparametermodell (s. Kapitel 5.1) stellt sich ein Bestimmtheitsmaß von jeweils 0,982 auf Basis der Daten für die Modellierung und von 0,943 für die Validierung ein. Für das Gummireibungsmodell (s. Kapitel 5.2) beträgt  $R^2 = 0,948$ , während für das Parametermodell auf Basis der Mikrotextrurdaten (s. Kapitel 5.3) das Bestimmtheitsmaß bei 0,974 liegt. Dies bedeutet, dass die Lerndaten und die Prognose ausgezeichnet übereinstimmen und die Approximationsgenauigkeit des KNN sehr hoch ist. Im Vergleich mit den Ergebnissen in Kapitel 5 und 6 kann festgehalten werden, dass die Genauigkeit der entwickelten Rechenalgorithmen auf einer Basis von 70 Einzelwerten durch die KNN weiter verbessert werden konnte. Die Genauigkeit des Gummireibungsmodells mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,974 bei 33 im Durchschnitt zweifach belegten Wertepaaren konnte jedoch nicht weiter verbessert werden, weil der Datenumfang diesbezüglich für das KNN zu gering war.

### 6.3.3 Fazit

Im Vergleich zur Regressionsanalyse können Künstliche Neuronale Netzwerke eine beliebige Funktion  $y=f(x)$  ausführen. Das KNN eignet sich insbesondere für Aufgaben, bei denen das Augenmerk primär auf die (Genauigkeit der) Ergebnisse und weniger auf die Art und Weise, wie diese zustande kommen, gelegt ist (Backhaus, 2006).

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden die KNN mit den entwickelten Rechenalgorithmen zur Berührungslosen Griffigkeitsmessung verknüpft. Die Rechenalgorithmen lieferten die Eingangsgrößen und dienten gleichzeitig zur Überprüfung der Ergebnisse, d.h. der Ausgangsgrößen der KNN. Die mit den KNN prognostizierten Daten stimmten sehr gut mit den gemessenen Daten überein; die Approximationsgenauigkeit der KNN war sehr hoch.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Genauigkeit der entwickelten Rechenalgorithmen auf der Basis von Einzelwerten durch die KNN weiter verbessert werden konnte. Wegen der zu kleinen Datenbasis konnte jedoch nicht untersucht werden, ob sich das Bestimmtheitsmaß des Gummireibungsmodells von 0,974 bei 33 im Durchschnitt zweifach belegten Wertepaaren noch weiter verbessern lässt.

## 7 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht befasst sich mit den Grundlagen der Berührungslosen Griffigkeitsmessung. Das Messkonzept, das hierbei verfolgt wird, besteht aus zwei Verfahrensschritten:

- der berührungslosen Messung der Fahrbahntextur (optischer Textursensor) und
- der Reibwertbestimmung auf Basis der gemessenen Textur und eines geeigneten Rechenalgorithmus.

Der Bericht beschäftigt sich im Wesentlichen mit dem zweiten Verfahrensschritt: der Entwicklung und Überprüfung geeigneter Rechenverfahren zur Reibwertbestimmung aus der Textur. Die Entwicklung eines geeigneten Textursensors muss im Rahmen weiterführender Forschungsmaßnahmen erfolgen.

In einer Literaturrecherche werden zunächst die straßenbautechnischen Grundlagen der Griffigkeit und Griffigkeitsmessung mit einem Überblick über die aktuell eingesetzten (berührenden) Messgeräte herausgearbeitet.

In einem weiteren Kapitel wird die Untersuchungsmethodik erläutert. Im Zentrum der Untersuchungen stehen Griffigkeits- und Texturmessungen an einer großen Anzahl von Asphalt- und Betonoberflächen. Das Probenkollektiv umfasst alle gängigen Walzasphalte in verschiedenen Verschleißzuständen sowie Betonoberflächen, die die gesamte Bandbreite üblicher Straßentexturen und –griffigkeiten abdecken. Desweiteren werden auch die statistischen Verfahren erläutert, die bei der Datenauswertung und Modellerstellung Verwendung finden.

Der Schwerpunkt der Arbeit bestand jedoch in der Erstellung mathematischer Rechenverfahren zur Berechnung der Straßengriffigkeit aus der optisch vermessenen Fahrbahntextur sowie deren Anwendung und Überprüfung. Insgesamt vier verschiedene mathematische Verfahren wurden im Verlaufe des Projektes entwickelt.

- ein Texturparametermodell (Ansatz 1)
- ein Gummireibungsmodell auf Basis der Theorie von B.N.J. Persson (Ansatz 2)
- ein empirisches Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Mikrotextur und der Griffigkeit (Ansatz 3), und
- ein Künstliches Neuronales Netzwerk (KNN) mit dem Ziel, auf die Ergebnisse der drei zuvor genannten mathematischen Verfahren (als Eingangsgrößen) aufzusetzen und über Lernprozesse die Ergebnisgenauigkeit dieser Verfahren noch weiter zu verbessern

Der Vergleich mit den Griffigkeitsmessungen (SRT, Wehner/Schulze, ViaFriction) ergab, dass die Griffigkeit mithilfe der entwickelten Verfahren mit hoher Genauigkeit aus den Texturdaten berechnet werden konnte.

Für das Texturparametermodell (Ansatz 1) ergab sich ein Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zwischen 0,8 und 0,9 bei einer mittleren Abweichung von 0,056 Reibwerteinheiten bezüglich des Griffigkeitsmessverfahrens nach Wehner/Schulze.

Für das Gummireibungsmodell (Ansatz 2) ergab sich ein Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,97 für das Wehner/Schulze-Messverfahren. Sowohl der Reibwert unter Blockierbremsbedingungen (Wehner/Schulze) als auch der Reibwert unter ABS-ähnlichen Bedingungen (ViaFriction) konnte mit hoher Genauigkeit aus der Textur berechnet werden. Die mittlere Abweichung in Messwertemittel lag in beiden Fällen bei nur  $\sigma(\mu) = 0,02$ .

Mithilfe des Künstlichen Neuronalen Netzwerkes (KNN) konnte das Texturparametermodell (Ansatz 1) von  $R^2 = 0,9$  auf ein Bestimmtheitsmaß von 0,94 und das Parametermodell auf Basis der Mikrotexturdaten (Ansatz 3) von 0,95 auf ein Bestimmtheitsmaß von 0,97 weiter verbessert werden. Für das Gummireibungsmodell (Ansatz 2, Bestimmtheitsmaß 0,97 auf der Basis von 33 im Schnitt 2-fach belegten Wertepaaren) konnte keine weitere Verbesserung erzielt werden, weil der Datenumfang (33 Wertepaare) für das KNN zu gering war. Bei einer größeren Datenbasis und entsprechender Mittelung könnte gegebenenfalls auch die Genauigkeit des Gummireibungsmodells noch verbessert werden.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass mit den im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeiteten Verfahren und für die hier untersuchten Oberflächen die Griffigkeit mit hoher Genauigkeit aus der optisch vermessenen Fahrbahntextur berechnet werden konnte. Die Genauigkeit liegt bereits auf gleichem Niveau mit herkömmlichen, berührenden Verfahren.

Damit ist ein wichtiger Schritt hin zur Berührungslosen Griffigkeitsmessung genommen. Die weiteren Schritte müssen nun darin bestehen, die bestehende Datenbasis zu erweitern und vor Allem einen geeigneten Sensor zu entwickeln, der für den Einsatz am fahrenden Fahrzeug geeignet ist.

## 8 Ausblick

Im Rahmen des Projektes konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Straßengriffigkeit bei Nässe aus den Texturdaten der Straßenoberfläche berechnet werden kann. Damit ist ein Grundstein für die Entwicklung der „Berührungslose Griffigkeitsmessung“ gelegt.

Die weiteren Schritte müssen nun darin bestehen, die bestehende Datenbasis zu erweitern und vor Allem einen geeigneten Sensor zu entwickeln, der für den Einsatz am fahrenden Fahrzeug geeignet ist.

Heutige Laser-Triangulationsverfahren bieten bereits die Möglichkeit, die Straßenoberfläche linienhaft in der erforderlichen Auflösung zu erfassen. Noch sind die Messraten und Speicherkapazitäten so beschränkt, dass die Erfassung erst im Schrittempo möglich ist. Aber selbst für im Schrittempo messende und/oder handgeführte Messgeräte besteht bereits ein Markt, wenn man bedenkt, wie wichtig die ständige Kontrolle der Griffigkeit schon beim Bau einer neuen Straßendecke ist. Auch an für große Messsysteme nicht zugängliche Bereiche (beispielsweise in Innenstädten) kann dabei gedacht werden.

Wenn man an die rasante Entwicklung in der Mess- und Speichertechnik denkt, kann ein fahrzeugtaugliches berührungsloses Griffigkeitsmesssystem schon bald in Reichweite sein. Die Zeiten, in denen ein teurer, schwerer Lkw mit Wassertank und aufwändiger, wartungsintensiver Messeinrichtung für routinemäßige Griffigkeitsmessungen benötigt wird, könnten bald der Vergangenheit angehören. An ihre Stelle würde ein kleiner optischer Sensor mit integrierter Datenverarbeitung rücken, der ohne Probleme an eine Baumaschine, einen Pkw oder ein schon bestehendes Messfahrzeug für die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) von Straßen angebracht werden kann.

In Zukunft könnten dann kleine, wartungsfreie Griffigkeitssensoren, sowohl für die Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Straßen, als auch für die Zustandserfassung ganzer Straßennetze in hochintegrierten, schnellfahrenden Messsystemen hoher Messleistung zum Einsatz kommen.

## Literaturverzeichnis

(APOLLO, 2003)

EU-Projekt APOLLO – Intelligent Tyre for Accident-free Traffic (IST-2001-34372), Deliverable D7: Intelligent Tyre Systems – State of the Art and Potential Technologies, 2003

(Bachmann, 1996)

Bachmann, T.: Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 286, 1996

(Bachmann, 1998)

Bachmann, T.: Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 360, 1998

(Bachmann, 1999)

Bachmann, T.: Wechselwirkungen im Reibungsprozess zwischen Reifen und Fahrbahn, VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn vom 21./22. Oktober 1999 in Hannover, VDI-Berichte 1494, 1999

(Backhaus, 2006)

Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weber, R.: Multivariate Analysemethoden – Eine Anwendungsorientierte Einführung, 11. Auflage, Springer-Lehrbuch, 2006

(Bald, 2004)

Bald, J. S.; Lutz, P., Weidich, P.: Aktualisierung der Ermittlung von Vergleichs- und Wiederholstreibereichen von Griffigkeitsmesssystemen (SCRIM). Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 900, 2004

(Bald, 2008)

Bald, Rosauer: Modelling the ups and downs of the skid resistance of road surfaces, 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2008), Darmstadt, 2008

(Barrick, 1970)

Barrick, D.E.: Rough Surfaces, in "Radar Cross Section Handbook, Vol.2", ed.by G.T. Ruck, Plenum Press, NY, 1970

(Becherer, 1998)

Becherer, T.: The Sidewall Torsion Sensor System, 2. Darmstädter Reifenkolloquium, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 362, Oktober

(Beckenbauer, 2003)

Beckenbauer, T.: Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Minderungspotenziale der Straßenoberfläche; Plenarvortrag im Rahmen der DAGA, Aachen, [www.akustik.rwth-aachen.de/DAGA03/deutsch/pdf/Plenarvortrag\\_Beckenbauer.pdf](http://www.akustik.rwth-aachen.de/DAGA03/deutsch/pdf/Plenarvortrag_Beckenbauer.pdf), 2003

(Becker, 2001)

Becker, A. et al.: Integration von Fahrwerkkomponenten am Beispiel des verkürzten Anhaltewegs, VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn,, VDI-Berichte 1632, Hannover, 2001

(Beckmann et al, 1987)

Beckmann, P.; Spizzichino, A.: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Artech house, Norwood, MA, 1987

(Beller et al., 2000)

Beller, H.A.; Rieth, P.E.: Mit „Total Chassis Management“ auf dem Weg zum intelligenten Fahrwerk, XX. Internationales mu-Symposium (Bremsen-Fachtagung), VDI-Fortschritt-Ber. 12, Nr. 440, Bad Neuenahr, 2000

(Bourg, 2006)

Bourg, A.; Paulus, L.; Reiser, M.: Neuronale Netze, Semesterarbeit zum Forschungsseminar: Neuere psychologische Fachliteratur SS 2006, Institut für Psychologie, Leopold - Franzens – Universität Innsbruck, 2006

(Breuer, 1990)

Breuer, Baierl: Einfluss Splittqualität auf die Griffigkeit und Lebensdauer von Oberflächenbehandlungen an einer Versuchsstrecke, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 592, 1990

(Breyer, 1983)

Breyer, M.: Polierversuch Teil I, Straßenforschung Heft 223, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 1983

(Cyllik et al., 2001)

Cyllik, A.; Strothjohann, T.; Scholl, G: Der intelligente Reifen - Anwendungsmöglichkeiten des Reifenprofilsensors, VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn vom 18./19. Oktober 2001 in Hannover, VDI-Berichte 1632 (2001),

(Dieckmann, 1992)

Dieckmann, T.: Der Reifenschlupf als Indikator für das Kraftschlusspotential, Dissertation Universität Hannover, 1992

(DIN, 1999)

DIN EN ISO 4287: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit; Deutsche Fassung EN ISO 4287, 1999

(DIN, 2004)

DIN EN ISO 13473-1: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen. Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe; Deutsche Fassung EN ISO 13473-1, 2004

(DIN, 2009a)

DIN EN 13036-4: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen- der Pendeltest, Entwurf, 2009

(DIN, 2009b)

DIN EN 1436: Straßenmarkierungsmaterialien - Anforderungen an Markierungen auf Straßen, 2009

(DIN, 2011)

DIN EN 12697-49: Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 49: Messung der Griffigkeit nach Polierung; Deutsche Fassung prEN 12697-49, 2011

(Do et al., 2008)

Do, M.-T., Roe, P. G., Vos, E., Groenendijk, J.: WP2 – Harmonisation of skid-resistance methods and choice of reference surfaces – D04 und D05; Tyrosafe (FP7/2007-2013 under grant agreement n°217920), 2008

(Fach et al., 1998)

Fach, M.; Bachmann, V.: Der Darmstädter Reifensensor im Labor und am Fahrzeug, 2. Darmstädter Reifenkolloquium, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 362, 1998

(FGSV, 2002)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen (ZTV M 02), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2002

(FGSV, 2004a)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): „Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau – Teil Messverfahren SRT (TP Griff-StB (SRT))“; Köln, 2004

(FGSV, 2004b)

Merkblatt für den Bau griffiger Asphaltdeckschichten, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, Ausgabe 2004

(FGSV, 2008)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): „Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM) (TP Griff-StB (SKM))“; Köln; 2008

(FGSV, 2010)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): „TP Asphalt-StB - Technische Prüfvorschriften für Asphalt“, Köln; 2010

(FGSV, 2012)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): „Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (M BGriff)“; Köln, 2012

(Gorski, 2010)

Gorski, P.: Aufbau und Beschreibung Neuronaler Netzwerke, [www.imd.uni-rostock.de/ma/rs/lv/hosc/fiete.pdf](http://www.imd.uni-rostock.de/ma/rs/lv/hosc/fiete.pdf), Stand 30.11.2009

(Greenwood et al., 1966)

Greenwood, J.A.; Williamson, J.B.P.: Contact of nominally flat surfaces, Proc. Roy. Soc. A295, 300, London, 1966

(Grosch, 1963)

Grosch, K. A.: The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 274, no. 1356, London, 1963

(Grosch, 1966)

Grosch, K. A.: The Rolling Resistance, Wear and Traction Properties of Tread Compounds. Rubber Chem. Technol. 69 495, 1966

(Hasman et al., 1999)

Hasman, E.; Keren, S.; Davidson, N.; Friesem, A.A.: "Three-dimensional optical metrology with colour-coded extended depth of focus", Opt. Lett. 24, 439-441, 1999

(Hasman et al., 2001)

Hasman, E.; Kleiner, V.: "Color-coded optical profilometry with resolved depth steps", Appl.Opt. 40, 1609-1616, 2001

(Haus et al., 2006)

Haus, J.; Niessner, A.: "Laser-Triangulationssensoren für Fahrdynamiktests", in LTJ Nr. 3, Weinheim, 2006

(Heinrich, 1997)

Heinrich, G.: Hysteresis Friction of Sliding Rubbers on Rough and Fractal Surfaces. Rubber Chem. Technol. 70, 1997

(Hiersche et al., 1990)

Hiersche, E.-U.; Knepper, S.: Vergleichsmessungen zwischen dem Stuttgarter Reibungsmesser und der Sideway-force Coefficient Machine im Hinblick auf ihre Einsatzmöglichkeiten im Rahmen des Managements der Straßenerhaltung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Nr. 582, Bonn-Bad Godesberg, 1990

(Huschek, 1975)

Huschek, S.: Griffigkeit und Verkehrssicherheit auf nasser Straße, Institut für Straßen- und Untertagebau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilung Nr. 31 (Forschungsaufträge Nr.21/70 und 14/72), Zwischenbericht, Zürich, 1975

(Huschek, 1995)

Huschek, S.: Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe, Straße + Autobahn, Heft 3, 1995

(Huschek, Merzoug, 1996a)

Huschek, S.; Merzoug, P. D.: Zusammenhang zwischen Rauheit und Griffigkeit, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 735, 1996a

(Huschek, 1996b)

Huschek, S.: Kennzeichnung der Oberflächenrauheit und deren Einfluss auf die Griffigkeit und Reifengeräusche, Straße und Autobahn, Heft 6, Bonn, 1996b

(Keller et al., 2004)

Keller, G.; Janschek, K.; Dyblenko, S.; Reimann, S.; Tchernykh, V.; Trojna, G.: "Verbesserung der Qualitätsüberwachung für die Papierherstellung durch schnellere online Messung der Formation und anderer Struktureigenschaften auf der Basis eines neuartigen optischen 2D-Spektralsensors.", PTS-Forschungsbericht, Forschungsvorhaben AiF 59ZBR, Papiertechnische Stiftung PTS, Heidenau, 2004

(Khoudeir et al., 2004a)

Khoudeir, M., Brochard, J., Legeay, V., Do, M.-T.: "Roughness characterization through 3D textured image analysis: contribution to the study of road wear level", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 19, 93-104, 2004

(Khoudeir et al., 2004b)

Khoudeir, M., Brochard, J., Benslimane, A., Do, M.-T.: "Estimation of the luminance map for a Lambertian photometric model: application to the study of road surface roughness", J. Electon. Imag. 13, 515-522, 2004

(Klempau, 2000)

Klempau, F.: Untersuchungen eines modellunterstützten Reibwertvorhersagemodells im Fahrzeug, 3. Darmstädter Reifenkolloquium, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 437, 2000

(Klüppel, Heinrich, 2000)

Klüppel, M.; Heinrich, G.: Rubber Friction on Self-Affine Road Tracks, Rubber Chemistry and Technology, 73, 578-606, 2000

(Kluger-Eigl, 2009)

Kluger-Eigl, W.: Entwicklung eines Bewertungshintergrundes für das Griffigkeitsmesssystem GripTester in Österreich (Dissertation), Wien, 2009

(Krajcsir, Weixlbaum, 2004)

Krajcsir, A.; Weixlbaum, M.: Griffigkeit von Asphaltdeckschichten, Vortrag anlässlich des 30. GESTRATA - Bauseminars, 2004

(Kriesel, 2010)

Kriesel, D.: Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze, [www.dkriesel.com](http://www.dkriesel.com), Stand: 22.05.2010

(Kummer, 1966)

Kummer, H. W.: Unified Theory of Rubber and Tire Friction. Pennsylvania State University, Engineering Research Bulletin B-94, 1966

(Kucheryavski, Govorov, 2005)

Kucheryavski, S.; Govorov, A.: The analysis of fracture surfaces of porous metal materials using AMT and fractal geometry methods, Altai State University, Barnaul, Russia, 2005

(LeGal et al., 2008)

LeGal, A.; Klüppel, M.: Investigation and modelling of rubber stationary friction on rough surfaces. Journal of Physics: Condensed Matter 20, 015007, 2008

(Lindner, 2005)

Lindner, M.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Gummireibung an Profilklotzen und Dichtungen, Dissertation Universität Hannover, 2005

(Litzka, 1988)

Litzka, Friedl: Untersuchung über den maßgebenden Reibungsbeiwert, Bundesministerium f. Bauten u. Technik, Straßenforschung Heft 376; Wien, 1988

(Maclean, 1958)

Maclean, Shergold: The Polishing of Roadstone in Relation to the Resistance to Skidding of Bituminous Road Surfacing. Department of Scientific and Industrial Research, Road Research Laboratory, Road Research Technical Paper No.43, London, 1958

(Malmivuo, 2001)

Malmivuo, M.: Use of Road Surface Friction Measurements and Measurement Device in Finland, Nordic Road and Transport Research 3, <http://www.vti.se/nordic>, 2001

(Mathworks, 2010)

<http://www.mathworks.de>, Stand 30.05.2010

(Mayer et al., 2000)

Mayer, G.; van der Sluis, S.: Signifikante Griffigkeitswerte aus Verkehrssicherheitssicht, Forschungsbericht zu FE 04.182/1998/CGB des BMVBW, Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen, 2000, unveröffentlicht

(Mayer, 2002)

Mayer, G.; van der Sluis, S.; Steinauer, B.: Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen, Teil 2: Signifikante Griffigkeitskennwerte aus Verkehrssicherheitssicht, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 841, 2002

(Moore, 1972)

Moore, D. F.: The Friction and Lubrication of Elastomers, Pergamon Press, Oxford, 1972

(Neuronales Netz, 2010)  
<http://www.neuronales-netz.de/>, Stand: 22.05.2010

([www.norsemeter.no](http://www.norsemeter.no))  
Produktinformation der Firma Norsemeter, [www.norsemeter.no](http://www.norsemeter.no)

(Oren et al., 1995)  
Oren, M., Nayar, S.K.: Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision, *Int.J.Comput.Vision* 14, 1995

(Persson, 1996)  
Persson, B.N.J.: Sliding Friction of Lubricated Surfaces. in: Persson, Tosatti (eds): *Physics of Sliding Friction*, Kluwer Academic Press, 1996

(Persson, 2001)  
Persson, B.N.J.: Theory of rubber friction and contact mechanics, *Journal of Chemical Physics* (115) 8, S. 3840-3861, 2001

(Persson et al., 2005)  
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, sealing, rubber friction and adhesion, *J. Phys.: Condens. Matter* 17 2005 R1-R62, 2005

(Persson, 2006)  
Persson, B.N.J.: Rubber Friction: role of the flash temperature, *Journal of Physics: Condensed Matter* 18 (2006) S. 7789-7823, IOP Publishing, 2006

(Pfeifer, 1984)  
Pfeifer, P.: Fractal dimension as working tool for surface-roughness problems, *Applications of Surface Science*, 1984

(Pfeiler, 2004)  
Pfeiler, A.: Erhöhung der Griffigkeit von Asphaltstraßen, Der Einfluss der Polierresistenz feiner Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltdeckschichten, Dissertation, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, 2004

(Pinnington, 2007)  
Pinnington, R.J.: A Surface Model for Road/Tyre Interaction, ITARI – Integrated Tyre and Road Interaction, Forschungsprojekt im Auftrag der EU, 2007 (unveröffentlicht)

(Ploner, 2010)  
Ploner P. W.; Klaukien, M.: Neuronale Netze, Forschungsseminar: Neuere psychologische Fachliteratur, LV-Leiter: Ao. Univ.-Prof. Dr. Karl Leidlmair, Innsbruck, 14.05.09, [http://www.uibk.ac.at/psychologie/mitarbeiter/leidlmair/neuronale\\_netze2.pdf](http://www.uibk.ac.at/psychologie/mitarbeiter/leidlmair/neuronale_netze2.pdf), Stand: 22.05.2010

(Radó, 1994)  
Radó, Z.: A Study of Road Surface Texture and its Relationship to Friction. Dissertation, Pennsylvania State University, 1994

(Rice, 1951)  
Rice, S.O.: Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces, *Commun.PureAppl.Math.* 4, 1951

(Schacht et al, 2012)

Schacht, A., Kemper, D. Steinauer, B., Oeser, M., Klein, G.: Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmarkierungen; Schlussbericht zum FE-Projekt: FE SV.0003/2009, Aachen, 2012, unveröffentlicht

(Schallamach, 1953)

Schallamach, A.: The velocity and temperature dependence of rubber friction, Proc.Phys.Soc.(London) B66, 386, 1953

(Schmidt, 2012)

Schmidt, S.: Schaffung eines Bewertungshintergrundes für das kontinuierliche Griffigkeitsmessverfahren ViaFriction, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Straßenwesen der RWTH Aachen, unveröffentlicht, 2012

(Schramm, 2002)

Schramm, E.J.: Reibung von Elastomeren auf rauen Oberflächen und Beschreibung von Nassbremsseigenschaften von PKW-Reifen, Dissertation Universität Regensburg, 2002

(Schulze, 1970):

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

(Schulze, 2011)

Schulze, C.: Ein geometrisch basiertes Modell zur Ableitung der Griffigkeit aus der Textur, Dissertation, Institut für Straßenwesen, RWTH-Aachen University, 2011

(Schulze et al, 2009)

Schulze, C., Kendziorra, N., Steinauer, B., Meyer, A., Ueckermann, A., Wies, B.: Integrale Betrachtung der Fahrbahngriffigkeit aus Reifen/Fahrbahnsicht, 12. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn 20./21.10.2009, Hannover, 2009

(Steinauer et al., 2008)

Steinauer, B., Ueckermann, A., Meyer, A., Schulze, C.: Nachhaltiger Straßenbau, Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen, Teil II: Entwurfs- und Prognoseinstrumentarium für die Griffigkeit von Fahrbahndecken aus Asphalt, Schlussbericht, Aachen, 2008

(Steinauer et al., 2011)

Steinauer, B., Wang, D., Stanjek, H., Stanjek, C.: Erhöhung der Verkehrssicherheit durch gute Griffigkeitswerte während der gesamten Gebrauchsdauer von hochbelasteten Straßen, Schlussbericht, FE 04.208/2007/CRB, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2011

(Steinauer et al., 2012)

Steinauer, B., Oeser, M., Meyer, A., Schulze, C., Ueckermann, A., Schacht, A., Wang, D., Kubasch, J., Kartzow, M.: Berührungslose Griffigkeitsmessung, Entwicklung eines dynamischen Messverfahrens zur berührungslosen Bestimmung der Fahrbahngriffigkeit, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19 S 7012, Schlussbericht, 2012

(Strothjohann, 2000)

Strothjohann, T.: Potentiale der Oberflächenwellen-Technologie für den Darmstädter Reifensensor, 3. Darmstädter Reifenkolloquium, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 437, 2000

(Stover, 1990)

Stover, J.C.: Optical Scattering: Measurement and Analysis, McGraw-Hill, NY, 1990

(Thomas, 1982)

Thomas, T.R.: Rough Surfaces, Longman, Harlow, 1982

(Torrance et al., 1967)

Torrance, K.E.; Sparrow, E.M.: Theory for off-specular reflection from roughened surfaces, J.Opt.Soc.Am. 57, 1967

(TP Griff-StB (SKM), 2007)

Technische Prüfvorschriften für Griffigkeit im Straßenbau; Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), Ausgabe 2007. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2007

(Ueckermann, 2004)

Ueckermann, A.: Ein geometrisch basiertes Verfahren zur Lokalisierung und Bewertung einzelner, periodischer und regelloser Unebenheiten im Straßenlängsprofil; Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 44, Aachen, 2004

(Vogtmeier, 1998)

Vogtmeier, G.: System zur polarimetrischen Untersuchung der Mikrorauheit von Fahrbahnoberflächen, Dissertation RWTH Aachen, 1998

(Wang, 2011)

Wang, D.: Schaffung des Bewertungshintergrunds zur Charakterisierung des Polierverhaltens der einzelnen, gesteinsbildenden Minerale und zur Untersuchung des Griffigkeitsverhaltens der Mineralaggregate in Abhängigkeit von den Polierbedingungen, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Band 58, 2011

(Wellner, 2007)

Wellner, F.; Oeser, M.; Weise, C.; Jöhnig, J.; Leutner, R.; Lorenzl, H.; Schindler, K.; Mollenhauer, K.; Nolle, B.; Zander, U.; Rabe, R.: Nachhaltiger Straßenbau: Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen. Schlussbericht, Online Ressource, Dresden (Deutschland, Bundesrepublik) Selbstverlag, 2007

(Williams, Landel, Ferry, 1955)

Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D.: The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids, J.Am.Chem.Soc. 77, 1955

(Wilson, 2006)

Wilson, D. J.: An Analysis of the Seasonal and Short-Term Variation of Road Pavement Skid Resistance, Department of Civil and Environmental Engineering, A Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, The University of Auckland, 2006

(Zhao et al., 2001)

Zhao, Y.; Wang, G.-C.; Lu, T.-M.: Characterization of Amorphous and Crystalline Rough Surface: Principles and Applications, Academic Press, CA, 2001

(Zieger, 1980)

Zieger, M.: Polierversuch, Teil III, Straßenforschung Heft 385, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 1980

## Anhang

## **Anhang 1: Griffigkeitsmessung mit dem kontinuierlich messenden Griffigkeitsmesssystem ViaFriction**

In dem nachfolgenden Kapitel werden sowohl die Funktionen des kontinuierlichen Griffigkeitsmesssystems ViaFriction als auch die Vorgehensweise zur Datenerfassung im Rahmen dieses Projektes erläutert. Die erhobenen Daten sollen dazu dienen, die Griffigkeit von realen Fahrbahnoberflächen unter ABS-ähnlichen Bedingungen zu bestimmen und die entwickelten Reibmodelle an den ViaFriction-Reibwerte ( $\mu_{VF}$ ) auf der Straße zu validieren. Diesbezüglich wird auch auf Aspekte der Messwertkorrektur infolge veränderter Messrandbedingungen sowie auf die Streckenauswahl und die Messdatenauswertung im Rahmen dieses Vorhabens eingegangen. Ausführliche Informationen zu dem Griffigkeitsmesssystem ViaFriction sowie zu der Erarbeitung von Geschwindigkeits- und Temperaturkorrekturalgorithmen finden sich bei (Schmidt, 2012).

### **1.1 Das kontinuierlich messende Griffigkeitsmesssystem ViaFriction**

Das kontinuierlich messende Griffigkeitsmesssystem ViaFriction wurde von der norwegischen Firma ViaTech in Zusammenarbeit mit dem Norwegischen Straßenbauministerium Statens Vegvesen entwickelt. Das Verfahren dient zur kontinuierlichen Ermittlung des Reibwerts in Längsrichtung (LFC = Longitudinal Friction Coefficient).

Das System existiert in zwei Varianten: das kombinierte Sommer- und Wintermessgerät und das reine Wintermessgerät. Das kombinierte Messsystem besitzt eine Bewässerungseinrichtung und besteht aus einem Zugfahrzeug und einem Messanhänger mit dem daran befestigten Messgerät. Das Wintersystem besteht aus einem Zugfahrzeug und dem Messanhänger ohne Bewässerungseinrichtung. Im Rahmen des Vorhabens wurde die Sommerversion angeschafft und teilweise aus Projektmitteln finanziert.

Der wichtigste Vorteil dieses Verfahrens gegenüber allen anderen kontinuierlich messenden Griffigkeitsmesssystemen liegt darin, dass der Schlupf variabel einstellbar ist und der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn unter ABS-ähnlichen Bedingungen damit untersucht werden kann. Dies ist deshalb so wichtig, da sich die berührungslose Griffigkeitsmessung möglichst nah an der Praxis orientieren muss. Hierzu sind die entwickelten Rechenalgorithmen nicht zuletzt auch an den ViaFriction-Reibwerten ( $\mu_{VF}$ ) auf der Straße zu validieren. Die Untersuchungen im Labor (SRT, Wehner/Schulze) sind trotzdem, unverzichtbar, da nur so das notwendige Spektrum an Oberflächen anhand von gezielt ausgewählten und hergestellten Proben analysiert werden kann. Dies wäre mit dem ViaFriction-Verfahren alleine nicht möglich gewesen.

#### **1.1.1 Beschreibung des ViaFriction-Zugfahrzeugs**

Das ViaFriction-Messgespann besteht aus einem Zugfahrzeug und einem Messanhänger (ViaFriction). Als Zugfahrzeug dient ein Volkswagen Transporter T5 mit einer Leistung von 96 kW/130 PS sowie einer verstärkten Hinterachsgeometrie.

Die starke Motorisierung sowie die verstärkte Hinterachse sind erforderlich, da im hinteren Teil des Zugfahrzeugs ein Wassertank mit einem Fassungsvermögen von ca. 900 Litern zur Versorgung der Messeinheit mit Wasser untergebracht ist (vgl. Bild A-1 und Bild A-2). Am Wasser-

tank sind noch Teile der Elektronik, die Batterien sowie die Wasserpumpe angebracht. Zusätzlich ist das Zugfahrzeug mit einem Tempomat ausgestattet, der es ermöglicht die Messgeschwindigkeit sehr genau einzuhalten.



*Bild A-1: Messgespann bestehend aus Zugfahrzeug und Messeinheit*



*Bild A-2: Wassertank inkl. Messhardware (links), PC-Einheit (rechts)*

### **1.1.2 Beschreibung der ViaFriction-Messeinheit**

Die Messeinheit des ViaFriction ist an einem Messanhänger auf der rechten Seite angeordnet, so dass die Messung der Griffigkeit in der rechten Rollspur des Triebfahrzeuges erfolgt. Durch einen Umbau des Messanhängers könnte auch eine Messung in der linken Rollspur realisiert werden. Diese Möglichkeit wird aber im Rahmen dieses Vorhabens nicht in Anspruch genommen, da die Griffigkeit in Deutschland standardmäßig in der rechten Rollspur gemessen und bewertet wird. Der Messanhänger besteht aus zwei einzeln aufgehängten Rädern: einem Stützrad bzw. Laufrad auf der linken Seite und der Messeinheit mit dem Messreifen auf der rechten Seite (vgl. Bild A-3 und Bild A-4). In Tabelle A-1 sind zusammenfassend die technischen Spezifikationen des ViaFriction-Messanhängers sowie der ViaFriction-Messeinheit dargestellt.



Bild A-3: ViaFriction Messeinheit



Bild A-4: Wasserzufuhr

Tabelle A-1: Standardmessbedingungen ViaFriction

Geometrie der Messeinheit	2090 x 1780 x 780 mm (L x B x H)
Eigengewicht	200 kg
Laufreifen	155/70 R13 75H
Messrad	Profilloser ASTM RL2 4,00-8NHS oder profilierter Reifen gleicher Dimensionen
Reifendruck	2,0 bar
Messbarer Temperaturbereich	> 5°C und < 50°C
Auflast	600 N
Messgeschwindigkeit	15 km/h bis 90km/h (gemäß StVO nur max. 80 km/h)
Theoretische Wasserfilmdicke	0,5 – 1,0 mm
Min. Aufzeichnungslänge	frei wählbar, minimal 10 cm
Messbarer Reibwertbereich	0,1 – 0,9
Messmodi	Konstanter Schlupf, variabler Schlupf im Bereich von 0-80 % sowie konstante Schlupfgeschwindigkeit, Aufzeichnung des F30 und des F60-Wertes

### **Erläuterung des mechanischen Messprinzips**

Nachfolgend wird das Messprinzip der ViaFriction-Messeinheit vorgestellt. Insbesondere wird dabei auf die Kraftübertragung vom Messreifen zur Messeinheit eingegangen. Diese erfolgt per Zahnriemen durch eine Verbindung der Messreifenachse mit einer Umlenkwellen innerhalb der Messeinheit. An dieser Welle wird die Geschwindigkeit über eine Schlupfkupplung an einen weiteren Zahnriemen, der zum eigentlichen Bremsmechanismus bzw. zu einem Generator führt, übertragen. Hierdurch kann eine Beschädigung des Bremsmechanismus durch zu starke Beschleunigungen oder Geschwindigkeiten verhindert werden, da in diesem Falle ein Durchrutschen der Schlupfkupplung erfolgt (vgl. Bild A-5).

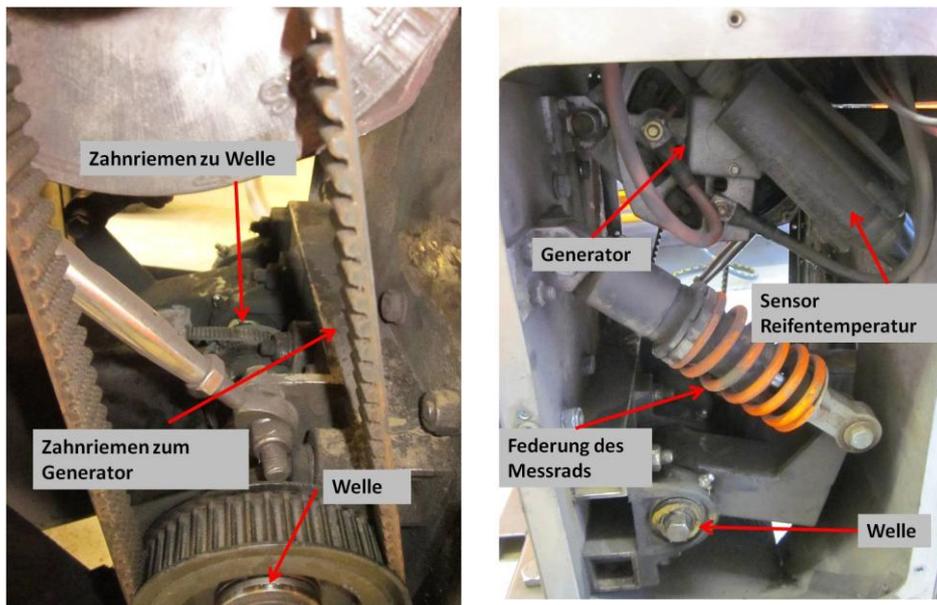


Bild A-5: Innenansicht ViaFriction-Messeinheit – Kraftübertragung mittels einer Umlenkmekhanik mit Zahnriemen (links), Bremssystem/Bremsgenerator (rechts)

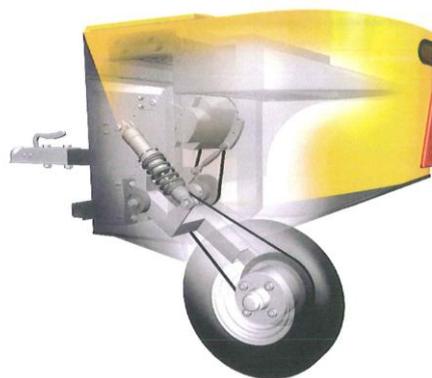


Bild A-6: Bremssystem der ViaFriction-Messeinheit

Der o.g. Generator fungiert bei der Messung der Griffigkeit als elektrische Bremse, der den Messreifen über die erwähnten Zahnriemen auf den gewünschten Schlupfzustand abbremst. Der Reibwert Reifen-Fahrbahn wird dabei aus der Geschwindigkeit des Triebfahrzeuges und der benötigten elektrischen Energie, die zum Abbremsen, d. h. zum Aufbau des Schlupfes, benötigt wird, berechnet. Diese erzeugte elektrische Energie wird an elektrischen Keramikwiderständen in Abwärme umgewandelt.

Durch die Verwendung von Zahnriemen ist das ViaFriction ein wartungsarmes Gerät, da Zahnriemen keine Schmierung benötigen und sich im Laufe der Belastung kaum längen. Einzig die Schlupfkupplung verschleißt sehr stark und sollte deshalb öfter kontrolliert und gegebenenfalls ausgetauscht werden.

### **Sensoren zur Erfassung der Messrandbedingungen**

Das ViaFriction ist mit vier Temperatursensoren sowie einer Einheit zur Erfassung der Geschwindigkeit ausgestattet. Die Erfassung der Geschwindigkeit erfolgt an dem Laufrad. Die vier Temperatursensoren sitzen an vier verschiedenen Stellen des Geräts und erfassen die Temperatur des Wassers, der Straßenoberfläche, der Reifenoberfläche und die Lufttemperatur. Auf

den folgenden Bildern (vgl. Bild A-7 bis Bild A-10) wird die Lage der Sensoren aufgezeigt und genauer beschrieben:



*Bild A-7: Temperatursensor zur Erfassung der Wassertemperatur*



*Bild A-8: Temperatursensor zur Erfassung der Lufttemperatur*



*Bild A-9: Temperatursensor zur Erfassung der Reifentemperatur*



*Bild A-10: Temperatursensor zur Erfassung der Oberflächentemperatur*

Der Temperatursensor zur Erfassung der Wassertemperatur befindet sich im Auslauf des Wassers innerhalb des Zugfahrzeuges (vgl. Bild A-7). Diese Anordnung des Durchlaufsenors, hinter der Kreiselpumpe, ermöglicht eine ungestörte Temperaturmessung des Wassers (Durch die Pumpe bedingte Temperatursteigerungen des Wassers werden somit auch erfasst). Die Entfernung der Messstelle von dem Wasserauslauf an der Messeinheit (vgl. Bild A-4) beträgt nur ca. 2m, so dass davon auszugehen ist, dass es in diesem Bereich zu keinen wesentlichen Temperaturänderungen des Wassers mehr kommt.

Die Lufttemperatur wird auf dem Messanhänger, zwischen dem Lauf- und dem Messrad aufgezeichnet. Der Sensor ist frei schwebend ca. 30 cm oberhalb der Straßenoberfläche in einem Kunststoffgehäuse angebracht (vgl. Bild A-8).

Zur Erfassung der Gummitemperatur des Messreifens ist innerhalb der ViaFriction-Messeinheit ein Infrarotsensor angebracht. Dieser wird aus der inneren Box der Mechanik nach außen geführt (vgl. Bild A-5 rechts und Bild A-9) und misst die Oberflächentemperatur des Reifens an der höchsten Position des Messreifens. Diese Anordnung ermöglicht die Messung der Oberflächentemperatur des Reifengummis mit minimaler Beeinträchtigung der Temperatur durch Wasser auf dem Reifen, da dieses bereits an dieser Position abgelaufen ist.

Die Temperatur der Oberfläche wird aus ähnlichem Grunde vor der eigentlichen Messeinheit erfasst. Hierfür ist der Infrarotsensor an der Vorderseite der Messeinheit befestigt, so dass ein Einfluss von Wasser ausgeschlossen werden kann (vgl. Bild A-10).



*Bild A-11: Impulsgeber zur Erfassung der Messgeschwindigkeit des Triebfahrzeuges*

Die Geschwindigkeit des Messanhängers und damit des Triebfahrzeuges wird mit einem Impulsgeber an dem Laufreifen bestimmt (vgl. Bild A-11). Dieser erzeugt ein elektrisches Magnetfeld und kann durch eine veränderte Spannung detektieren, wann sich eine Aussparung oder ein Stück Metall vor dem Impulsgeber befindet. Parallel wird auch die Zeit gemessen, die zwischen dem Wechsel von Aussparung zu Metall vergeht. Über einen Umrechnungsfaktor kann dann über die gemessene Zeit auf eine Geschwindigkeit umgerechnet werden, die aufgrund der hohen Abtastung sehr genau ist.

### **1.1.3 Messmodi**

Mit dem ViaFriction kann die Griffigkeit kontinuierlich in einem Geschwindigkeitsbereich von 20 – 90 km/h (in Deutschland gemäß StVO maximal 80 km/h) in drei grundsätzlichen Messmodi erfasst werden:

- Messung des Reibwertes bei unterschiedlichen, aber konstanten Schlupfzuständen, z. B. bei 10%, 20% oder 50% Schlupf – „FIX-SLIP“
- Messung bei einer konstanten Schlupfgeschwindigkeit („SLIP-SPEED“ = Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Messreifen und Triebfahrzeug), z.B. bei einer Schlupfgeschwindigkeit von 20 km/h–Durchfahren der gesamten  $\mu$ -Schlupf-Kurve innerhalb eines Bremsvorganges sowie einer definierten Messstrecke, wie es bei einer ABS-Bremung der Fall ist – „VARIABLE SLIP“

Im ersten Modus „FIX-SLIP“ wird eine konstante Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Messreifen und frei laufendem Reifen erzeugt. Die Geschwindigkeitsdifferenz wird auf die Geschwindigkeit des frei laufenden Rades bezogen und als Schlupf in Prozent ausgedrückt. Die meisten kontinuierlich messenden Griffigkeitsmesssysteme messen mit konstantem Bremsschlupf, wie beispielsweise der GripTester (18 % Schlupf). Je nach eingestelltem Schlupf werden bei einer bestimmten Messgeschwindigkeit verschiedene Gleit- bzw. Relativgeschwindigkeiten erzeugt. Tabelle A-2 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Bedingt durch die unterschiedlichen Schlupfzustände ergeben sich trotz gleicher Fahrgeschwindigkeit auch unterschiedliche Reibwerte.

Tabelle A-2: Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit, Schlupf und Relativgeschwindigkeit

Fahrgeschwindigkeit	Schlupf	Gleit- bzw. Relativgeschwindigkeit
40 km/h	80%	32 km/h
40 km/h	40%	16 km/h
40 km/h	20%	8 km/h

Beim zweiten Modus „SLIP-SPEED“ wird, unabhängig von der gefahrenen Messgeschwindigkeit, immer eine konstante Gleit- bzw. Relativgeschwindigkeit zwischen Messreifen und Fahrbahnoberfläche realisiert. Hierzu kann die Relativgeschwindigkeit vorgegeben werden. Eine Relativgeschwindigkeit von beispielsweise 20 km/h kann durch verschiedene Kombinationen aus Fahrgeschwindigkeit und Schlupf erreicht werden. Tabelle A-3 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Aufgrund unterschiedlicher Temperaturverhältnisse im Reifen und bedingt durch den jeweiligen Schlupfzustand, wird es aber trotz gleicher Relativgeschwindigkeiten zwischen Messreifen und Straße zu unterschiedlichen Reibwerten kommen.

Tabelle A-3: Zusammenhang zwischen Fahrgeschwindigkeit, Schlupf und Relativgeschwindigkeit

Fahrgeschwindigkeit	Schlupf	Gleit- bzw. Relativgeschwindigkeit
20 km/h	100%	20 km/h
40 km/h	50%	20 km/h
80 km/h	25%	20 km/h

In der dritten Betriebsart, die eine Bewertung des Reibwertpotenzials der Fahrbahnoberfläche ermöglicht, wird bei einer gewählten Fahrgeschwindigkeit der Schlupf innerhalb einer definierten Wegstrecke kontinuierlich von frei rollend auf blockiert aufgebaut, so dass sich die in Bild A-12 dargestellte  $\mu$ -Schlupf-Kurve ergibt. Voraussetzung hierfür ist eine homogene Fahrbahnoberfläche, da andernfalls veränderte Reibwerte nicht nur auf den veränderten Schlupf sondern vielmehr auf eine veränderte Oberflächenbeschaffenheit zurückgeführt werden müssen. Eine aussagekräftige Bewertung des Reibwertpotenzials wäre dann nicht mehr gegeben.

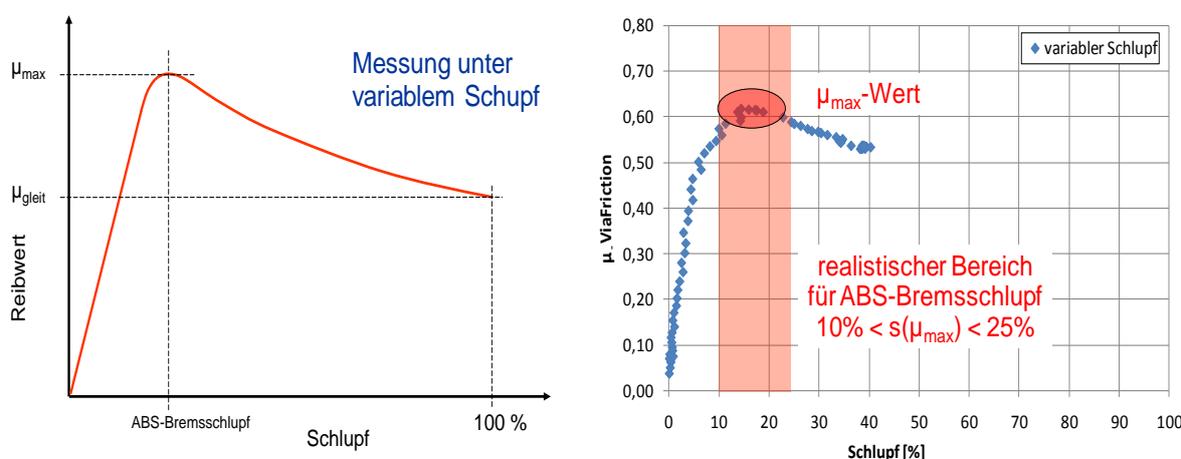


Bild A-12: Vergleich zwischen theoretischer (links) und gemessener  $\mu$ -Schlupf-Kurve (rechts)

Testmessungen mit dem ViaFriction ergaben zwar keine idealtypischen Kurvenverläufe (vgl. Bild A-12, links), jedoch konnte der Bereich, in dem das Reibwertmaximum  $\mu_{\text{max}}$  auftritt, sauber

nachgefahren werden. Abhängig vom Reibniveau der Straße, wurden allerdings für hohe Schlupfwerte nicht immer stabile Verhältnisse angetroffen, so dass die Verwertung dieser Daten zunächst vernachlässigt wurde.

## 1.2 Voruntersuchungen zur grundsätzlichen Funktionsweise

In Vorversuchen für die Messungen im Rahmen dieses Projektes wurden die Betriebsmodi ViaFriction untersucht. Hieraus konnten erste Erkenntnisse bei konstantem und variablem Schlupf abgeleitet werden. Insbesondere wurden dabei die folgenden Fragestellungen untersucht:

- Wird eine Anlaufstrecke für den Schlupfaufbau bei konstantem Schlupf benötigt?
- Welche Mindestlängen der Messabschnitte sind bei Messungen mit variablem Schlupf erforderlich?
- Sind  $\mu$ -Schlupf-Kurven aus Stützstellen (Messungen mit konstantem Schlupf) vergleichbar mit Kurven, die variabel gemessen wurde?
- Wie lassen sich im späteren Messbetrieb  $\mu$ -Schlupf-Kurven generieren?
- Welchen Einfluss hat die Messgeschwindigkeit auf die Ergebnisse von Messungen mit fixem und variablem Schlupf?

Um die Anlaufstrecke für den Schlupfaufbau bei Messungen mit konstanten Schlupfbedingungen ermitteln zu können, wurden auf der Teststrecke des Instituts für Kraftfahrzeugwesen der RWTH Aachen (IKA) im Jahre 2011 Versuche durchgeführt. Dabei wurde ersichtlich, dass sich der Reibungsbeiwert erst nach einer gewissen Anlaufstrecke auf dem „richtigen“ Niveau einpendelte. Die benötigte Anlaufstrecke setzt sich aus der Reaktionsstrecke des Messsystems (Start in der Software und Start des Messgerätes) sowie der Schlupfaufbaustrecke zusammen (s. Bild A-13).

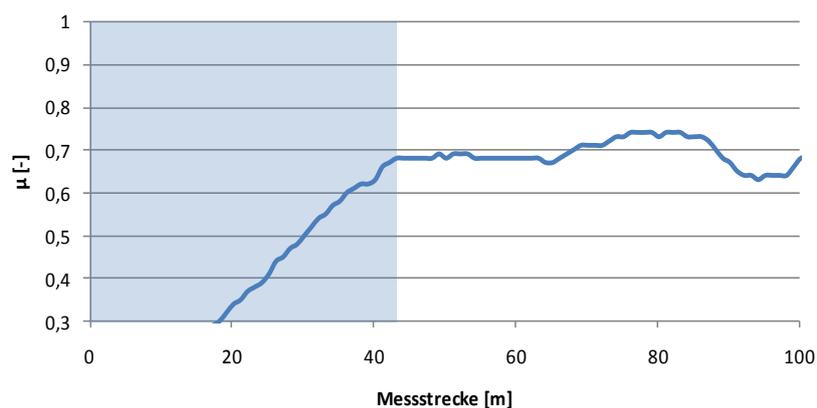


Bild A-13: Exemplarischer Verlauf des Reibwertes (ViaFriction) über der Anlaufstrecke

Die Auswertung bei verschiedenen Messgeschwindigkeiten und verschiedenen Schlupfzuständen machte weiterhin deutlich, dass die benötigte Anlaufstrecke nahezu unabhängig von der Messgeschwindigkeit ist (s. Bild A-14). Allerdings ist die Länge der Anlaufstrecke abhängig von dem angestrebten Schlupfzustand des Messreifens bei der Messung. Dabei gilt: je kleiner der angestrebte Schlupf ist, desto größer ist die benötigte Anlaufstrecke (s. Bild A-15).

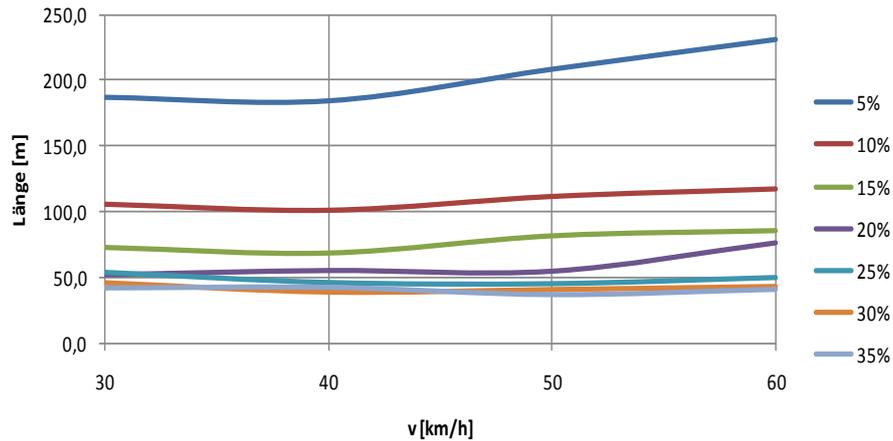


Bild A-14: Anlaufstrecke in Abhängigkeit von der Messgeschwindigkeit

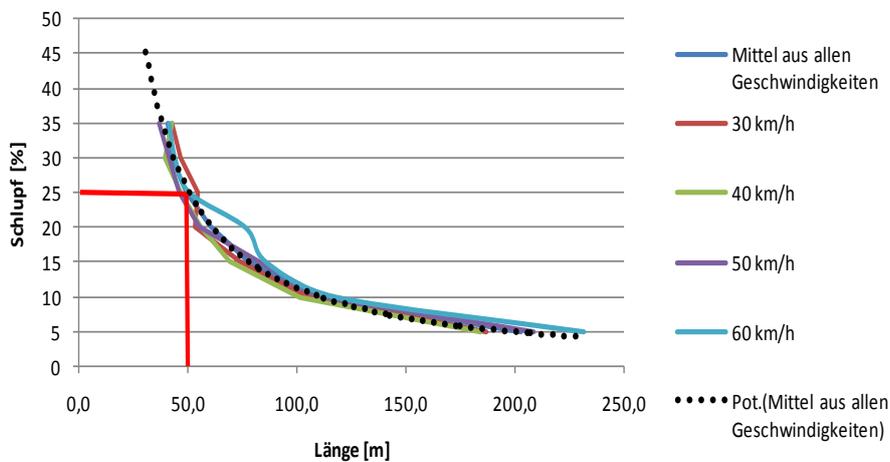


Bild A-15: Benötigte Anlaufstrecke in Abhängigkeit vom angestrebten Schlupfzustand

Im Rahmen einer statistischen Analyse ergab sich für den Zusammenhang im obigen Bild die nachfolgende Regressionsfunktion:

$$Y = 2559 * x^{-1,179} \quad \text{mit} \quad R^2 = 0,997 \quad \text{(Gl. A-1)}$$

### 1.3 Untersuchungen hinsichtlich der Korrekturfaktoren bei abweichenden Messbedingungen

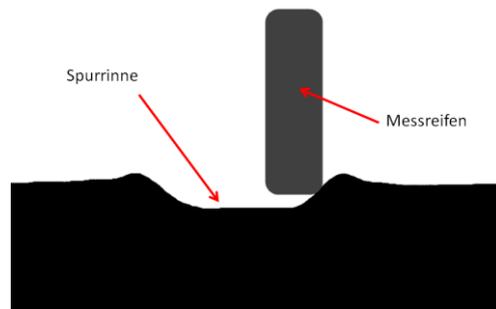
Veränderte Messbedingungen (Temperatur und Geschwindigkeit) können zu abweichenden Messergebnissen bei der Griffigkeitsbeurteilung von Straßenoberflächen führen. Die Verwendung von Temperatur- und Geschwindigkeitskorrekturalgorithmen ist bereits bei den in Deutschland gebräuchlichsten kontinuierlichen Messverfahren, dem GripTester und dem SKM-Messverfahren, in den einschlägigen Normen bzw. Arbeitsanleitungen verankert. Bei dem kontinuierlichen Messverfahren ViaFriction liegen derartige Normen und Arbeitsanleitungen nicht vor, so dass Temperatur- und Geschwindigkeitskorrekturalgorithmen empirisch ermittelt werden mussten. Die Messdaten dafür sind auf homogenen Fahrbahnmarkierungsoberflächen und realen Straßenoberflächen erhoben worden.

### 1.3.1 Festlegung der Oberflächen für die Untersuchungen

Die Grundlage für die Herleitung von Korrekturalgorithmen bilden homogene Untersuchungsstrecken, auf denen die Griffigkeitsmessungen mit dem ViaFriction durchgeführt und deren Messdaten hinsichtlich veränderter Messbedingungen analysiert werden können.

Als Qualitätskriterium für die Homogenität wurden im Rahmen des Vorhabens, in Anlehnung an die Technical Specification des ViaFriction (CEN/TC, 2011), eine Standardabweichung von 0,04 sowie ein Variationskoeffizient von 5 % bezogen auf einen Messabschnitt von 100 m bzw. auf die gesamte Messstrecke angesetzt. Auf diese Weise konnten Inhomogenitäten der Oberfläche identifiziert und entsprechende Abschnitte ausgeschlossen werden.

Weiterhin wurden Kurvenbereiche ausgeklammert, um Einflüsse aus Querbewegungen zu vermeiden, sowie Steigungs- und Gefällestrecken. Des Weiteren war darauf zu achten, dass die Strecken keine Spurrinnen oder auffällige Unebenheiten in Längsrichtung aufwiesen. Spurrinnen können die Kontaktbedingungen des Messreifens und damit den Reibwert beeinflussen (s. Bild A-16). Auffällige Unebenheiten in Längsrichtung, wie wellenförmige Hindernisse, können zu Eigenbewegungen des Messanhängers und damit ebenfalls zu verfälschten Ergebnissen führen.



*Bild A-16: Auswirkungen von Spurrinnen auf die Untersuchungen*

Für die Herleitung der Korrekturalgorithmen war eine große Bandbreite an Griffigkeiten anzustreben. Unter all den vorgenannten Zwangsbedingungen standen im Großraum Aachen aber nur relativ wenige homogene Fahrbahnflächen mit einer zudem geringen Griffigkeitsspanne zur Verfügung.

Da im Rahmen eines anderen Projektes gerade Fahrbahnmarkierungen untersucht wurden (Schacht et al., 2012), wurde entschieden, diese künstlich hergestellten Fahrbahnoberflächen mit in die Versuche einzubeziehen. Auf diese Weise konnte eine große Griffigkeitsspanne von ca. 30 bis 80 SRT-Einheiten realisiert werden.

Während auf den Fahrbahnmarkierungen nur die Geschwindigkeitskorrektur ermittelt wurde, wurde die Untersuchung der Temperaturkorrektur auf realen Straßenoberflächen durchgeführt, da die Temperaturen auf Asphalt sich anders entwickeln als auf den hellen Fahrbahnmarkierungen. Zusätzlich ist es möglich, dass sich Asphalt, wenn er sich erwärmt, auch anders verhält als die Fahrbahnmarkierung.

### 1.3.2 Untersuchungen auf homogenen mikrostrukturierten Fahrbahnmarkierungsflächen

Die im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes verwendeten homogenen Fahrbahnmarkierungsflächen (s. Bild A-17) wurden mit dem ViaFriction bei Messgeschwindigkeiten von 40, 50, 60, 70 und 80 km/h gemessen. Weiterhin wurden Messungen mit dem SRT-Pendelverfahren durchgeführt. Unter den gegebenen Randbedingungen (gezielte Variation des SRT-Wertes zwischen 30 und 80 SRT-Einheiten und der Geschwindigkeit, enge Temperaturspannen) konnten Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses verschiedener Geschwindigkeiten auf die resultierenden Reibwerte des ViaFriction gewonnen werden.

Der ermittelte Zusammenhang zwischen Messgeschwindigkeit, SRT-Wert (Mikrotextur) und Reibwert(ViaFriction) ist in Bild A-19 dargestellt.



Bild A-18: Applikation der Farbmarkierung (links) und fertiges Versuchsfeld in Pier (rechts) (Schacht et al., 2012)

Rank 21 Eqn 1  $z=a+bx+cy$   
 $r^2=0.90913945$  DF Adj  $r^2=0.90833061$  FitStdErr=0.050179196 Fstat=1690.9932  
 $a=0.14170398$   $b=-0.0041474355$   
 $c=0.011711955$

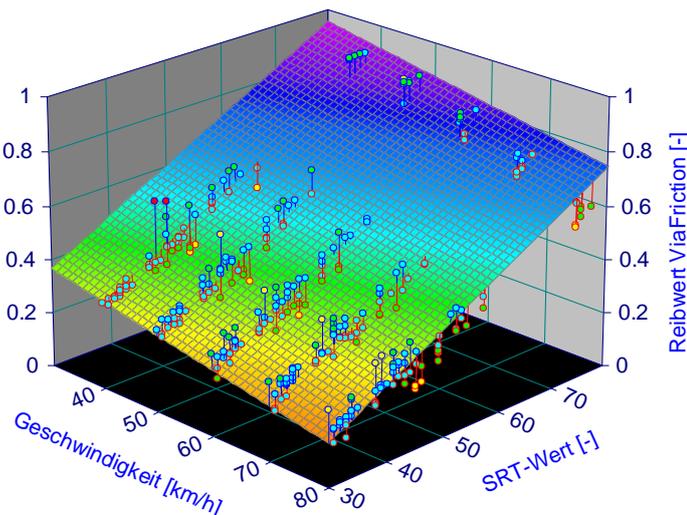


Bild A-19: Zusammenhang ViaFriction und SRT-Pendelverfahren bei verschiedener Fahrgeschwindigkeit

Demgemäß ergibt sich nachfolgender Zusammenhang zwischen Reibwert, SRT-Wert bzw. Mikrotextur und Messgeschwindigkeit:

$$\mu = 0,142 + 0,012 * SRT - 0,004 * v$$

(Gl. A-2)

mit:

$\mu$ : Reibwert ViaFriction [-]

SRT: SRT-Wert in [SRT-Einheiten]

v: Messgeschwindigkeit in [km/h]

### 1.3.3 Untersuchungen auf realen Fahrbahnoberflächen

Auf Basis des zuvor entwickelten Geschwindigkeitskorrekturalgorithmus wurden die weiteren Messungen zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf realen Fahrbahnoberflächen durchgeführt. Folgende Einschränkungen waren dabei in Kauf zu nehmen:

- Die Oberflächen- und Umgebungstemperatur ist nicht direkt zu beeinflussen. Lediglich durch die Wahl der Tageszeit kann eine gewisse Variation dieser beiden Temperaturen erreicht werden.
- Die Reifentemperatur ist ebenfalls nicht direkt beeinflussbar, da diese sowohl von der Oberflächentemperatur als auch von dem Schlupfzustand und der Wassertemperatur beeinflusst wird. Lediglich eine indirekte Beeinflussung über die Wassertemperatur ist zu einem gewissen Grade möglich.
- Lediglich die Wassertemperatur ist relativ einfach variierbar. Dementsprechend wurde diese im durch Zugabe von warmem Wasser auf 42°C gesteigert bzw. durch die Zugabe von Eis auf eine minimale Temperatur von 5°C reduziert. Innerhalb dieses Temperaturfensters erfolgte eine weitere Variation der Wassertemperatur.

Die ausgewählte Messstrecke, die L 366 zwischen der K5 und der L226 in der Nähe von Hompesch, wurde für die Untersuchungen zur Entwicklung der Temperaturalgorithmen in 11 gleichmäßige Teilabschnitte mit einer Länge von jeweils 100m aufgeteilt. Je Abschnitt wurden insgesamt 440 Messungen bei verschiedenen Temperaturen und Tageszeiten durchgeführt. Insgesamt stand somit eine Datenbasis von 4840 Messdatensätzen zur Verfügung. Die Messungen wurden mit einer standardmäßigen Messgeschwindigkeit von 60 km/h sowie einem Schlupf von 20 % durchgeführt. Vor der weiteren statistischen Auswertung der Messdaten erfolgte eine Filterung der Messdaten, um etwaige fehlerhafte Werte bzw. von der Messgeschwindigkeit beeinflusste Reibwerte auszuschließen.

Im ersten Schritt der Analyse wurden die verbleibenden Messdaten einer partiellen Korrelationsanalyse unterzogen. Nachfolgend sind die Ergebnisse dieser Analyse beispielhaft für den Abschnitt 1 dargestellt (s. Tabelle A-4).

Die partielle Korrelationsanalyse zeigt, dass insbesondere zwischen der Lufttemperatur TA und der Wassertemperatur TW ein Zusammenhang mit dem Reibwert  $\mu_{VF60-20}$  besteht. Diesbezüglich können Korrelationsfaktoren von -0,674 bei der Lufttemperatur und -0,757 bei der Wassertemperatur in dem dargestellten Abschnitt festgestellt werden. Die Vorzeichen der Korrelationsfaktoren zeigen einen aus der Literatur bekannten Zusammenhang auf. Demnach lässt eine höhe-

re Lufttemperatur sowie eine höhere Wassertemperatur eher niedrigere Reibwerte bei kontinuierlichen Messverfahren erwarten. Dies ist, wie oben dargestellt, auch hier der Fall.

Tabelle A-4: Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse für Abschnitt 1

Kontrollvariablen		TA	TO	TW	TR	$\mu_{VF60-20}$	
v	TA	Korrelation		,940	,441	,571	-,674
		Signifikanz (zweiseitig)		,000	,000	,000	,000
	TO	Korrelation	,940		,323	,510	-,546
		Signifikanz (zweiseitig)	,000		,009	,000	,000
	TW	Korrelation	,441	,323		,203	-,757
		Signifikanz (zweiseitig)	,000	,009		,108	,000
	TR	Korrelation	,571	,510	,203		-,437
		Signifikanz (zweiseitig)	,000	,000	,108		,000
	$\mu_{VF60-20}$	Korrelation	-,674	-,546	-,757	-,437	
		Signifikanz (zweiseitig)	,000	,000	,000	,000	

mit:

TA: Lufttemperatur in °C

TO: Oberflächentemperatur in °C

TW: Wassertemperatur in °C

TR: Reifentemperatur in °C

$\mu_{VF60-20}$ : Reibwert bei 60 km/h und 20% Schlupf

Demgegenüber können die Zusammenhänge zwischen der Reifentemperatur TR und dem Reibwert bzw. der Oberflächentemperatur TO und dem Reibwert nicht für weitere Auswertungen herangezogen werden, da diese nicht als unabhängige Korrelationsfaktoren vorliegen, sondern vielmehr insbesondere von der Lufttemperatur (vgl. Tabelle A-4) beeinflusst werden. Dies ist vor allem bei der Oberflächentemperatur festzustellen (Korrelationsfaktor: + 0,940). Die partiellen Korrelationsanalysen der anderen Abschnitte zeigten vergleichbare Ergebnisse bzw. Zusammenhänge, so dass bei der weiteren Auswertung die Einflüsse aus Oberflächentemperatur und Reifentemperatur nicht weiter berücksichtigt wurden.

Bei der statistischen Auswertung der Messdaten unter Berücksichtigung der mit der partiellen Korrelationsanalyse festgestellten Einflussfaktoren wird von nachfolgendem Zusammenhang ausgegangen:

$$\mu_{(korrigiert)} = \mu_{(mess)} + a * (TA - 20) + b * (TW - 20) \quad (\text{Gl. A-3})$$

mit:

$\mu_{(korrigiert)}$ : temperaturkorrigierter Reibwert

$\mu_{(mess)}$ : Messwert

a, b: Regressionskoeffizienten

Um die Regressionsfaktoren a und b der o.g. Grundformel bestimmen zu können, bedarf es vorab der Kenntnis der Referenzreibwerte unter Standardtemperaturen, die in Anlehnung an die Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem LFC-Messverfahren (GripTester) zu jeweils

20°C gewählt wurden. Das heißt, der Referenzreibwert wird als der Reibwert bei einer Wassertemperatur von 20°C und einer Lufttemperatur von 20°C definiert.

Die Grundlage für die Bestimmung der Referenzreibwerte bildet die Regressionsanalyse der gefilterten Daten der einzelnen Abschnitte unter Verwendung des nachfolgenden Ansatzes:

$$\mu_{(Referenz)} = c * TA + d * TW + e \quad (\text{Gl. A-4})$$

mit:

$\mu_{(Referenz)}$ : Referenzreibwert

c, d, e: Regressionskoeffizient

Hierdurch konnten unter Berücksichtigung der gewählten Standardtemperaturen sowie der berechneten Regressionskoeffizienten die Referenzreibwerte jedes Abschnittes bestimmt werden (vgl. Tabelle A-5).

*Tabelle A-5: Ergebnisse der abschnittswisen Regressionsanalyse*

Abschnitt	Koeffizienten				Signifikanz	n	$\mu_{(Referenz)}$
	c	d	e	R <sup>2</sup>			
1	-0,00680	-0,01023	0,90419	0,71671	0,00000	65	0,564
2	-0,00350	-0,01413	0,87578	0,71117	0,00000	75	0,484
3	-0,00511	-0,00743	0,81010	0,53597	0,00000	137	0,559
4	-0,00316	-0,02101	1,00052	0,83232	0,00000	79	0,516
5	-0,00593	-0,00987	0,88339	0,56497	0,00000	118	0,567
6	-0,00495	-0,00894	0,85093	0,50743	0,00000	106	0,573
7	-0,00349	-0,01063	0,81878	0,56582	0,00000	136	0,536
8	-0,00527	-0,00652	0,78784	0,50333	0,00000	145	0,552
9	-0,00440	-0,00438	0,72933	0,41531	0,00000	143	0,554
10	-0,00379	-0,00540	0,72943	0,48700	0,00000	112	0,544
11	-0,00354	-0,00762	0,76860	0,44320	0,00000	91	0,544

Weiterhin ergibt sich hierdurch die Möglichkeit, die temperaturinduzierten Reibwertdifferenzen  $\Delta\mu$  für die 11 Messabschnitte zu berechnen. Dies macht eine gemeinsame Auswertung aller Messabschnitte, unabhängig vom jeweiligen Reibwertniveau, möglich, da nicht mehr die absoluten Reibwerte sondern vielmehr nur noch die temperaturinduzierten Reibwertdifferenzen vom Referenzreibwert betrachtet werden. Die Größe dieser Differenz ist nur auf veränderte Temperaturen, d.h. veränderte Luft- und/oder Wassertemperaturen, zurückzuführen. Das Reibwertniveau des jeweiligen Abschnittes spielt hierbei keine Rolle.

$$\Delta\mu = \mu_{(Mess)} - \mu_{(Referenz)} \quad (\text{Gl. A-5})$$

mit:

$\mu_{(Mess)}$ : Messwert ViaFriction

$\mu_{(Referenz)}$ : Referenzwert

$\Delta\mu$ : temperaturinduzierte Reibwertdifferenz

Verwendet man nun diese temperaturinduzierte Reibwertdifferenz für die statistische Analyse mittels der Regressionsanalyse ergibt sich nachfolgender Zusammenhang zwischen Lufttemperatur, Wassertemperatur und Reibwertdifferenz über alle 11 Messabschnitte (s. Bild A-20):

$$\Delta\mu = 0,00595 * (TA - 20) + 0,00809 * (TW - 20) \quad \text{mit} \quad R^2 = 0,518 \quad (\text{Gl. A-6})$$

mit:

$\Delta\mu$ : temperaturinduzierte Reibwertdifferenz

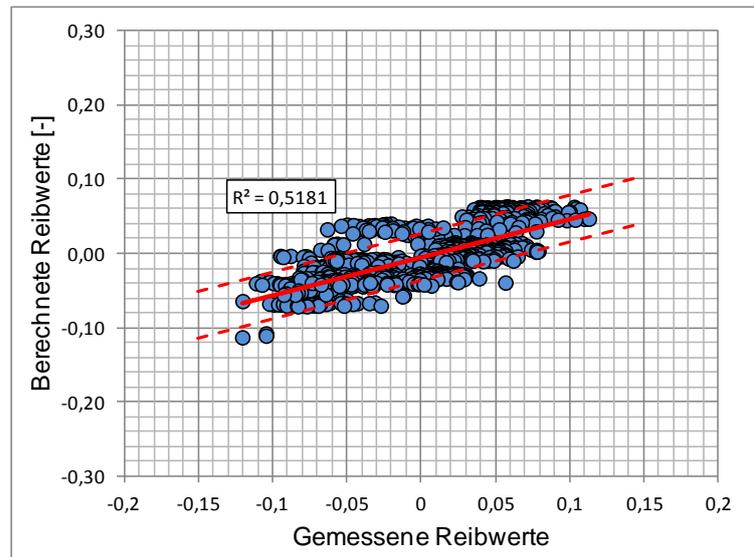


Bild A-20: Korrelation zwischen gemessenem und gerechnetem Reibwert (ViaFriction) mit dazugehörigen Vertrauensbändern

### 1.3.4 Fazit

Unter Berücksichtigung des festgestellten Temperatur- und Geschwindigkeitseinflusses auf den Reibwert ergibt sich nachfolgender Gesamtkorrekturalgorithmus für das kontinuierliche Griffigkeitsmesssystem ViaFriction:

$$\mu_{(\text{korrigiert})} = \mu_{(\text{mess})} + \Delta\mu_T + \Delta\mu_v \quad (\text{Gl. A-7})$$

$$\mu = \mu_{(\text{mess})} + 0,00595 * (TA - 20) + 0,0081 * (TW - 20) + 0,004 * (v - 60) \quad (\text{Gl. A-8})$$

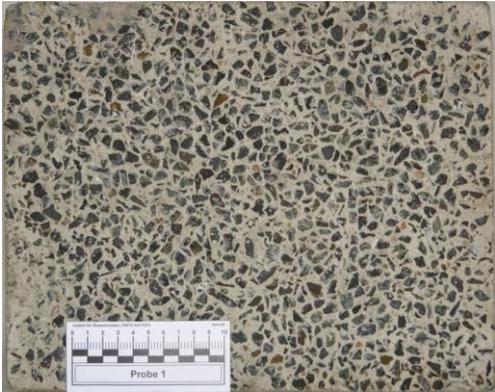
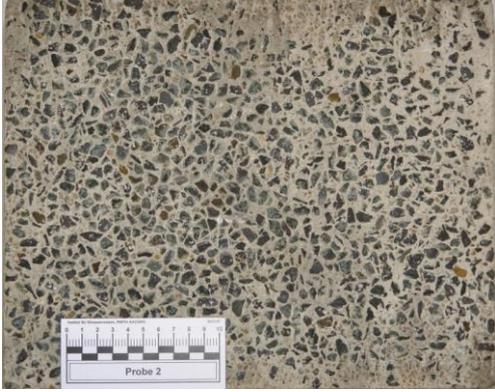
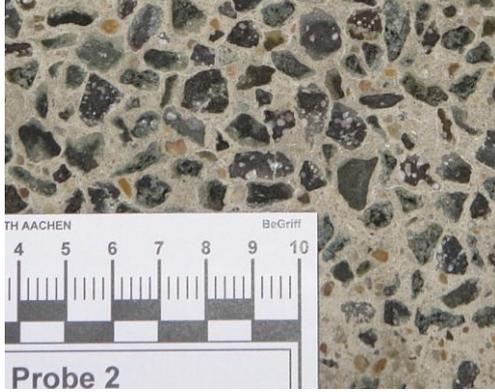
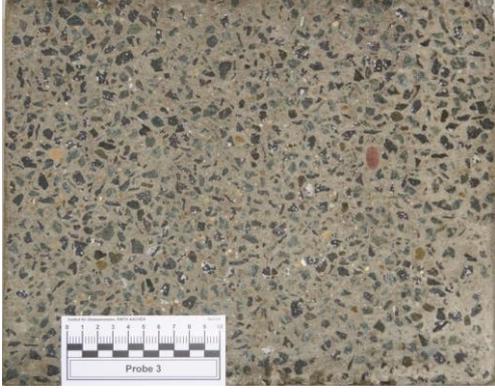
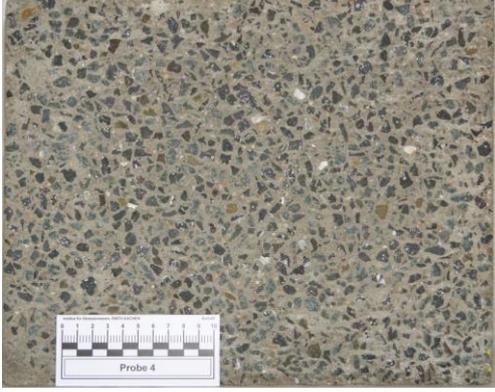
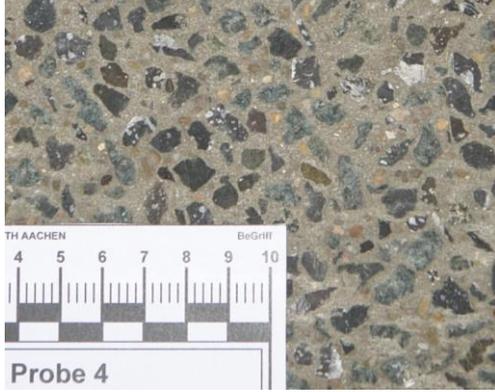
mit:

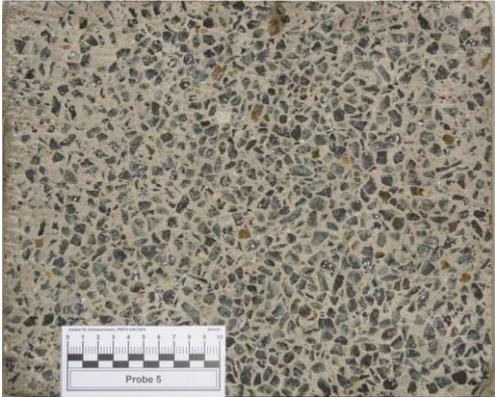
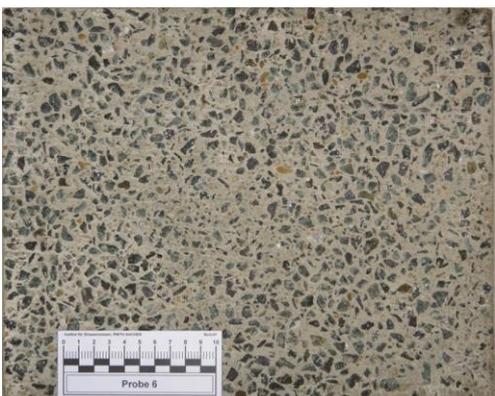
$\mu_{(\text{Mess})}$ : Messwert (ViaFriction)

v: Messgeschwindigkeit in km/h

Dieser Gesamtkorrekturalgorithmus für die Messergebnisse des ViaFriction ermöglicht eine vergleichende Betrachtung der Reibwerte unter verschiedenen Geschwindigkeits- und Temperaturbedingungen. Damit können von den Standardbedingungen abweichende Messgeschwindigkeiten und Messtemperaturen in der weitergehenden Auswertung gebührend berücksichtigt werden.

## Anhang 2: Fotodokumentation der Oberflächenproben (Serie 1)

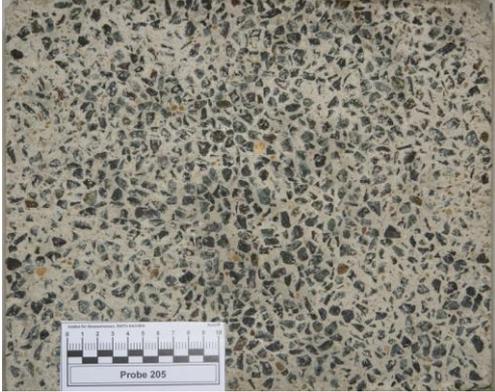
Nr.	Gesamtansicht	Detailansicht
BG 001 (Beton)		
BG 002 (Beton)		
BG 003 (Beton)		
BG 004 (Beton)		

<p>BG 005 (Beton)</p>		
<p>BG 006 (Beton)</p>		
<p>BG 024 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 025 (Asphaltbeton)</p>		

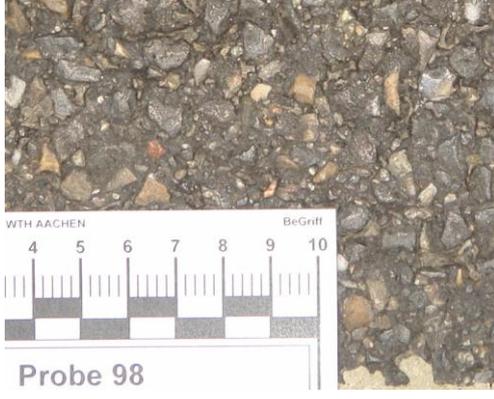
<p>BG 026 (Asphaltbeton)</p>	 <p>Probe 26</p>	 <p>WTH AACHEN BeGriff 4 5 6 7 8 9 10 Probe 26</p>
<p>BG 027 (Asphaltbeton)</p>	 <p>Probe 27</p>	 <p>WTH AACHEN BeGriff 4 5 6 7 8 9 10 Probe 27</p>
<p>BG 028 (Asphaltbeton)</p>	 <p>Probe 28</p>	 <p>WTH AACHEN BeGriff 4 5 6 7 8 9 10 Probe 28</p>
<p>BG 029 (Asphaltbeton)</p>	 <p>Probe 29</p>	 <p>WTH AACHEN BeGriff 4 5 6 7 8 9 10 Probe 29</p>

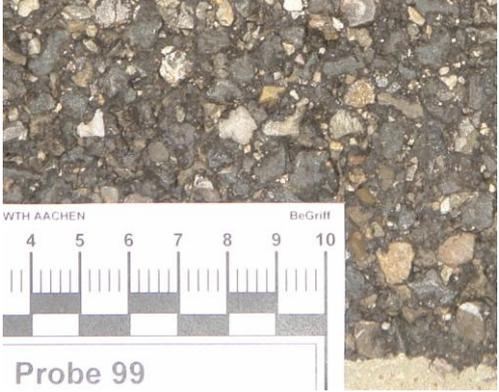
<p>BG 071 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 076 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 077 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 078 (Asphaltbeton)</p>		

<p>BG 129 (SMA)</p>		
<p>BG 142 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 147 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 204 (Beton)</p>		

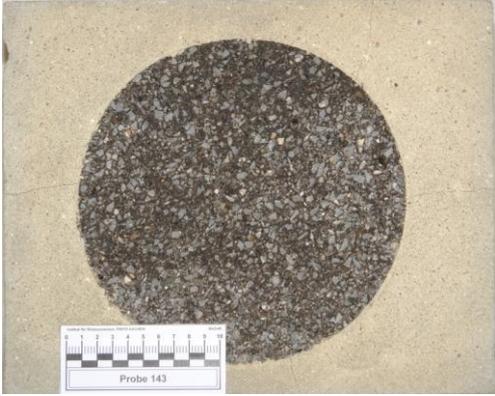
<p>BG 205 (Beton)</p>		
<p>BG 209 (Beton)</p>		

### Anhang 3: Fotodokumentation der Oberflächenproben (Serie 2)

Nr.	Gesamtansicht	Detailansicht
BG 070 (Asphaltbeton)		
BG 073 (Asphaltbeton)		
BG 075 (Asphaltbeton)		
BG 098 (Asphaltbeton)		

<p>BG 099 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 100 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 101 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 102 (Asphaltbeton)</p>		

<p>BG 103 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 120 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 130 (SMA)</p>		
<p>BG 138 (Asphaltbeton)</p>		

<p>BG 139 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 140 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 141 (Asphaltbeton)</p>		
<p>BG 143 (Asphaltbeton)</p>		

BG 144  
(Asphaltbeton)



BG 145  
(Asphaltbeton)



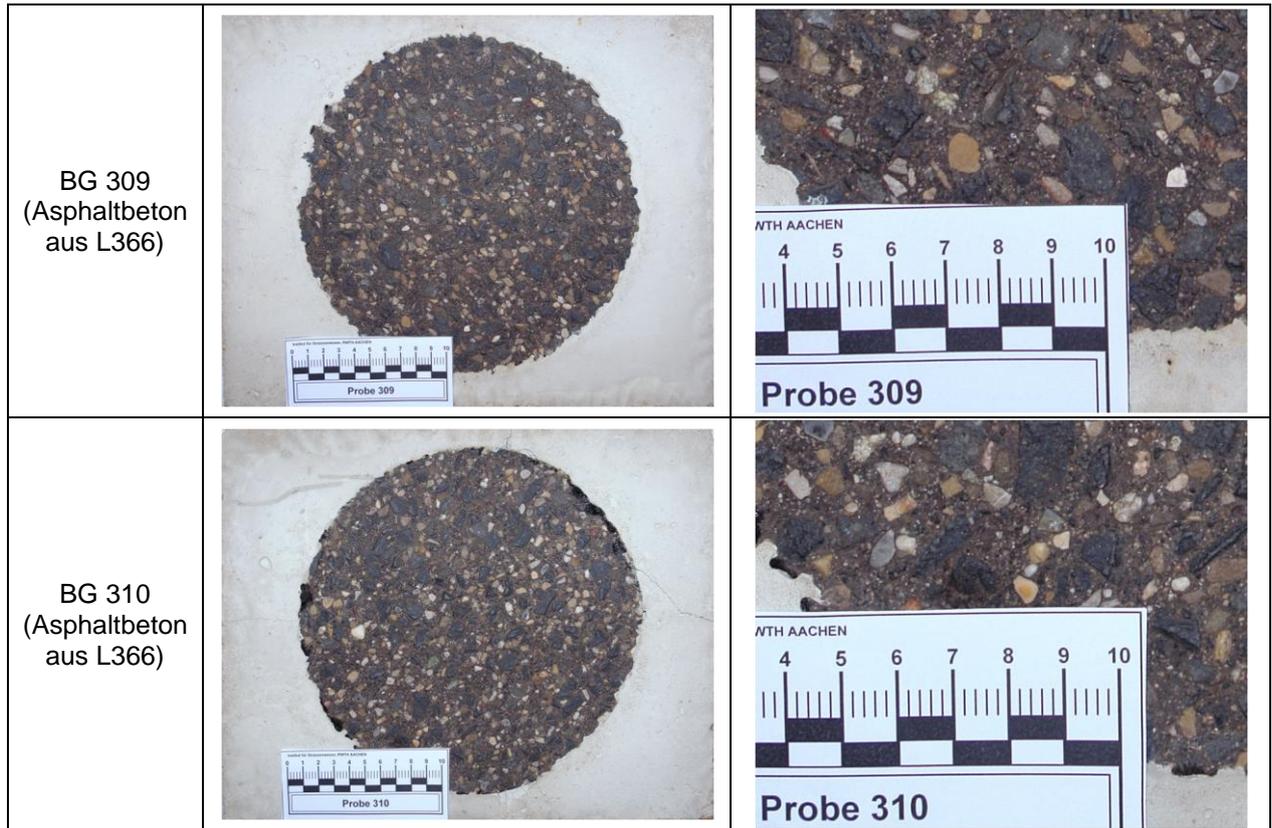
BG 146  
(Asphaltbeton)



**Anhang 4: Fotodokumentation der Oberflächenproben (Probekörper aus den Versuchsstrecken für ViaFriction-Messungen)**

<p>BG 301 (SMA aus B56)</p>	 <p>Probe 301</p>	 <p>WTH AACHEN 4 5 6 7 8 9 10 Probe 301</p>
<p>BG 302 (SMA aus B56)</p>	 <p>Probe 302</p>	 <p>WTH AACHEN 4 5 6 7 8 9 10 Probe 302</p>
<p>BG 303 (SMA aus B56)</p>	 <p>Probe 303</p>	 <p>WTH AACHEN 4 5 6 7 8 9 10 Probe 303</p>
<p>BG 304 (SMA aus B56)</p>	 <p>Probe 304</p>	 <p>WTH AACHEN 4 5 6 7 8 9 10 Probe 304</p>

<p>BG 305 (SMA aus B55)</p>		
<p>BG 306 (SMA aus B55)</p>		
<p>BG 307 (Asphaltbeton aus L366)</p>		
<p>BG 308 (Asphaltbeton aus L366)</p>		



## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Berührungslose Griffigkeitsmessung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Steinauer, Bernhard; Oeser, Markus; Wang, Dawei; Ueckermann, Andreas; Schulze, Christian; Schacht, Andreas; Meyer, André; Schmidt, Stefan; Chen, Xianhua	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30. April 2012
	6. Veröffentlichungsdatum November 2012
	7. Form der Publikation Buch
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19 S 11002
	11. Seitenzahl 160 mit Anhang
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 100
	14. Tabellen 28
	15. Abbildungen 98
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Alle Straßenbaulastträger (Bund, Länder und Kommunen) haben im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht periodisch die Griffigkeit ihrer Straßen zu überprüfen. Hierfür kommt in Deutschland gegenwärtig das Seitenkraftmessverfahren (SKM) zum Einsatz, das teuer ist und einer Vielzahl schwer kontrollierbarer Einflussgrößen unterliegt. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es daher, ein neues berührungsloses Messverfahren zu entwickeln, das aus folgenden Komponenten besteht: (1) Berührungslose Messung der Fahrbahntextur mittels eines optischen Sensors und (2) Reibwertbestimmung auf Basis der Textur und eines geeigneten Rechenalgorithmus'. Basierend auf umfassenden Textur- und Griffigkeitsmessungen an Oberflächenproben aus Asphalt und Beton wurden vier verschiedene Ansätze entwickelt: ein Texturparametermodell, ein Gummireibungsmodell, ein Ansatz über die Spektrale Leistungsdichte und ein Künstliches Neuronales Netzwerk. Der Vergleich mit Griffigkeitsmessungen ergab, dass die Griffigkeit mithilfe der entwickelten Verfahren mit hoher Genauigkeit ( $\sigma(\mu) = 0,02$ , $R^2 = 0,97$ ) aus den Texturdaten berechnet werden konnte. Damit ist die Genauigkeit bereits vergleichbar mit der Genauigkeit herkömmlicher, berührender Verfahren. Die Ergebnisse stellen einen wichtigen Grundstein für die Entwicklung der „Berührungslose Griffigkeitsmessung“ dar.	
19. Schlagwörter Griffigkeit, Gummireibung, Reibwert, Textur, Fahrbahnoberflächen, Griffigkeitsmessung	
20. Verlag TIB Hannover	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title  Non-Contact Skid Resistance Measurement	
4. author(s) (family name, first name(s)) Steinauer, Bernhard; Oeser, Markus; Wang, Dawei; Ueckermann, Andreas; Schulze, Christian; Schacht, Andreas; Meyer, André; Schmidt, Stefan; Chen, Xianhua	5. end of project April 30, 2012
	6. publication date November 2012
	7. form of publication Book
8. performing organization(s) (name, address) Institute of Road and Traffic Engineering, RWTH Aachen University Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen	9. originator's report no.
	10. reference no. 19 S 11002
	11. no. of pages 160 incl. annex
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 100
	14. no. of tables 28
	15. no. of figures 98
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The skid resistance of road surfaces is playing a crucial role for road safety and therefore also is of economical importance. All road authorities (federal, state and local governments) have to periodically survey the skid resistance in the road network. In Germany this is done using the sideways-force measurement system (SKM), which is expensive and subjected to many factors hardly to control. The aim of this research project is therefore to develop a new non-contact measurement method, consisting of the following components: (1) Non-contact measurement of surface texture using an optical sensor, and (2) Computation of the coefficient of friction based on the measured texture data. Based on extensive texture and skid resistance measurements of asphalt and concrete surface samples four different models have been developed: a texture parameter model, a rubber friction model, an approach based on the power spectral density and a Neural Network approach. In comparison with skid resistance measurements high accuracy of the developed methods could be observed (coefficient of determination between measured and calculated friction coefficient = 0.97, variance of the calculated friction coefficient = 0.02). The accuracy hence is comparable to that of conventional skid resistance measurements. By the outcome of the project a foundation for the Non-Contact Skid Resistance Measurement could be laid.	
19. keywords skid resistance, rubber friction, friction coefficient, texture, road surface, skid resistance measurement	
20. publisher	21. price