

Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 78

bast

Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren

von

Matthias Bürckert
Frank Gauterin
Hans-Joachim Unrau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 78

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die Berichte der BAST zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de/benutzung.php?la=de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 84.0104/2009:
Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren

Projektbetreuung
Börge Wasser

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-86918-269-8

Bergisch Gladbach, : [pember 2012

Kurzfassung – Abstract

Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren

In diesem Bericht werden die Ergebnisse des Forschungsprojektes FE 84.0104/2009/ mit dem Titel „Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren“, das am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) durchgeführt wurde, vorgestellt. Dieses Forschungsprojekt hatte das Ziel, den Einfluss der Grobtextur (Makrotextur) auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit und Temperaturabhängigkeit des SKM-Griffigkeitswertes zu untersuchen.

Es wird die Funktionsweise des am Institut entwickelten und aufgebauten Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) erklärt. Mit diesem Prüfstand können Griffigkeitsversuche auf Fahrbahnproben durchgeführt werden.

Weiterhin wird ein neu entwickeltes Abdruckverfahren für die Herstellung von Fahrbahnabdrücken vorgestellt. Mit diesem können Fahrbahnabdrücke von realen Fahrbahnproben erzeugt werden. Durch eine Erweiterung des vorgestellten Abdruckverfahrens können des Weiteren Fahrbahnproben mit definierten künstlichen Makro- und künstlichen Mikrotexturen erzeugt werden. Somit können am GAT Griffigkeitsversuche auf realen Fahrbahnproben, aber auch auf speziell hergestellten Fahrbahnabdrücken durchgeführt werden.

Mit der Kombination aus GAT und dem vorgestellten Abdruckverfahren kann der Einfluss der Fahrbahngrobtextur auf die Griffigkeit unabhängig vom Materialeinfluss betrachtet werden.

Abschließend werden die Ergebnisse der Griffigkeitsversuche, die am Griffigkeits- und Abriebprüfstand durchgeführt wurden, vorgestellt. Diese Ergebnisse werden mit Griffigkeitsversuchen am Innentrommelprüfstand des Institutes und mit SKM-Messdaten, die mit einem SKM-Messsystem auf der Straße gemessen wurden, verifiziert.

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit von der Fahrbahnmakrotextur beeinflusst wird. Zusätzlich muss jedoch

auch der Einfluss der Fahrbahnmikrotextur berücksichtigt werden, da immer die Kombination aus Makro- und Mikrotextur für die Geschwindigkeitsabhängigkeit von Bedeutung ist.

Der Einfluss der Fahrbahnmakrotextur auf die Temperaturabhängigkeit des SKM-Wertes konnte innerhalb dieses Forschungsprojektes nicht abschließend untersucht werden, da bei den durchgeführten Griffigkeitsversuchen am GAT mit den verwendeten Fahrbahnabdrücken Temperatureffekte auftraten, die zukünftig noch weiter analysiert werden müssen.

Analysis of the influence of the surface macro texture on the measurement results of the SKM-System

In this report the results of the research project FE 84.0104/2009/ „Analysis of the influence of the surface macro texture on the measurement results of the SKM-System“ initiated by the Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) and conducted by the Institute of Vehicle System Technology, Karlsruhe Institute of Technology (KIT) are presented. The objective of this research project was to characterize the influence of the macro texture on the speed-dependency and the temperature-dependency of the SKM results.

The function of the Grip and Abrasion Tester (GAT) designed and constructed at the Institute is described. With this test stand the grip characteristics of road samples can be analyzed.

Furthermore an innovative cast-method for the creation of samples with road surface textures is presented. This method can be used to produce clones of existing road samples. The cast-method was additionally updated to build samples with defined macro- and micro texture. The road samples and the produced casts can be analyzed at the GAT.

The combination of GAT and the cast-method allows an observation of the influence of the macro texture on the grip independent from the influence of the material.

Finally results of friction tests are presented and discussed. The results are verified with measurements from the innerdrum testrig and road-measurements with a real SKM-System.

Results show that speed-dependency is influenced by surface macro texture. Furthermore the micro texture has to be considered, because the combination of macro and micro texture is essential.

Caused by usage of surface casts unknown temperature effects appeared. Therefore the influence of macro texture on temperature-dependency on SKM results couldn't be finally analyzed in this research project.

Inhalt

| | | | | | |
|----------|--|----|----------|--|----|
| 1 | Problemstellung und Zielsetzung . . . | 7 | 5.2 | Herstellung von Fahrbahnabdrücken mit realen Fahrbahntexturen | 28 |
| 2 | Allgemeine Grundlagen | 7 | 5.2.1 | Ausrichtung und Einbettung des Originalbohrkerns | 28 |
| 2.1 | SKM-Messverfahren | 8 | 5.2.2 | Herstellung des Negativabdrucks | 28 |
| 2.1.1 | Messprinzip | 8 | 5.2.3 | Herstellung des Positivabdrucks | 29 |
| 2.1.2 | Messwertkorrekturen | 8 | 5.2.4 | Abbildungsgenauigkeit | 29 |
| 2.2 | Fahrbahndeckschichten | 9 | 5.2.5 | Vor- und Nachteile | 31 |
| 2.2.1 | Asphaltdeckschichten | 9 | 5.3 | Herstellung von Proben mit künstlichen Fahrbahntexturen | 31 |
| 2.2.2 | Fahrbahndecken aus Beton | 9 | 5.3.1 | Problemstellung | 31 |
| 2.2.3 | Griffigkeitsgrenzwerte | 10 | 5.3.2 | Lösungsansatz | 31 |
| 2.3 | Rauheit/Textur | 10 | 5.3.3 | Herstellung von Fahrbahnproben mit unterschiedlicher Makrotextur | 31 |
| 2.4 | Hypothesen zur Gummireibung | 11 | 5.3.4 | Herstellung von Proben mit unterschiedlicher Mikrotextur | 33 |
| 2.4.1 | Reibmechanismen | 11 | 5.3.5 | Fazit | 34 |
| 2.5 | Einflussgrößen auf den Reibbeiwert | 13 | 5.4 | Charakterisierung der Fahrbahnprobenoberflächen | 34 |
| 2.6 | Bisherige Untersuchungen zum Themengebiet | 17 | 5.4.1 | Sandfleckverfahren | 34 |
| 3 | Untersuchungsmethodik | 18 | 5.4.2 | Texturmessgerät „ELAtextur®“ | 35 |
| 4 | Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) | 20 | 5.4.3 | Ausflussmesser nach Moore | 37 |
| 4.1 | Abriebprüfstand | 20 | 5.4.4 | Vergleich der Makrotexturwerte | 38 |
| 4.1.1 | Prüfstandaufbau | 20 | 5.4.5 | SRT-Messung | 39 |
| 4.1.2 | Einstell- und Messmöglichkeiten | 21 | 5.4.6 | SRT _{GAT} -Messung | 41 |
| 4.2 | Griffigkeits- und Abriebprüfstand | 21 | 5.4.7 | Vergleich der Mikrotexturwerte | 42 |
| 4.2.1 | Prüfstandaufbau | 21 | 5.4.8 | Optische Vermessung der Originalfahrbahntexturen (flächenhafte Vermessung) | 44 |
| 4.2.2 | Sicherheitskonzept | 24 | 5.5 | Fazit | 45 |
| 4.2.3 | Messsystem | 24 | 6 | Vorversuche am Innentrommelprüfstand (IPS) | 46 |
| 4.2.4 | Einstell- und Messmöglichkeiten | 25 | 6.1 | Bestimmung des Gleitschlupfes | 46 |
| 5 | Auswahl und Herstellung der Prüfkörper (Fahrbahnproben) | 26 | 6.1.1 | Fahrbahnbelag | 46 |
| 5.1 | Bohrkerne aus existierenden Fahrbahndeckschichten | 26 | 6.1.2 | Versuchsplan | 47 |
| 5.1.1 | Bohrkernübersicht | 27 | 6.1.3 | Ergebnisse | 48 |
| 5.1.2 | Problemstellung bei der Verwendung von realen Fahrbahnbohrkernen | 27 | | | |

| | | | | |
|------------------------|---|----|---------------|---|
| 7 | Vorversuche am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) | 50 | Anhang | |
| 7.1 | Einfluss der Wasseraufbringung und Wasserausflussmenge | 50 | Anhang I: | Vorhandene Fahrbahnproben |
| 7.1.1 | Position der Wasseraufbringung | 50 | Anhang II: | Übersicht der verfügbaren realen Fahrbahntexturen |
| 7.1.2 | Düsenform | 50 | Anhang III: | Übersicht der verfügbaren künstlichen Fahrbahntexturen |
| 7.1.3 | Ermittlung der tatsächlichen Höhe des Wasserfilms | 51 | Anhang IV: | Tabellarische Daten zur Fahrbahncharakterisierung |
| 7.1.4 | Einfluss der Wassermenge | 51 | Anhang V: | SRT-Verläufe der Originalbohrkerne |
| 7.2 | Fahrbahnverschleiß | 52 | Anhang VI: | Auswertung des Bohrkerns 4 mit der Software μ soft-Analysis Premium |
| 7.3 | Einfluss der Prüfstandsteifigkeit | 52 | Anhang VII: | Tabellarische Daten zu Vorversuchen am Innentrommelprüfstand |
| 8 | Griffigkeitsmessungen | 54 | Anhang VIII: | Bestimmung des Gleitschlupfanteils am Innentrommelprüfstand |
| 8.1 | Griffigkeitsmessungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) | 54 | Anhang IX: | Einfluss der Prüfstandsteifigkeit auf Griffigkeitsergebnisse |
| 8.1.1 | Versuchsplan | 54 | Anhang X: | Übersicht der Griffigkeitsergebnisse (GAT) |
| 8.1.2 | Versuchsdurchführung | 55 | Anhang XI: | Übersicht der Griffigkeitsergebnisse (IPS) |
| 8.1.3 | Versuchsergebnisse der Griffigkeitsversuche auf Kunstharzabdrücken von realen Fahrbahntexturen | 55 | Anhang XII: | Einfluss der Wassertemperatur auf die Griffigkeitsergebnisse am IPS |
| 8.1.4 | Versuchsergebnisse der Griffigkeitsversuche auf künstlichen Fahrbahntexturen | 58 | | |
| 8.1.5 | Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit und der Fahrbahngrobtextur | 59 | | Diese Anhänge liegen dem Bericht als CD bei. |
| 8.2 | Griffigkeitsmessungen am Innentrommelprüfstand (IPS) | 60 | | |
| 8.2.1 | Versuchsplan | 60 | | |
| 8.2.2 | Versuchsdurchführung | 61 | | |
| 8.2.3 | Versuchsergebnisse | 61 | | |
| 9 | Griffigkeitsmessungen mit einem realen SKM-System | 63 | | |
| 10 | Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren | 65 | | |
| 11 | Zusammenfassung und Ausblick ... | 66 | | |
| Literatur | | 68 | | |

1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Seitenkraftmessverfahren (SKM) ist ein Messverfahren, mit welchem die Griffigkeit von Fahrbahn-deckschichten ermittelt wird. Der genaue Verfahrensablauf ist in den Technischen Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM) [TP Griff-StB (SKM)] beschrieben. Der ermittelte Messwert, welcher geschwindigkeitsabhängig ist, ermöglicht die Beurteilung der Griffigkeit von nassen Fahrbahn-oberflächen.

Die Soll-Messgeschwindigkeit beträgt beim SKM-Verfahren 40, 60 oder 80 km/h. Da die SKM-Messung im fließenden Verkehr durchgeführt wird, kann die gewählte Soll-Messgeschwindigkeit nicht immer exakt eingehalten werden. Um diese Abweichungen, beispielsweise anstatt 60 km/h nur 57 km/h, zwischen der tatsächlichen Messgeschwindigkeit und der Soll-Messgeschwindigkeit berücksichtigen zu können, wird bei der Versuchsauswertung eine Geschwindigkeitskorrektur der Messwerte mittels Korrekturformel durchgeführt. Die auftretenden Geschwindigkeitsabweichungen dürfen von der Soll-Messgeschwindigkeiten ± 4 km/h nicht überschreiten.

Analog hierzu findet auch eine Korrektur der Wasser- und Fahrbahntemperatur, auf die Bezugstemperatur von 20 °C, statt.

Bei vielen neuen, grobtexturierten Belägen konnte bei Messungen mit unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten festgestellt werden, dass mit den derzeitigen Faktoren für die Kompensation der Geschwindigkeitsabhängigkeit sowie der Kompensation der Temperaturabhängigkeit die Griffigkeitsmesswerte nicht hinreichend genau bestimmt werden können. So kann es passieren, dass eine Fahrbahn bei 80 km/h Messgeschwindigkeit eine ausreichende Griffigkeit aufweist, jedoch bei 60 und 40 km/h den in [ZTV Asphalt-StB, 07] bzw. [ZTV Beton-StB, 07] vorgeschriebenen Grenzwert unterschreitet.

Dies deutet darauf hin, dass bei der Korrekturrechnung bisher nicht alle notwendigen Einflussgrößen berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass die Fahrbahntextur einen entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit hat und somit bei der Korrekturrechnung mit berücksichtigt werden muss.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll nun der Einfluss der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren untersucht werden. Hierzu ist es notwendig, zu Beginn alle Einflussgrößen auf die Griffigkeitsmessung zu ermitteln. Darauf aufbauend soll der am Institut für Fahrzeugsystemtechnik bestehende Gummiabriebprüfstand (APS) zum Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) in der Weise erweitert werden, dass die wichtigsten Einflussgrößen während der Reibversuche aufgezeichnet werden können.

Es soll möglich sein, mit Bohrkernen aus realen Fahrbahn-deckschichten Reibversuche mit SKM-Gummiprobe durchzuführen. Die Randbedingungen sind so einzustellen, dass sie mit den SKM-Bedingungen übereinstimmen.

Bei den Versuchen sollen dann Fahrbahnproben mit unterschiedlichen Texturen untersucht werden. Die Textur dieser Proben wird vor Versuchsbeginn charakterisiert. Dadurch können die Reibergebnisse den Texturdaten gegenübergestellt werden.

Die am GAT ermittelten Ergebnisse und Schlussfolgerungen sollen anschließend am Innentrommelprüfstand des Instituts mit einem realen SKM-Reifen und mit SKM-Straßenmessdaten verifiziert werden.

2 Allgemeine Grundlagen

In den allgemeinen Grundlagen soll ein Einblick in folgende Themen gegeben werden:

- SKM-Messverfahren,
- Fahrbahn-deckschichten,
- Rauheit/Textur,
- Hypothesen zur Gummireibung,
- Einflussgrößen auf den Reibbeiwert,
- bisherige Untersuchungen zu diesem Themen-
gebiet.

Dieser Überblick soll dazu dienen, die Vorgehensweise in den späteren Kapiteln besser nachvollziehen zu können. Aus Übersichtsgründen werden nicht alle Einzelheiten, sondern nur das Wesentliche vorgestellt.

2.1 SKM-Messverfahren

2.1.1 Messprinzip

[TP Griff-StB (SKM)]

Das Seitenkraftmessverfahren ist ein Verfahren, mit welchem die Griffigkeit nasser Fahrbahnen beurteilt werden kann. Hierzu wird ein Messrad mit einem definierten Schräglaufwinkel und einer unter statischen Bedingungen definierten Normalkraft auf die Fahrbahnoberfläche gedrückt, die durch eine fest angekoppelte Masse realisiert ist. Die Messstelle befindet sich in der rechten Rollspur des Messfahrzeuges. Mit der vorgeschriebenen Messgeschwindigkeit (40, 60 oder 80 km/h) wird die Griffigkeitsmessung im fließenden Verkehr durchgeführt. In Bild 1 ist die typische Messvorrichtung eines SKM-Systems abgebildet.

Der Seitenkraftbeiwert μ_y dient zur Bewertung der Griffigkeit nasser Fahrbahnoberflächen und wird

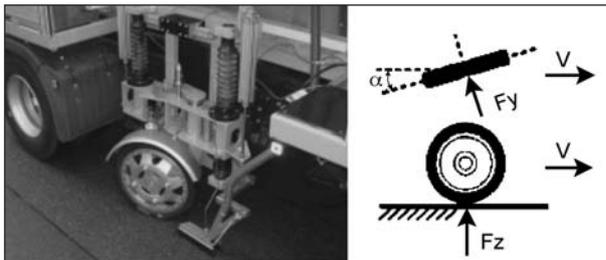


Bild 1: Typische Messvorrichtung des SKM [TP Griff-StB (SKM)]

| | |
|---|---------------------------------------|
| Vorstartstrecke (Warmfahren des Reifens vor Beginn der Messung) | 2 km |
| Soll-Messgeschwindigkeit (vom Auftraggeber vorgegeben) | 40, 60 oder 80 km/h |
| Zul. Abweichung von der Soll-Messgeschwindigkeit | ±4 km/h (Bauvertragsmessungen) |
| Seitlicher Sollabstand zur Fahrbahnrandmarkierung: | i. d. R. 70 cm (Bauvertragsmessungen) |
| Normalkraft | 1.960 N ± 10 N |
| Schräglaufwinkel | 20,0° ± 1,0° |
| Sturzwinkel | 0,0° ± 1,0° |
| Reifenüberdruck | 3,5 bar ± 0,1 bar |
| Wasserfilmdicke | 0,5 mm (rechnerisch) |
| Fahrbahntemperatur | 5,0 °C ... 50,0 °C |
| Lufttemperatur | ≥ 5,0 °C |
| Wassertemperatur | 8,0 °C ... 25,0 °C |

Tab. 1: Randbedingungen beim SKM-Verfahren [TP Griff-StB (SKM)]

über (1) ermittelt. Hierbei wird der Quotient aus der gemessenen Seitenkraft F_y (Reibkraft) und der Anpresskraft F_z (Radaufstandskraft) gebildet.

$$\mu_y = \frac{F_y}{F_z} \quad (1)$$

Die gemessene Seitenkraft hängt im Wesentlichen von den Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, den Reifeneigenschaften (Messreifen), von vorhandenen Zwischenmedien zwischen Reifen und Fahrbahn und von eventuell vorhandenen Verunreinigungen der Fahrbahnoberfläche ab. Des Weiteren spielen die bei der Messung vorliegenden Temperaturbedingungen (Reifen, Fahrbahn, Luft und Anrössungswasser) eine große Rolle.

Damit der Griffigkeitswert μ_y aussagekräftig und reproduzierbar ist, müssen spezielle Randbedingungen bzw. Parameter bei der Durchführung von SKM-Messungen eingehalten werden.

Diese Randbedingungen bzw. Parameter sind in der Tabelle 1 angeführt.

2.1.2 Messwertkorrekturen

[TP Griff-StB (SKM)]

Der gemessene Seitenkraftbeiwert (1-m-Abschnittswert) wird zuerst geschwindigkeits- und danach temperaturkorrigiert. Der geschwindigkeits- und temperaturkorrigierte Wert stellt den SKM-Griffigkeitswert dar.

Geschwindigkeitskorrektur

Da es im fließenden Verkehr nicht möglich ist, die exakte Messgeschwindigkeit immer einzuhalten, ist es notwendig, eine Geschwindigkeitskorrektur durchzuführen. Hierbei wird der gemessene Griffigkeitswert auf das jeweilige Bezugsniveau (40, 60, 80 km/h) korrigiert. Bei den Messungen sind Geschwindigkeitsabweichungen von maximal ± 4 km/h zulässig. Die Messwertkorrektur bezüglich der Geschwindigkeit ist mit (2) durchzuführen.

$$m_v = m + \frac{(v_{\text{ist}} - v_{\text{soll}})}{20 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \cdot 0,05 \quad (2)$$

m_v = normierter, auf Sollmessgeschwindigkeit umgerechneter SKM-Griffigkeitswert im 1-m-Abschnitt [-]

m = Messwert (Ablesewert μ_y incl. gerätespezifischem Korrekturfaktor) [-]

v_{ist} = mittlere Messgeschwindigkeit [km/h]

v_{soll} = Soll-Messgeschwindigkeit [km/h]

Temperaturkorrektur

Nach der Geschwindigkeitskorrektur findet die Temperaturkorrektur statt. Hierbei werden die geschwindigkeitskorrigierten Messwerte auf die Bezugstemperatur der Fahrbahn (20 °C) sowie des Wassers (20 °C) korrigiert. Die Temperaturkorrektur erfolgt über (3).

$$m_{v,T} = m_v + (T_W - 20^\circ\text{C}) \cdot \frac{0,002}{^\circ\text{C}} + (T_F - 20^\circ\text{C}) \cdot \frac{0,0012}{^\circ\text{C}} \quad (3)$$

$m_{v,T}$ = normierter, auf Soll-Messgeschwindigkeit umgerechneter und Temperatur korrigierter SKM-Griffigkeitswert im 1-m-Abschnitt [-]

m_v = normierter, auf Soll-Messgeschwindigkeit umgerechneter SKM-Griffigkeitswert im 1-m-Abschnitt [-]

T_W = gemessene Wassertemperatur [°C]

T_F = gemessene Fahrbahntemperatur [°C]

Es ergibt sich somit der korrigierte SKM-Griffigkeitswert $m_{v,T}$, der auch als Griffigkeitswert μ_{SKM} bezeichnet wird.

2.2 Fahrbahndeckschichten

Die Fahrbahndeckschicht ist die oberste Schicht von Fahrbahnbefestigungen. Nur sie steht im direkten Kontakt mit den Reifen von Fahrzeugen. Im deutschen Straßennetz sind hauptsächlich die folgenden Deckschichten verbaut:

- Asphalt [ZTV Asphalt-StB, 07], [TL Asphalt-StB, 07],
- Beton [ZTV Beton-StB, 07], [TL Beton-StB, 07],
- Pflaster [ZTV Pflaster-StB, 06], [TL Pflaster-StB, 06],
- wassergebundene Decke [DIN 18315].

In diesem Forschungsprojekt werden jedoch ausschließlich Asphalt- und Betondeckschichten untersucht, da in der Regel nur diese auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen verbaut sind und mit dem SKM-Messfahrzeug befahren und gemessen werden.

2.2.1 Asphaltdeckschichten

[ZTV Asphalt-StB, 07], [TL Asphalt-StB, 07]

Asphaltdeckschichten setzen sich aus einem Gesteinskörnungsgemisch und einem Bindemittel zusammen. Das Gesteinskörnungsgemisch weist je nach gewünschtem Asphalt eine festgelegte genau abgestufte Korngrößenverteilung auf. Die Art des Gesteins sollte möglichst polierresistent sein, damit die Fahrbahndeckschicht eine möglichst hohe Lebensdauer hinsichtlich der Griffigkeit aufweist. Als Bindemittel werden Straßenbaubitumen oder polymermodifizierte Bitumen verwendet.

Der Einbau und die Verdichtung des Asphaltdeckschichtmischguts erfolgen in heißem Zustand. Der Einbau und die Nachbehandlung der Fahrbahndeckschicht müssen so durchgeführt werden, dass verkehrssichere und widerstandsfähige Asphaltdeckschichten entstehen.

Gemäß den [ZTV Asphalt-StB 07] und den [TL Asphalt-StB 07] werden die vier folgenden Asphaltdeckschichten hergestellt und eingebaut:

- Asphaltbeton (AC),
- Splittmastixasphalt (SMA),
- Gussasphalt (MA),
- Offenporiger Asphalt (OPA).

Das Größtkorn bei den einzelnen Deckschichtarten variiert von 5 bis 11 mm. Der Einsatzbereich der jeweiligen Deckschichtarten bzw. -sorten wird in Abhängigkeit von der Beanspruchung gemäß der ZTV Asphalt-StB 07 empfohlen.

2.2.2 Fahrbahndecken aus Beton

[ZTV Beton-StB, 07], [TL Beton-StB, 07]

Hydraulisch gebundene Deckschichten setzen sich aus einem Gesteinskörnungsgemisch und einem Bindemittel zusammen. Das Gesteinskörnungsgemisch weist eine festgelegte, genau abgestufte Korngrößenverteilung auf und besteht aus ungebrochenem und/oder gebrochenem Gestein. Als Bindemittel werden hydraulische Bindemittel verwendet.

[VELSKE, 09]

Nach dem Einbau der Fahrbahndeckschicht wird die Oberfläche der Betondecke strukturiert. Hier-

durch sollen eine möglichst hohe Griffigkeit und günstige lärmtechnische Eigenschaften erreicht werden.

Geringste Lärmabstrahlung in Kombination mit einer hohen Griffigkeit kann zum Beispiel mit einer Waschbetonoberfläche (8 mm Größtkorn) erreicht werden. Für die Herstellung dieser Oberfläche wird nach der Aufbringung der Fahrbahndeckschicht ein Verzögerer auf die Oberfläche aufgebracht. Dieser verhindert das Aushärten des Bindemittels unmittelbar an der Oberfläche. Nach einer bestimmten Aushärtezeit kann die oberste Schicht der Fahrbahndeckschicht ausgebürstet werden. Dadurch ragt die Gesteinskörnung im Beton teilweise heraus, wodurch sich eine raue Oberfläche ergibt (0,6-1,1 mm Texturtiefe).

2.2.3 Griffigkeitsgrenzwerte

[ZTV Asphalt-StB, 07],[ZTV Beton-StB, 07]

Die Griffigkeit der Asphaltdeckschichten und Betondeckschichten wird nach der Fertigstellung mit dem SKM-Messfahrzeug überprüft. Zum Zeitpunkt der Abnahme dürfen die in Tabelle 2 angegebenen Griffigkeitsgrenzwerte um nicht mehr als 0,03 unterschritten werden.

Für die Griffigkeitsüberprüfung zum Ablauf der Verjähungsfrist sind die Griffigkeitsgrenzwerte ebenfalls in Tabelle 2 angegeben. Die angegebenen Grenzwerte gelten in diesem Fall (Ablauf der Verjähungsfrist) ohne Toleranz.

Die Messgeschwindigkeit für die Griffigkeitsüberprüfung mittels SKM-Messverfahren kann je nach örtlicher Gegebenheit zwischen 40, 60 oder 80 km/h gewählt werden.

| v [km/h] | bei Abnahme $\mu_{SKM, Abnahme}$ [-] | Ablauf der Verjähungsfrist für Mängelansprüche $\mu_{SKM, Verjähung}$ [-] |
|----------|---|---|
| 80 | 0,46 | 0,40 |
| 60 | 0,51 | 0,45 |
| 40 | 0,56 | 0,49 |

Tab. 2: SKM-Griffigkeitsgrenzwerte [ZTV Asphalt-StB, 07], [ZTV Beton-StB 07]

2.3 Rauheit/Textur

[VELSKE, 09]

„Als Rauheit oder Textur bezeichnet man die geometrische Feingestalt der Oberfläche einer Verkehrsfläche. Sie wird gekennzeichnet durch die Abstände zwischen den Profilspitzen sowie der Tiefe des Profils. Die Rauheit ist die Primärgröße für die Gebrauchseigenschaften der Griffigkeit, der Rollgeräusche, der Sprühfahnenbildung und des Rollwiderstands.“

In Tabelle 3 ist die Unterscheidung der Texturbereiche dargestellt. Die Texturwellenlänge λ ist hierbei nach [DIN EN ISO 13473-1] als die kürzeste Distanz zwischen sich periodisch wiederholenden Abschnitten einer Fahrbahnprofilkurve definiert.

Die Rauheit kann unter anderem durch die mittlere Profiltiefe $p_M = MPD$ (Mean Profile Depth), den quadratischen Mittenrauwert $R_q = RMS$ (Root Mean Square) und das arithmetische Mittel R_a charakterisiert werden.

Die mittlere Profiltiefe und der quadratische Mittenrauwert lassen sich mit (4) bzw. (5) ermitteln. Das arithmetische Mittel R_a kann über (6) bestimmt werden [DIN ISO 13473-2], [VELSKE, 09].

$$p_M = MPD = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L p(x) dx \quad (4)$$

$$R_q = RMS = \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \int_0^L y^2(x) dx} \quad (5)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|y_1| + |y_2| + \dots + |y_n|}{n} \quad (6)$$

In Bild 2 ist ein typisches Fahrbahnoberflächenprofil dargestellt.

Welche Oberflächeneigenschaften die Griffigkeit, das Rollgeräusch und den Rollwiderstand beeinflussen, ist Gegenstand aktueller Forschung und kann derzeit noch nicht abschließend beantwortet werden. Die genannten Gebrauchseigenschaften sind außerdem von der betrachteten Geschwindigkeit, der Dicke eines vorhandenen Zwischenmediums und weiteren Einflussgrößen abhängig.

| | Texturwellenlänge | Wirkung |
|-------------|--|--|
| Mikrotextur | $\lambda < 0,5 \text{ mm}$ | Haftreibung |
| Makrotextur | $\lambda = 0,5 \text{ bis } 50 \text{ mm}$ | Dränage, Sprühhahnen, Rollgeräusche, Farbe |
| Megatextur | $\lambda = 50 \text{ bis } 500 \text{ mm}$ | Rollgeräusche, Rollwiderstand |
| Unebenheit | $\lambda = 500 \text{ mm bis } 50 \text{ m}$ | Rollwiderstand, Fahrzeugschwingungen |
| Längsprofil | $\lambda > 50 \text{ m}$ | Gradiente |

Tab. 3: Unterscheidung der Texturbereiche [VELSKE, 09], [DIN EN ISO 13473-1]

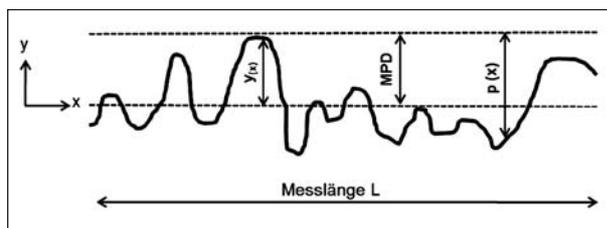


Bild 2: Typ. Fahrbahnoberflächenprofil nach [VELSKE, 09]

2.4 Hypothesen zur Gummireibung

[BACHMANN, 96]

Der Reibbeiwert zwischen Gummi und dem Reibpartner (Straßenoberfläche) ist von vielen unterschiedlichen Einflussgrößen abhängig. Er kann über (7) bestimmt werden.

$$\mu_{\text{ges}} = \frac{\text{Reibkraft}}{\text{Normalkraft}} = \frac{F_R}{F_N} \quad (7)$$

Eine Kraftübertragung zwischen Gummi (Reifen) und Fahrbahn kann immer nur dann stattfinden, wenn eine Relativbewegung zwischen den Reibpartnern besteht. Diese Relativbewegung wird als Schlupf s_{ges} bezeichnet und ist als (8) definiert.

$$s_{\text{ges}} = \frac{V_{\text{Radumfang}} - V_{\text{Fahr}}}{V_{\text{Fahr}}} \quad (8)$$

Der Schlupf ist die Summe aus Verformungsschlupf und Gleitschlupf und kann über (9) bestimmt werden.

$$s_{\text{ges}} = s_{\text{verformung}} + s_{\text{gleit}} \quad (9)$$

Der Verformungsschlupf beschreibt hierbei den elastischen Verformungsanteil des Gummis (bzw. des Reifens), der Gleitschlupf den gleitenden Anteil der Relativbewegung zwischen Gummi (bzw. Reifen) und der Fahrbahn.

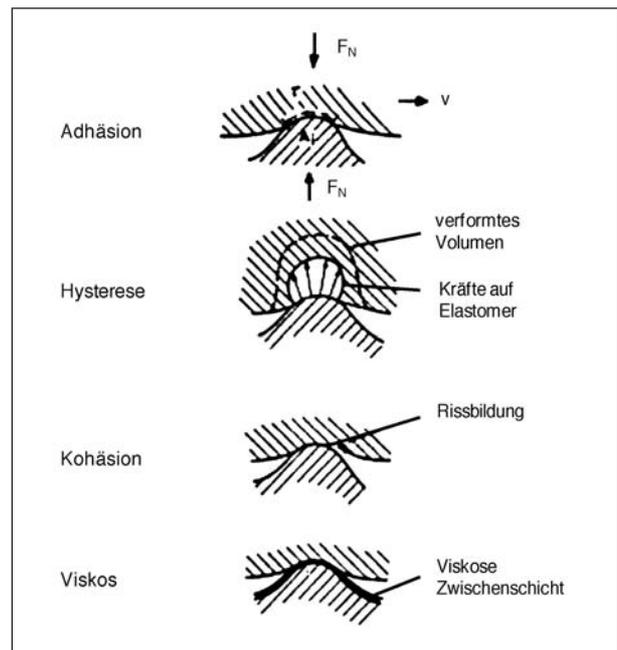


Bild 3: Einzelkomponenten der Reibung [GEIER, 72]

2.4.1 Reibmechanismen

[BACHMANN, 96], [GEIER, 72]

Der Gummireibbeiwert besteht aus den folgenden vier Einzelkomponenten und kann in diese zerlegt werden:

- Adhäsionskomponente $\mu_{\text{Adhäsion}}$,
- Hysteresekomponente $\mu_{\text{Hysterese}}$,
- Kohäsionskomponente $\mu_{\text{Kohäsion}}$,
- Viskosekomponente μ_{Viskose} .

Diese Einzelkomponenten müssen jedoch nicht unbedingt alle gleichzeitig auftreten. Nach [KUMMER, 66] kann der Gesamtreibbeiwert μ_{ges} über (10) bestimmt werden.

$$\mu_{\text{ges}} = \mu_{\text{Adhäsion}} + \mu_{\text{Hysterese}} + \mu_{\text{Kohäsion}} + \mu_{\text{Viskose}} \quad (10)$$

In Bild 3 sind die Einzelkomponenten des Reibbeiwertes dargestellt. Die Hauptanteile sind hierbei der Adhäsions- und der Hystereseanteil.

Adhäsionskomponente des Reibkraftanteils

[BACHMANN, 96]

Der Adhäsionsanteil beschreibt den Anteil des Gesamtreibbeiwertes, der durch molekulare Verbindungen zwischen dem Gummi und dem Reibpartner verursacht wird.

In Bild 4 ist dieser Mechanismus auf makroskopischer, mikroskopischer und molekularer Ebene veranschaulicht.

In [KUMMER, 67] wird der Mechanismus der Adhäsion folgendermaßen erklärt:

„Einige der außenliegenden Atome der vermaschten Kettenmoleküle des Gummis stehen in direktem Kontakt mit den regelmäßig angeordneten Atomen der Gleitfläche und bilden Verbindungen. Wenn sich die Gummimasse weiterbewegt, dehnen sich diese Ketten und eventuell bestehende Verbindungen werden auseinandergerissen. Nach dem Zerreißen einer solchen Verbindung ziehen sich die Kettenmoleküle wieder zusammen, bis der Vorgang durch die Bildung einer neuen Verbindung während des Weitergleitens wiederholt wird. Wann immer sich die Molekülketten bewegen, wird Energie verbraucht, sodass ein periodisches Dehnen und Entspannen mit Dämpfungsverlusten verbunden ist.“

Dieser Vorgang ist in Bild 5 veranschaulicht. Bei Vorhandensein eines Zwischenmediums oder Verschmutzungen muss davon ausgegangen werden, dass die Adhäsionskomponente stark abfällt.

Hysteresekomponente des Reibkraftanteils

[BACHMANN, 96]

Gleitet ein Gummikörper über ein Rauheits- bzw. Texturelement, so deformiert sich dieser senkrecht zur Kontaktfläche und passt sich damit der Fahrbahntextur an. Die viskose Stoffkomponente des Gummikörpers wandelt dabei Teile der Deformationsenergie in Reibungswärme um und verursacht den so genannten Hystereseverlust. Dieser Verlust tritt bei der Verformung (Belastung) und der Rückverformung (Entlastung) des Gummikörpers auf.

Bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten bildet sich eine symmetrische, bei hohen Gleitgeschwindigkeiten eine asymmetrische Druckverteilung im Gummikörper aus. Dies ist in Bild 6 dargestellt.

Bei Anwesenheit eines Zwischenmediums ist zu erwarten, dass der Hystereseanteil der Reibung mit ansteigender Wasserfilmdicke abfällt, da immer weniger Texturspitzen in den Gummikörper eindringen und diesen dadurch verformen.

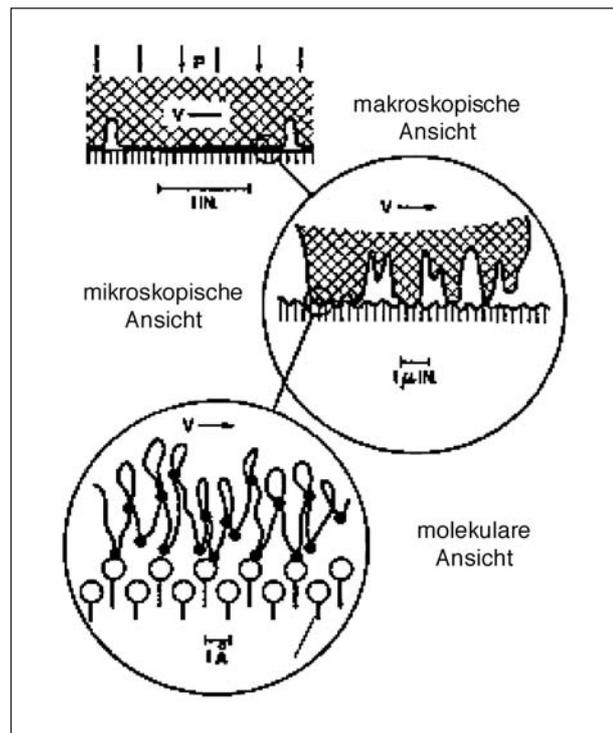


Bild 4: Kontaktzone in unterschiedlichen Betrachtungsweisen [KUMMER, 66]

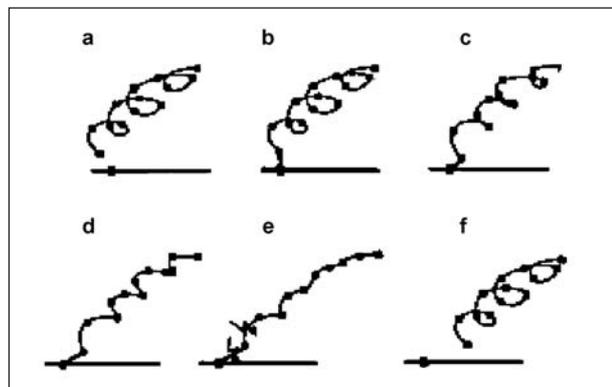


Bild 5: Dehnen, Reißen und Entspannen der Molekülketten [EICHHORN, 94]

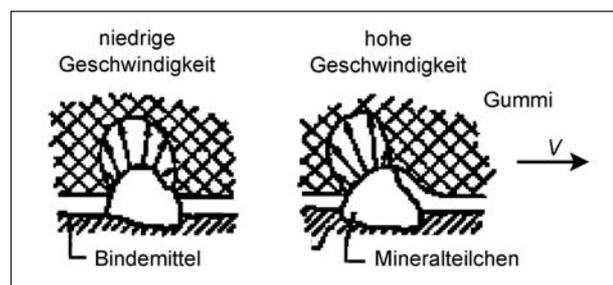


Bild 6: Druckverteilung bei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten [KUMMER, 67]

Viskose Komponente des Reibkraftanteils

[BACHMANN, 96]

Der viskose Reibkraftanteil, der nur bei nasser Oberfläche auftreten kann, kommt dadurch zustande, dass der Gummigleitkörper bzw. der Reifen keinen direkten Kontakt (lokal oder global) zur Fahrbahnoberfläche hat. Somit können nur die Scherkräfte, die sich über die geschlossene Flüssigkeitsschicht ausbilden, übertragen werden. Wenn nur noch der viskose Reibanteil übertragen werden kann, spricht man von Aquaplaning.

Der viskose Reibanteil ist im Vergleich zum Adhäsions- und Hystereseannteil im Allgemeinen vernachlässigbar klein.

Kohäsionskomponente des Reibkraftanteils

[BACHMANN, 96]

Werden Gummipartikel während des Reibvorgangs aus dem Gummigleitkörper bzw. dem Reifen herausgelöst oder kommt es zur Rissbildung im Gummi, wird hierfür Energie benötigt. Der Anteil des Reibbeiwertes, der diesen Energieverlust verursacht, wird Kohäsionsanteil genannt. Dieser Reibanteil hängt sehr stark von den vorliegenden Temperaturbedingungen ab.

In sehr vielen Fällen ist der Kohäsionsreibverlust vernachlässigbar gering.

2.5 Einflussgrößen auf den Reibbeiwert

Die in diesem Unterkapitel abgebildeten Diagramme sollen lediglich Tendenzen der unterschiedlichen Einflussgrößen veranschaulichen. Die Diagramme gelten jeweils nur für die Randbedingungen die bei den zugehörigen Versuchsdurchführungen, vorlagen. Diese Randbedingungen sind hier aufgrund der Übersichtlichkeit nicht näher beschrieben und können den Originalquellen entnommen werden.

[BACHMANN, 96]

Die Reibung zwischen Gummi und Reibpartner ist von vielen Parametern abhängig. Ein Überblick hierzu ist in [BACHMANN, 96] dargestellt. In der Tabelle 4 erfolgt eine systematische Zusammenstellung der Einflussparameter auf den Reibwert.

| Parametergruppe | Parameter | Subparameter |
|-----------------|-----------------|---|
| Reifen | Bauart | Unterbau Profilgeometrie Laufflächenmischung Profiltiefe Laufflächenkrümmung Querschnitt Breite Innendruck Temperatur |
| | Geometrie | Mikrotextur Makrotextur Drainagevermögen |
| Fahrbahn | Fahrbahndecke | Mineralstoffe Mischgut Temperatur Anfangszustand Festigkeit Verkehrsbelastung Witterung |
| | trock. Reibung | |
| Zwischenmedium | Nässe | Wasserfilmstärke |
| | Eis | Eistemperatur |
| | Schnee | Dichte Temperatur |
| | Öl | |
| | Schmutz | |
| Fahrzeug | Geschwindigkeit | |
| | Radlast | Rollen Schlupfen Gleiten |
| | Betriebspunkt | |
| | Radstellung | Sturz Schräglauf |

Tab. 4: Systematische Darstellung der in der Literatur gefundenen Parameter auf den Reibwert [BACHMANN, 96]

In diesem Forschungsvorhaben wird der Einfluss der Geschwindigkeit, der Temperatur des Zwischenmediums Wasser und der Fahrbahntextur (Grobtextur) untersucht. Der Einfluss unterschiedlicher Reifen wird nicht untersucht, da beim SKM-Verfahren die Verwendung des SKM-Messreifens zwingend vorgeschrieben ist.

Im Weiteren werden daher die folgenden Einflüsse näher beschrieben:

- Geschwindigkeitseinfluss,
- Temperatureinfluss,
- Einfluss von Zwischenmedien,
- Einfluss der Wasserfilmdicke,
- Einfluss der Fahrbahntextur.

Geschwindigkeitseinfluss

In Bild 7 ist beispielhaft die Abhängigkeit des Reibbeiwertes von der Gleitgeschwindigkeit auf trockener Unterlage abgebildet. Hierin beschreiben f_a den Adhäsionsanteil und f_h den Hystereseanteil. Die Kurvenverläufe ergeben sich durch die viskoelastischen Eigenschaften des Gummis [KUMMER, 67]. Die Dämpfung (innere Reibung) des Gummis weist über der Erregungsfrequenz ein Maximum auf. Damit ist zu erwarten, dass die Reibung bei genau dieser Anregungsfrequenz (Kombination aus Gleitgeschwindigkeit und Textur) ihr Maximum annimmt.

[BACHMANN, 96]

Die Gesamtreibung auf trockener Unterlage kann aus dem Adhäsion- und dem Hystereseanteil mit (10) berechnet werden, da auf trockener Fahrbahn kein Viskoseanteil vorhanden ist und der Kohäsionsanteil ebenfalls als vernachlässigbar angenommen wird.

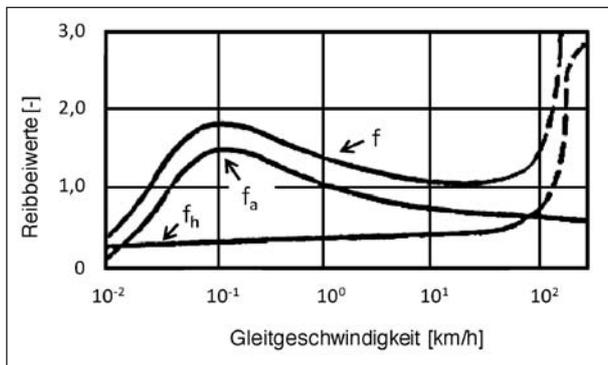


Bild 7: Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf den Reibbeiwert [KUMMER, 66]

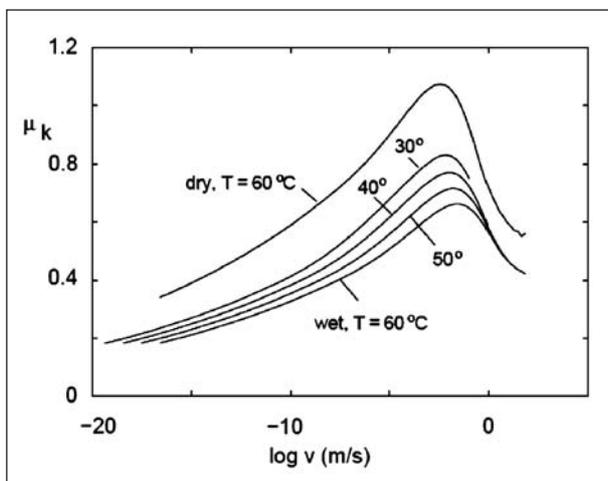


Bild 8: Berechneter Reibbeiwert für eine Standard-Reifenmischung auf einem Asphaltbelag bei unterschiedlichen Gummitemperaturen [PERSSON, 05]

„Dies führt zur vereinheitlichten Gummireibungstheorie von KUMMER [KUMMER, 67], die besagt, dass Adhäsion und Hysterese zwei unterschiedliche Verbrauchsarten von grundsätzlich derselben Energie sind“ [BACHMANN, 96].

Die Lage der Maximalwerte des Adhäsions- bzw. Hystereseanteils ist durch die Lage des Verlustmoduls bzw. der Verlusttangente des Gummis begründet.

Temperatureinfluss

Bild 8 zeigt von PERSSON berechnete Verläufe des Reibbeiwerts für unterschiedliche Reifentemperaturen für eine Standard-Reifenmischung.

[PERSSON, 05]

Da die Reifentemperatur auf trockener Fahrbahn typischerweise Werte um 60 °C und auf nasser Fahrbahn typischerweise Werte um 30 °C annehmen kann, wurden Berechnungen für diese Temperaturen durchgeführt. Weiterhin wurde die Berechnung für die Temperaturen 40, 50 und 60 °C auf nassen Fahrbahnen durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass die Griffigkeit auf nasser Fahrbahn im Vergleich zur trockenen Fahrbahn niedrigere Werte aufweist. Weiterhin zeigt sich ein Abfall der Griffigkeit auf nasser Fahrbahn mit steigender Reifentemperatur.

Einfluss von Zwischenmedien

In Bild 9 sind der Adhäsionsbeiwert und der Hysteresebeiwert in Abhängigkeit von unterschiedlichen Zwischenmedien dargestellt.

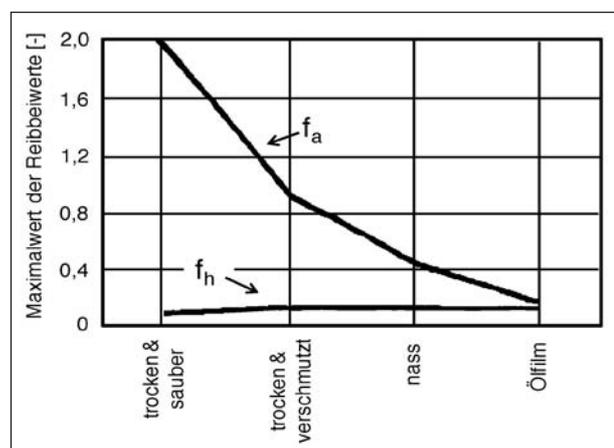


Bild 9: Einfluss von Zwischenmedien auf den Reibbeiwert [KUMMER, 67]

[KUMMER, 64]

In Bild 9 ist zu erkennen, wie unterschiedliche Fahr-
bahnverunreinigungen den Adhäsionsbeiwert (f_a)
und den Hysteresebeiwert (f_h) beeinflussen. Der Ad-
häsionsbeiwert ist auf trockener und sauberer Fahr-
bahn sehr hoch, da die Berührfläche zwischen
Gummi und Fahrbahn maximal ist und sich so die
größte Anzahl molekularer Bindungen ausbilden
kann. Treten Verschmutzungen auf, verkleinert sich
die effektive Berührfläche zwischen Gummi und
Fahrbahn. Damit sinkt die Anzahl der möglichen
molekularen Bindungen und der Adhäsionsbeiwert
fällt ab. Ist ein Zwischenmedium wie Wasser oder Öl
vorhanden, verstärkt sich dieser Effekt noch weiter.

Die Hysteresekomponente hängt nur von Betrag
und Art der Verformung ab, die durch die Flächen-
pressung, die Oberflächenstruktur und die Gleitge-
schwindigkeit gegeben ist. In Bild 9 kann beobach-
tet werden, dass der Hysteresebeiwert mit fallen-
dem Adhäsionsbeiwert leicht ansteigt. Dies begrün-
det [KUMMER, 64] damit, dass die durch die Adhäs-
ionskomponente eingetragene Reibungswärme
sinkt.

**Einfluss der Wasserfilmdicke auf die Ge-
schwindigkeitsabhängigkeit des Reibbeiwertes**

In Bild 10 ist der maximale Seitenkraftbeiwert über
der Fahrgeschwindigkeit aufgetragen. Es wird der
Einfluss unterschiedlicher Wasserfilmdicken für
einen profilierten und einen profillosen (glatten)
Reifen veranschaulicht.

Es ist zu erkennen, dass bereits geringe Wasser-
filmdicken den Reibbeiwert erheblich absenken.
Wie zu erwarten, zeigt der profilierte Reifen eine
deutlich geringere Geschwindigkeitsabhängigkeit
als der profillose Reifen. Dies kann auf die Draina-
gewirkung des Reifenprofils zurückgeführt werden.

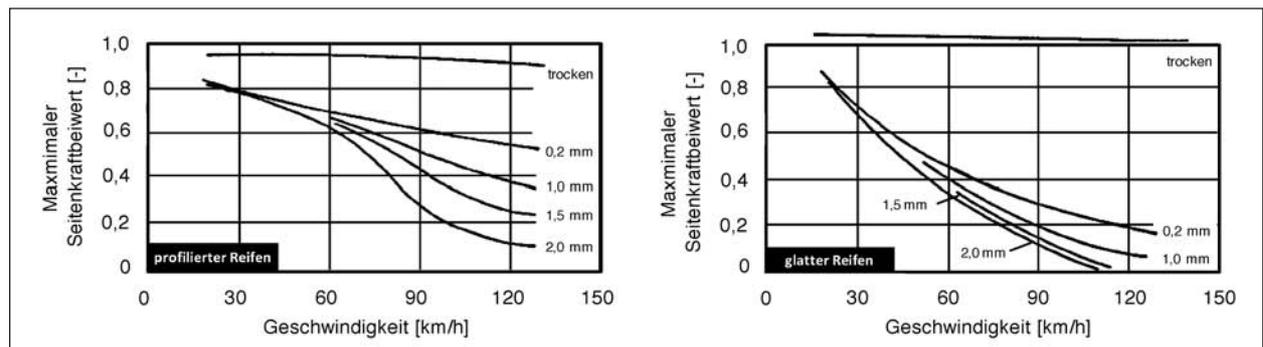


Bild 10: Einfluss der Wasserfilmdicke auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibbeiwertes [GENGENBACH, 68], [GENGENBACH, 68/2]

**Einfluss der Fahrbahntextur auf die Geschwin-
digkeitsabhängigkeit des Reibbeiwertes**

In Bild 11 ist der Reibbeiwert unterschiedlicher Mo-
delloberflächen über der Geschwindigkeit aufgetra-
gen.

Die Kurven 1 bis 4 weisen alle eine hohe Mikrorau-
heit (Schärfe) auf. Die Makrorauheit (Drainagewir-
kung) ist bei der Kurve 1 am höchsten und fällt bis
zur Kurve 4 immer weiter ab. Es ist zu erkennen,
dass der Gleitbeiwertabfall mit zunehmender Ge-
schwindigkeit, bei steigender vorhandener Makro-
rauheit, weniger ausgeprägt ist. Das kann vermut-
lich auf die bessere Drainagewirkung der Textur zu-
rückgeführt werden. Das hohe Griffigkeitsniveau
bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten kann auf die
hohe Mikrorauheit zurückgeführt werden.

Bei den Kurven 5 bis 10 fällt der Reibbeiwert bei
niedriger Geschwindigkeit von der Kurve 5 bis hin
zur Kurve 10 ab. Dies ist durch die abfallende Mi-
krorauheit (Schärfe) zu erklären. Durch die abfal-
lende Mikrorauheit sinkt auch die Geschwindig-
keitsabhängigkeit (Steigung) immer weiter.

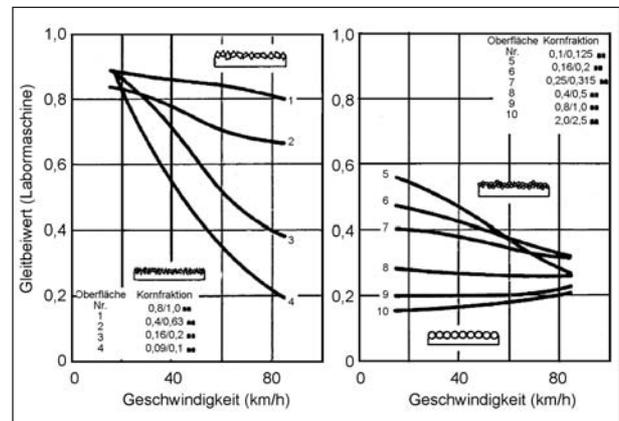


Bild 11: Einfluss der Fahrbahntextur auf die Geschwindigkeits-
abhängigkeit des Reibbeiwertes [SCHULZE, 79]

[SCHULZE, 79]

Das Zusammenwirken von Mikro- und Makrotextrur wird in Bezug zum Reibbeiwert bei Nässe folgendermaßen beschrieben (Bild 11):

- Die Mikrorauheit bestimmt unabhängig von der Makrorauheit der Oberfläche die Höhe der Reibbeiwerte bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten.
- Die Makrorauheit der Oberfläche bestimmt die Höhe der Reibbeiwerte im oberen Geschwindigkeitsbereich, jedoch abhängig von der Mikrorauheit.
- Die Steigung der Reibbeiwertkurve über der Geschwindigkeit hängt allgemein von der Makro- und der Mikrotextrur ab:
 - Bei extrem großer Makrotextrur verläuft die Reibbeiwertkurve über der Geschwindigkeit annähernd waagrecht; der Schärfeegrad der Oberfläche bestimmt die Höhenlage der Kurve (Kurve 1).
 - Bei extrem geringem Schärfeegrad verläuft die Reibbeiwertkurve über der Geschwindigkeit annähernd waagrecht und liegt extrem niedrig, unabhängig von der Makrotextrur der Oberfläche (Kurve 9).

[SCHULZE, 79]

In Bild 12 ist das Zusammenwirken von Makrotextrur (Drainagewirkung) und Mikrotextrur (Schärfe) auf nasser Fahrbahn zusammengefasst.

Die einzelnen Reibkombinationen können folgendermaßen gedeutet werden:

- keine Schärfe- sowie Drainagewirkung, daher sehr niedriges Reibniveau und nahezu keine Geschwindigkeitsabhängigkeit,
- mittlere Schärfe bei keiner Drainagewirkung, daher höheres Reibniveau als bei a) bei niedrigen Geschwindigkeiten, aber auch höhere Geschwindigkeitsabhängigkeit,
- hohe Schärfe bei gleichzeitig keiner Drainagewirkung, daher noch größere Geschwindigkeitsabhängigkeit als bei b), aber auch höherer Reibwert bei niedrigen Geschwindigkeiten,
- hohe Schärfe bei mittlerer Drainagewirkung, daher geringere Geschwindigkeitsabhängigkeit als bei c) und höherer Reibwert bei größeren Geschwindigkeiten,
- hohe Schärfe bei hoher Drainagewirkung, daher hohes Reibniveau (unabhängig von der Geschwindigkeit) bei sehr geringer Geschwindigkeitsabhängigkeit,

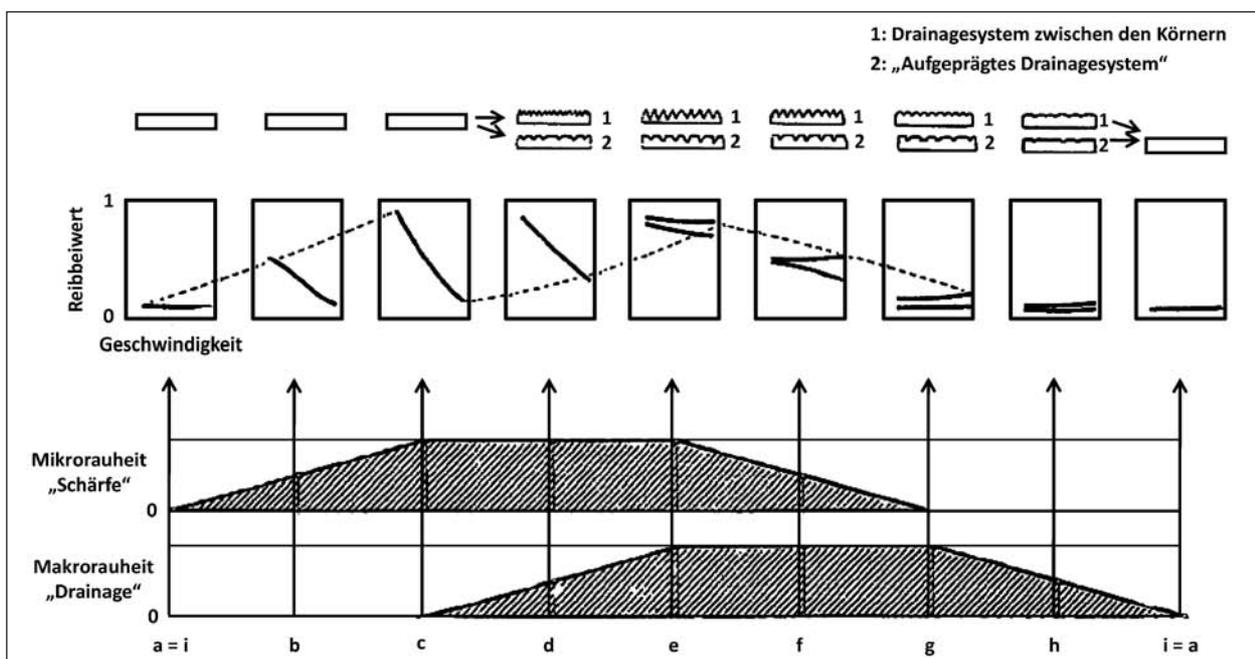


Bild 12: Übersicht zum Einfluss der Fahrbahntextur auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibbeiwertes auf nasser Fahrbahn nach [SCHULZE, 79]

- f) mittlere Schärfe bei hoher Drainagewirkung, daher mittleres Reibniveau bei nahezu keiner Geschwindigkeitsabhängigkeit,
- g) keine Schärfe bei hoher Drainagewirkung, daher niedriges Reibniveau bei nahezu keiner Geschwindigkeitsabhängigkeit,
- h) keine Schärfe bei mittlerer Drainagewirkung, daher niedriges Reibniveau bei nahezu keiner Geschwindigkeitsabhängigkeit,
- i) entspricht gleicher Kombination wie bei a).

2.6 Bisherige Untersuchungen zum Themengebiet

In [HORNE, 83] wird ein Verfahren zur Schätzung der Griffigkeit nasser Fahrbahnen vorgestellt. Es werden charakteristische Kennwerte definiert, welche ein Maß für den Einfluss der Fahrbahntextur in Kombination mit den Reifeneinflüssen darstellen. Im Folgenden wird dieses Verfahren vorgestellt.

[HORNE, 83]

Wenn ein Reifen auf einer nassen Fahrbahn abrollt, kann der Reifenlatsch (Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn) in drei unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden (Bild 13).

Im Bereich 1 hat das Reifengummi keinen Kontakt mit der Fahrbahn und schwimmt völlig auf dem Wasser auf. Der Reifen kann in diesem Bereich nahezu keine Reibkräfte übertragen, da die im Wasser übertragbaren Schubkräfte vernachlässigbar klein sind. Die Größe dieses Bereiches hängt hauptsächlich von der Makrotextur der Fahrbahn, den Reifeneigenschaften (Profilgeometrie, Reifennendruck, Gummimischung usw.) und der Fahr-

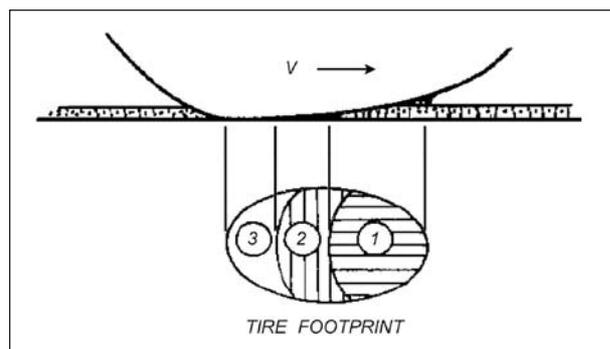


Bild 13: Einteilung des Reifenlatsches auf nasser Fahrbahn [HORNE, 83]

geschwindigkeit ab. Die Geschwindigkeit, ab der der komplette Reifen auf dem Wasser aufschwimmt, wird als Aquaplaninggeschwindigkeit (V_p) bezeichnet.

Im Bereich 2 wird der Großteil des Wassers durch die Drainagefähigkeit der Fahrbahn und des Reifens aus dem Reifenlatsch verdrängt. Der Reifen hat in diesem Bereich Kontakt mit feuchter Fahrbahn. Die Ausprägung dieses Flächenanteils ist hauptsächlich abhängig von der Mikrotextur der Fahrbahn und den Reifeneigenschaften.

Im Bereich 3 handelt es sich nach Definition von [HORNE, 83] hauptsächlich um „trockenen“ Fahrbahnkontakt.

In [HORNE, 83] werden zwei Drainagekoeffizienten definiert: der Makrotextur-Drainagekoeffizient „ C_{MAC} “ und der Mikrotextur-Drainagekoeffizient „ C_{MIC} “. Beide Drainagekoeffizienten haben einen Wertebereich von 0 bis 1 und werden empirisch ermittelt. Das genaue Vorgehen kann [HORNE, 83] entnommen werden. Sie gelten jeweils nur für die Fahrgeschwindigkeit und die Wasserhöhe, die bei den zugrunde gelegten Messungen vorlagen.

Nimmt C_{MAC} den Wert 0 an, bedeutet dies, dass die kombinierte Drainagewirkung von Fahrbahn und Reifen perfekt ist. In diesem Fall bildet sich der Bereich 1 (Bild 13) nicht aus, da der dynamische Staudruck vor dem Reifen auf 0 sinkt. Nimmt C_{MAC} den Wert 1 an, bedeutet dies, dass die kombinierte Drainagewirkung von Fahrbahn und Reifen sehr gering ist. Vor dem Reifen bildet sich der, entsprechend der vorliegenden Geschwindigkeit und der vorhandenen Wasserhöhe, maximal mögliche Staudruck aus.

Nimmt C_{MIC} den Wert 0 an, kann daraus geschlossen werden, dass die Kombination aus Mikrorauheit der Fahrbahnoberfläche und den Reifeneigenschaften eine perfekte Drainagewirkung bezüglich dünner Flüssigkeitsfilme aufweist. Damit fällt der viskose Druck auf 0 ab und der Bereich 2 (Bild 13) bildet sich nicht aus. Nimmt C_{MIC} den Wert 1 an, kann daraus geschlossen werden, dass die Kombination aus Mikrotextur der Fahrbahnoberfläche und den Reifeneigenschaften keine Drainagewirkung bezüglich dünner Flüssigkeitsfilme besitzt. Es bilden sich der maximal mögliche viskose Druck und damit die maximal mögliche Ausprägung des Bereichs 2 aus.

Am Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau (ISETH) der ETH Zürich wurden innerhalb eines

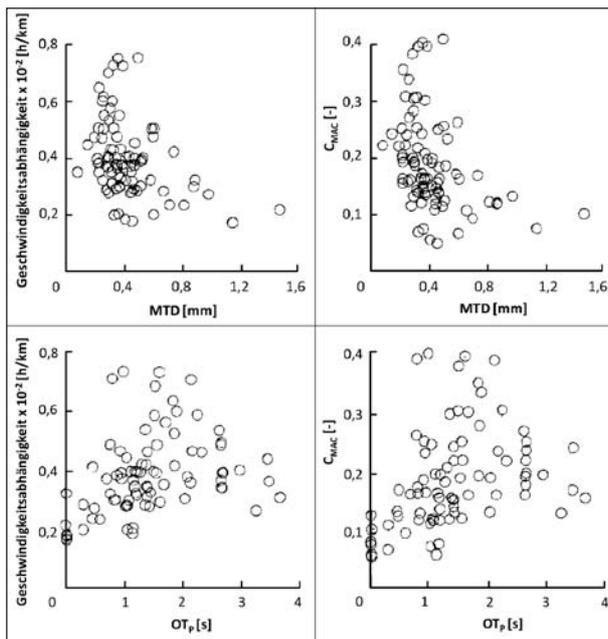


Bild 14: Zusammenhang der Geschwindigkeitsabhängigkeit und des Drainagekoeffizienten (C_{MAC}) von der Fahrbahntextur (MTD-Wert, OT_P -Wert) [HORNE, 83]

Forschungsauftrages 83 Straßenoberflächen in der Schweiz im Hinblick auf ihre Reibeigenschaften und ihre Textur untersucht (1976). Die Griffigkeit wurde bei 40, 60, 80 und teilweise bei 100 km/h mit einem BV-8-Skiddometer gemessen (Anhängers mit blockiertem Messrad). Aus den gemessenen Griffigkeiten bei unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten wurde die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit für jeden Fahrbahnbelag bestimmt.

Die Fahrbahntextur wurde mittels SRT-Pendels, des Ausflussmessers nach Moore und des Sandfleckverfahrens charakterisiert. Aus den Messdaten wurden die Drainagekoeffizienten C_{MAC} und C_{MIC} berechnet. In Bild 14 ist der Zusammenhang der Geschwindigkeitsabhängigkeit und des Drainagekoeffizienten von der Fahrbahntextur abgebildet.

Der Vergleich der vorliegenden Daten zeigt, dass die Texturdaten (Sandfleckverfahren „MTD-Wert“ und Ausflussmessung nach Moore „ OT_P -Wert“) schlecht mit der Geschwindigkeitsabhängigkeit und dem Drainagekoeffizient C_{MAC} korrelieren (Bild 14).

In Bild 15 ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit über dem Drainagekoeffizient C_{MAC} abgebildet.

Es zeigt sich eine gute Korrelation zwischen der Geschwindigkeitsabhängigkeit und dem Drainagekoeffizienten (C_{MAC}).

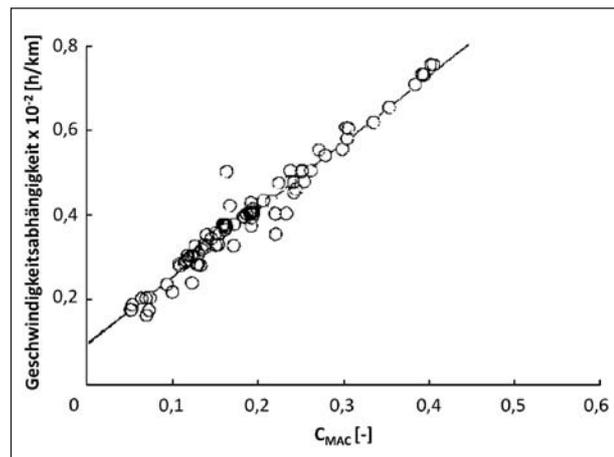


Bild 15: Zusammenhang von Geschwindigkeitsabhängigkeit und Drainagekoeffizient (C_{MAC}) [HORNE, 83]

Der Ansatz mit den hier vorgestellten Drainagekoeffizienten wird in diesem Forschungsvorhaben nicht weiter verfolgt, da für die Bestimmung der Drainagekoeffizienten Griffigkeitsversuche auf trockenen Fahrbahnen durchgeführt werden müssen. Bei der Durchführung dieser Griffigkeitsversuche würde sich die Mikrorauheit der untersuchten Fahrbahntexturen durch den auftretenden Verschleiß zu sehr verändern. Dadurch wären die Fahrbahnproben für die Folgeversuche unbrauchbar.

In [DELANNE, 93] wird ein Überblick über die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit abhängig von der Fahrbahntextur gegeben. Es wird zwischen empirischem und analytischem Vorgehen unterschieden. Auf die vorgestellten Formeln zur Berechnung der geschwindigkeitsabhängigen Griffigkeit wird hier nicht weiter eingegangen, da diese nur sehr grobe Anhaltswerte für die zu erwartende Griffigkeit liefern. Es sei nur erwähnt, dass in [LEU, 78] eine Formel vorgestellt wird, mit welcher eine grobe Abschätzung des zu erwartenden Griffigkeitswertes ermittelt werden kann. Diese Formel berücksichtigt die Mikrorauheit (SRT-Wert), die Makrorauheit (MTD-Wert) und die Geschwindigkeit. Auf die Temperaturabhängigkeit der Griffigkeit wird nicht eingegangen.

3 Untersuchungsmethodik

Ziel des Projektes war die Untersuchung des Einflusses der Makrotextur auf die Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit der Griffigkeitswerte, die mit dem SKM-Messverfahren ermittelt werden.

Um die gemessenen SKM-Griffigkeitswerte unterschiedlicher SKM-Messungen auf unterschiedlichen Fahrbahnen direkt miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, die Messgeschwindigkeit bei jeder einzelnen Messung exakt einzuhalten. Dies ist allerdings nicht möglich, da die SKM-Messungen im fließenden Verkehr durchführt und dadurch andere Verkehrsteilnehmer beeinflusst werden. Die dadurch auftretenden Geschwindigkeitsschwankungen (beispielsweise anstatt 60 km/h nur 57 km/h) werden bei der Auswertung der Messdaten auf ein Bezugsniveau korrigiert. Dasselbe gilt für Temperaturschwankungen des Anrassungswassers und der Umgebung. Auch hier ist es nicht möglich, jede SKM-Messung unter denselben Bedingungen durchzuführen, was eine Temperaturkorrektur bei der Messdatenauswertung erfordert.

Um den möglichen Einfluss der Makrotextur der Fahrbahn auf die Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit der SKM-Griffigkeitswerte zu untersuchen, wurde nun wie in Bild 16 abgebildet vorgegangen.

Zunächst wurde der am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) bestehende Gummiabriebprüfstand (APS) in der Weise erweitert, dass Griffigkeitsversuche auf nasser Fahrbahn durchgeführt

werden konnten. Diese Erweiterung wird in Kapitel 4 vorgestellt. Nach dem Umbau des Gummiabriebprüfstandes zum Griffigkeits- und Abriebprüfstand (Grip and Abrasion Teststand, GAT) wurden Griffigkeitsversuche mit SKM-Gummigleitkörpern auf Fahrbahnproben durchgeführt. Die Gummigleitkörper (Gummiprüfer) wurden aus einem SKM-Messreifen gefertigt. Die Versuchsparameter wurden bei den Griffigkeitsversuchen so eingestellt, dass sie den SKM-Bedingungen möglichst entsprechen.

Durch die Griffigkeitsversuche auf realen Fahrbahnstrukturen soll der Einfluss der Makrotextur auf die Griffigkeit nasser Fahrbahnen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ermittelt werden. Für die Versuchsdurchführung standen 20 Bohrkerne (Kontrollbohrkerne aus realen Fahrbahndeckschichten) zur Verfügung, welche unterschiedliche Texturen aufwiesen. Bei den Bohrkernen handelte es sich um 14 Asphalt- und 6 Betonbohrkerne.

Für die Griffigkeitsversuche wurden spezielle Abdrücke der vorhandenen Fahrbahnproben angefertigt, welche die Fahrbahnstrukturen der 20 genannten Bohrkerne aufwiesen. Diese Abdrücke wurden mit einem speziell entwickelten Abdruckverfahren hergestellt (Kapitel 5). Durch Verwendung dieser Abdrücke war es möglich, den Einfluss der Fahrbahnstruktur vom Materialeinfluss isoliert zu betrachten. Weiterhin bestand die Möglichkeit, die Fahrbahn-

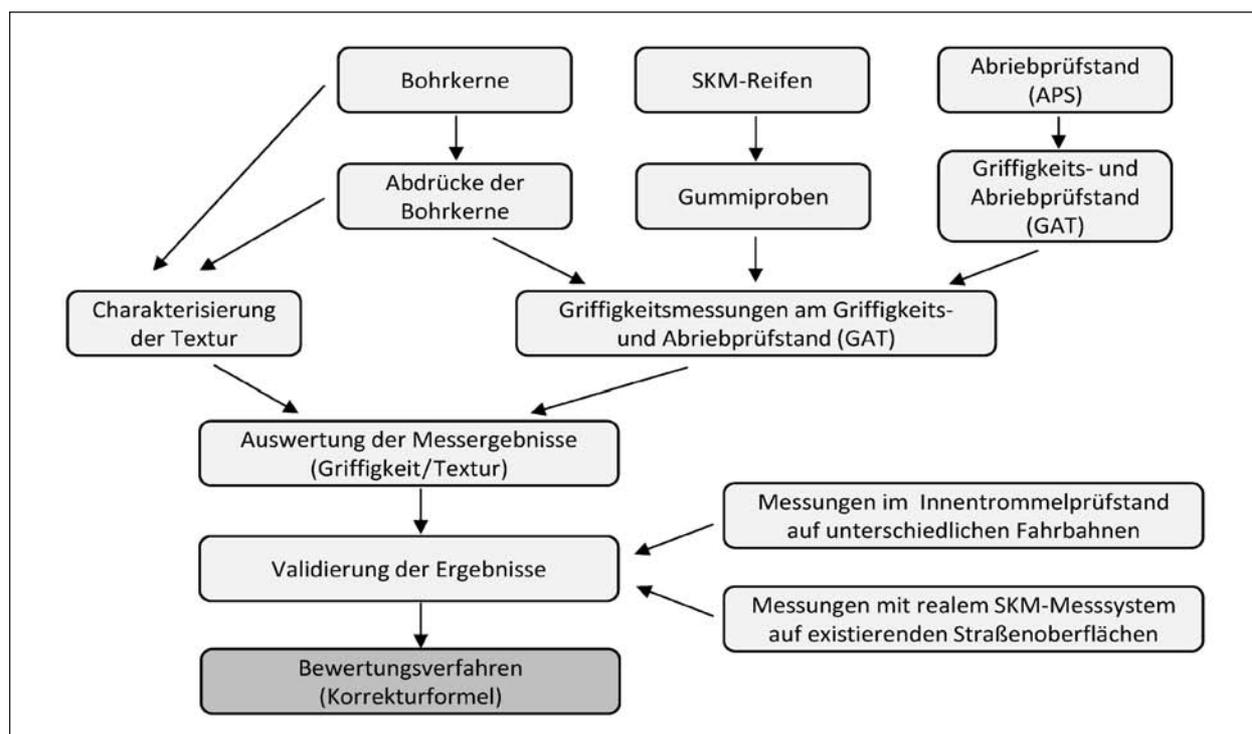


Bild 16: Geplantes Vorgehen bei der Projektbearbeitung

proben bei zu großem Verschleiß nahezu beliebig oft wiederherstellen zu können. Innerhalb des Forschungsprojektes wurde das entwickelte Abdruckverfahren zusätzlich in der Weise erweitert, dass Fahrbahnproben mit künstlicher Makrotextur, künstlicher Mikrotextur und der Kombination aus künstlicher Makro- und Mikrotextur erzeugt werden konnten.

Für die Versuche am GAT erfolgte eine repräsentative Auswahl, bezogen auf die zu untersuchenden Parameter, da nicht alle verfügbaren Bohrkernproben bei allen Parametern aus Zeitgründen geprüft werden konnten. Die Textur dieser Proben wurde mittels SRT-Pendels, der Sandfleckmethode, des Ausflussmessers nach Moore und des Texturmessgeräts ELAtextur® vor der Versuchsdurchführung charakterisiert. Dadurch konnten die ermittelten Griffigkeitswerte den Texturdaten gegenübergestellt werden.

Die ermittelten Ergebnisse und Schlussfolgerungen, die mit den Griffigkeitsversuchen am GAT gewonnen wurden, wurden anschließend mit Griffigkeitsmessungen, die im Innentrommelprüfstand (IPS) des Instituts für Fahrzeugtechnik (FAST) durchgeführt wurden, verifiziert. Abschließend wurden die unter Laborbedingungen (Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT), Innentrommelprüfstand (IPS)) ermittelten Messergebnisse mit Ergebnissen aus SKM-Straßenmessungen verglichen und daraus eine Korrekturformel, welche den Einfluss der Fahrbahnmakrotextur auf die Geschwindigkeitskorrektur berücksichtigt, abgeleitet.

4 Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)

In diesem Kapitel werden der ehemalige Gummiabriebprüfstand sowie der aktuelle Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) vorgestellt. Der ehemalige Gummiabriebprüfstand war in der ursprünglichen Ausbaustufe nicht für Griffigkeitsmessungen auf nassen Fahrbahnen, sondern nur für Gummiabriebversuche geeignet. Aus diesem Grund musste dieser zum Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) erweitert werden. In den folgenden Kapiteln werden zuerst der ursprüngliche Abriebprüfstand und im Anschluss daran der Umbau zum Griffigkeits- und Abriebprüfstand dargestellt.

4.1 Abriebprüfstand

4.1.1 Prüfstandaufbau

Der Gummiabriebprüfstand wurde am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) aufgebaut. Mit diesem Prüfstand war es möglich, Abriebversuche auf verschiedenen Fahrbahnoberflächen durchzuführen. Hierzu wurden kleine Gummirädchen (Bild 18) mit definierter Anpresskraft und definiertem Schräglaufwinkel gegen eine rotierende Fahrbahndeckenschicht (Bohrkern) gepresst. Nach einer festgelegten Versuchsdauer wurden die Rädchen demontiert, mit einer hochgenauen Waage gewogen und damit der Gummiabrieb bestimmt. In Bild 17 ist der Gesamtaufbau des ursprünglichen Gummiabriebprüfstandes abgebildet.

In Bild 18 ist die Messanordnung des Abriebprüfstandes vergrößert dargestellt. Über den Pneumatikzylinder „1“ wird die Anpresskraft, die der Radlast entspricht, auf das Gummirädchen „6“ aufgebracht. Parallel zu den Pneumatikzylindern „1“ sind Stoßdämpfer angebracht (in Bild 18 nicht dargestellt). Das Gummirädchen wird in Anpressrichtung somit mit einem Feder-Dämpfersystem über eine Linearführung geführt. Der ursprüngliche Gummiabriebprüfstand ermöglichte die gleichzeitige Durchführung von Abriebversuchen mit zwei Gummirädchen.

Über die Drehplatte „2“ kann ein definierter Schräglaufwinkel der Gummirädchen eingestellt werden. Zur genauen Einstellung ist eine Winkelskala angebracht. An der Position „3“ ist eine 3-Komponenten-Kraftmessdose verbaut. Diese misst alle auftretenden Radkräfte in x-, y- und z-Richtung. Die Stelle

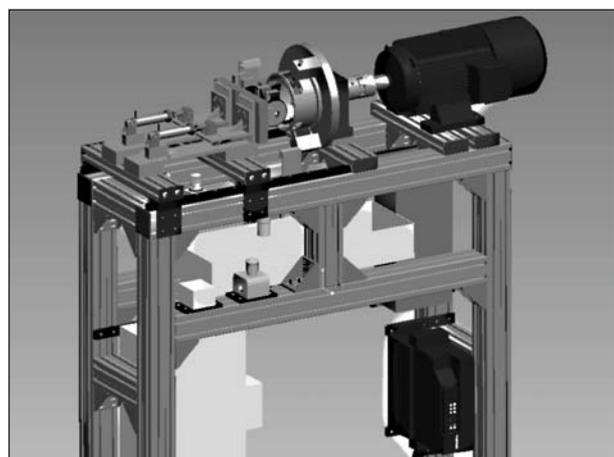


Bild 17: Gesamtaufbau des Abriebprüfstandes

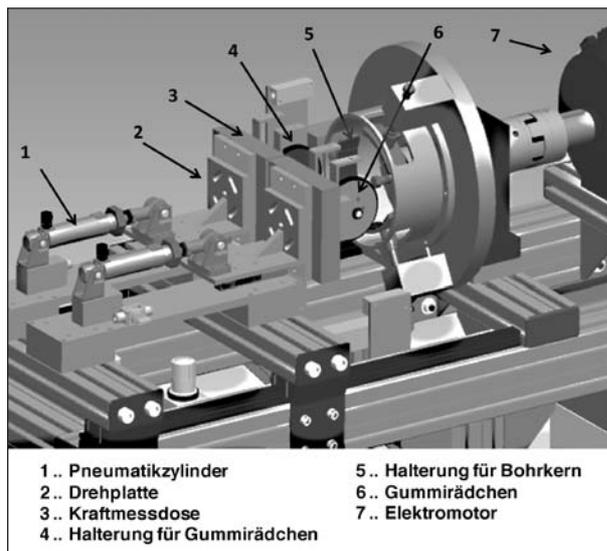


Bild 18: Messanordnung des Abriebprüfstandes

„4“ markiert die Halterung für die Gummirädchen. Diese rollen frei auf der Fahrbahnprobe ab. An der Stelle „5“ können runde Fahrbahnproben mit einem Außendurchmesser von 130 mm bis 150 mm befestigt werden. Die Fahrbahnproben werden an drei Stellen von außen verklemt.

Die genaue Prüfstandsbeschreibung und die genauen Spezifikationen können [ANTONOW, 09] entnommen werden.

4.1.2 Einstell- und Messmöglichkeiten

Folgende Messgrößen können am Abriebprüfstand eingestellt werden:

- Anpresskraft (0 bis 200 N),
(Einstellgenauigkeit ± 1 N statisch),
- Motordrehzahl (+1.500 bis -1.500 1/min),
- Schräglauf (+8° bis -8°, gradgenau),
- Gummirädchenposition auf dem Bohrkern.

Aufgezeichnet werden folgende Messgrößen:

- Kräfte in x-, y- und z-Richtung,
- Bohrkernzahl.

4.2 Griffigkeits- und Abriebprüfstand

4.2.1 Prüfandaufbau

Die Erweiterung des im vorherigen Kapitel vorgestellten Gummiabriebprüfstandes zum Griffigkeits-

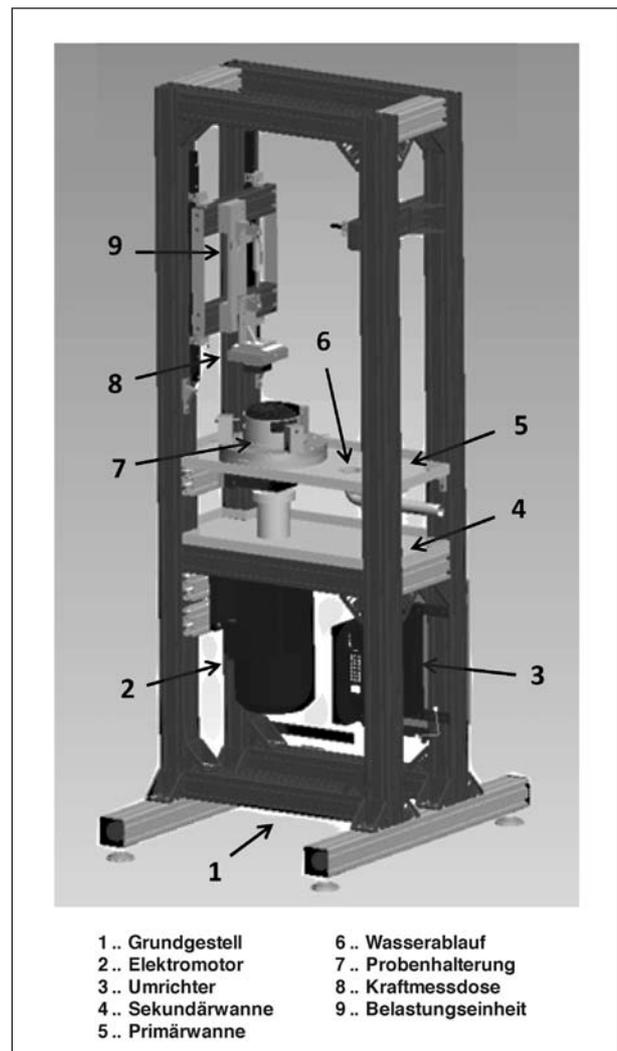


Bild 19: Gesamtkonzept des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes (GAT)

und Abriebprüfstand (GAT), im Folgenden nur noch als Griffigkeitsprüfstand bezeichnet, wird in diesem Unterkapitel vorgestellt. Für die im Rahmen des Projektes durchzuführenden Griffigkeitsversuche war es notwendig, die Versuchsanordnung des Gummiabriebprüfstandes so abzuändern, dass es möglich wurde, einen definierten Wasserfilm auf die rotierende Fahrbahnprobe aufbringen zu können. Außerdem sollte zusätzlich zu den Gummirädchen die Verwendung von Gummigleitkörpern für die Griffigkeitsversuche ermöglicht werden.

In Bild 19 ist das Gesamtkonzept des Griffigkeitsprüfstandes abgebildet. Auf die Darstellung der Außenverkleidung wird der Anschaulichkeit wegen verzichtet. Diese ist jedoch bei Griffigkeitsversuchen aus Sicherheitsgründen unverzichtbar.

Die grundlegende Funktionsweise des Griffigkeitsprüfstandes hat sich gegenüber dem im vorherigen

Unterkapitel vorgestellten Gummiabriebprüfstand nur unwesentlich geändert. Die Prüfanordnung wurde lediglich um 90° gedreht, sodass die zu untersuchende Fahrbahnprobe horizontal ausgerichtet ist. Dies soll ermöglichen, einen relativ gleichmäßigen und reproduzierbaren Wasserfilm während der Griffigkeitsversuche auf die Probe aufbringen zu können. Um das Annässungswasser gezielt abführen zu können und den Elektromotor vor Feuchtigkeit zu schützen, wurden die Primärwanne „5“ und die Sekundärwanne „4“ (vgl. Bild 19) angebracht. Die Primärwanne hat die Aufgaben das komplette Annässungswasser aufzufangen und über den Ablauf „6“ abzuführen. Die Sekundärwanne ist hier zusätzlich angebracht, um sicherzustellen, dass bei Undichtigkeiten der Drehstrommotor nicht in Kontakt mit dem Wasser kommt. Dies soll zum einen den Drehstrommotor schützen, hauptsächlich allerdings den Kontakt des Prüfstandbedieners mit unter Spannung stehenden Prüfstandteilen ausschließen. In Bild 20 ist der Gesamtaufbau des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes (GAT) inkl. der Außenverkleidung abgebildet.

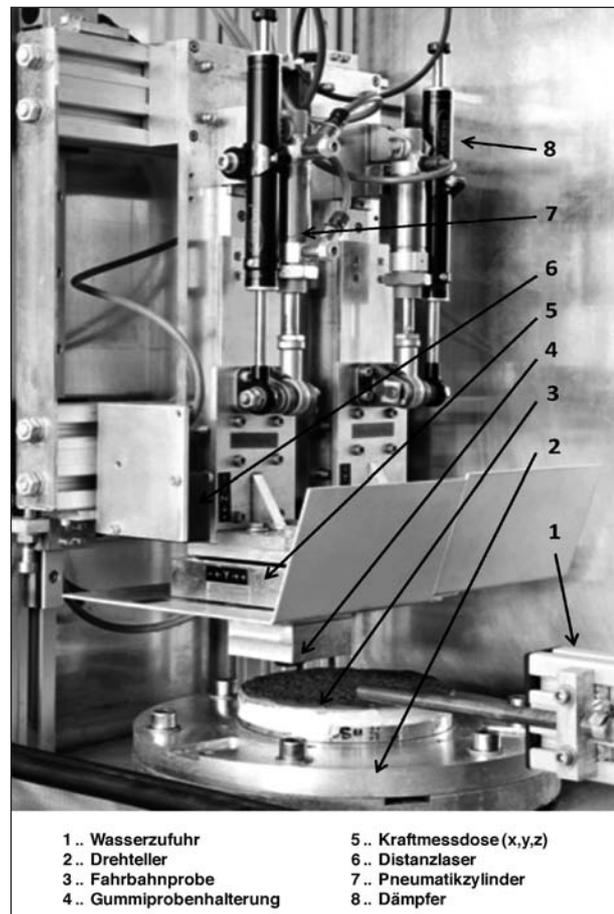


Bild 20: Gesamtaufbau des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes (GAT)

In dieser Abbildung ist die Aluminiumbeplankung mit einer Wandstärke von 5 mm angebracht. Diese hat zwei Hauptfunktionen. Zum einen bilden die Aluminiumwände wichtige Komponenten im Dichtungskonzept der Bewässerungseinrichtung. Zum anderen schützt die Aluminiumbeplankung den Prüfstandsbediener vor Teilchen der Prüfoberfläche (Prüfkörper), die sich bei den Griffigkeitsversuchen aus den Proben lösen können und dann mit hoher Geschwindigkeit nach außen weggeschleudert werden.

In Bild 21 sind die Belastungseinheit, die Wasserzufuhr und der Drehteller des Griffigkeitsprüfstandes abgebildet. Mit dieser Belastungseinheit ist es möglich, zwei Gummiprobekörper gleichzeitig auf demselben Abrollradius auf die Fahrbahnprobe zu pressen und untersuchen zu können.

Der Drehteller „2“, auf welchem die Fahrbahnproben befestigt werden, ist drehbar am Prüfstand gelagert und wird durch einen Elektromotor angetrieben. Die Drehzahl (0 ... 1.500 U/min) kann stufen-



- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1.. Wasserzufuhr | 5.. Kraftmessdose (x,y,z) |
| 2.. Drehteller | 6.. Distanzlaser |
| 3.. Fahrbahnprobe | 7.. Pneumatikzylinder |
| 4.. Gummiprobenthalterung | 8.. Dämpfer |

Bild 21: Belastungseinheit des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes (GAT)

los eingestellt werden. Wie in Bild 21 zu erkennen, ist der Drehteller aus zwei Teilen aufgebaut. Der obere Teil kann zum Fahrbahnprobenwechsel demontiert werden. Die Fahrbahnprobe „3“ ist mit dem oberen Teil des Drehtellers verschraubt und rotiert so während der Griffigkeitsversuche mit derselben Drehzahl. Auf dem Drehteller können Fahrbahnproben mit realen und künstlichen Texturen befestigt werden (Auswahl und Herstellung der Fahrbahnproben siehe Kapitel 5). Oberhalb der Fahrbahnprobe befindet sich die Gummiprobehalterung „4“, an welcher ein Gummigleitkörper (Bild 22b) befestigt ist. Alternativ hierzu kann ein Gummirädchen (Bild 22a) angebracht werden. Die Gummiprobehalterung ist direkt an der Kraftmessdose „5“ (3-Komponenten-Kraftmessdose) befestigt. Damit ist es möglich, die Anpresskraft (z-Richtung) sowie die auftretenden Reibkräfte (x-, y-Richtung) gleichzeitig zu messen. Die Kraftmessdose ist vertikal verschiebbar über eine Linearführung gelagert. Damit kann der Gummigleitkörper bzw. das Gummirädchen über den Pneumatikzylinder „7“ mit einer definierten, einstellbaren Anpresskraft von oben gegen die Fahrbahnprobe gepresst werden. Parallel zum Pneumatikzylinder ist ein Dämpfer „8“ angebracht, um die Einfederbewegung der Gummiprobe während der Griffigkeitsversuche zu dämpfen. Über den Distanzlaser „6“ können die vertikalen Wegänderungen des Gummigleitkörpers bzw. des Gummirädchens gemessen werden. Das Hochleistungs-pyrometer, mit welchem die Fahrbahnoberflächentemperatur gemessen wird, ist in dieser Ansicht nicht dargestellt. Mit der Wasserzufuhr „1“ kann eine definierte Wassermenge auf die Fahrbahnprobe aufgebracht und damit ein Wasserfilm erzeugt werden.

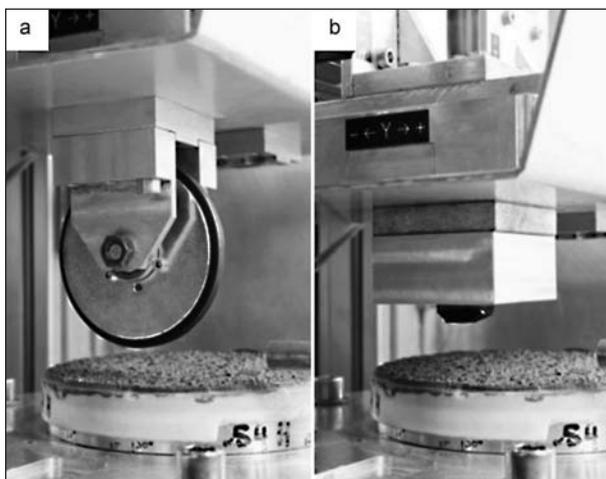


Bild 22: Gummirädchen (a) und Gummigleitkörper (b) des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes (GAT)

Wie bereits vorher erwähnt, sind in Bild 22 zwei mögliche Gummiprobearten abgebildet. Bei der einen Gummiprobe handelt es sich um ein Gummirädchen (a), welches frei abrollt und dessen Schräglaufwinkel von -8° bis 8° stufenlos eingestellt werden kann. Die Gummirädchen besitzen einen Außendurchmesser von ca. 80 mm bei einer Laufflächenbreite von ca. 6 mm. Bei der zweiten Gummiprobe handelt es sich um einen Gummigleitkörper (b), welcher über die Fahrbahnprobe gleitet. Dieser hat in der hier abgebildeten Ausführung eine quadratische Reibfläche von 10 x 10 mm.

In Bild 21 ist nur der sich innerhalb des Prüfstandes befindende Teil der Bewässerungseinrichtung in Form der Wasserzuführung abgebildet. Um bei späteren Versuchen reproduzierbar einen Wasserfilm erzeugen zu können, ist es notwendig, die zugeführte Wassermenge genau messen und einstellen zu können. Dies geschieht über den in Bild 23 abgebildeten Teil der Bewässerungseinrichtung, welcher außerhalb des Prüfstandes angebracht ist.

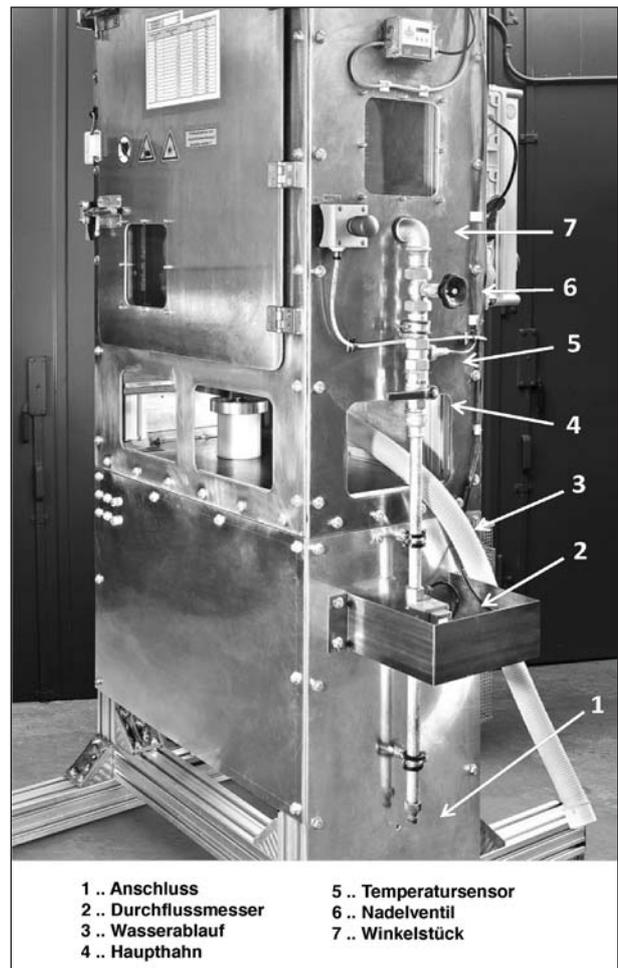


Bild 23: Bewässerungseinrichtung des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes (GAT)

An der Position „1“ wird das Wasser zugeführt. Dieses fließt anschließend durch den Ultraschalldurchflussmesser „2“, welcher den Wasservolumenstrom (0,08-20 l/min) bestimmt. Die Rohre vor und nach dem Ultraschalldurchflussmesser müssen eine Mindestlänge ($l_{\text{vor,nach}} \geq 5 \times D_{\text{innen}}$) aufweisen, um sicherzustellen, dass in der eigentlichen Messstrecke eine gleichbleibende laminare Strömung vorhanden ist. Diese Bedingung ist hier erfüllt, sodass verlässliche Messwerte bzgl. des Wasservolumenstroms zu erwarten sind. Das Wasser fließt anschließend durch den Haupthahn „4“, den Temperatursensor „5“ und das Nadelventil „6“. Danach wird das Wasser über das Winkelstück „7“ in den Prüfstand eingeleitet. Als Temperatursensor „5“ wird hier ein temperaturabhängiger Widerstand (Pt100) verwendet, welcher sich in Rohrmitte befindet und vom Wasser umspült wird. Über das Nadelventil „6“ kann der Wasservolumenstrom sehr genau eingestellt werden. Der Wasservolumenstrom wird zu Versuchsbeginn eingestellt. Während der Versuchsdurchführung findet keine Regelung statt. Über den Wasserablauf „3“ wird das in den Prüfstand eingeleitete Wasser ausgeleitet.

4.2.2 Sicherheitskonzept

Der Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) wurde so konstruiert und aufgebaut, dass er mechanisch und elektrisch sicher ist. In diesem Kapitel wird ein grober Überblick über das mechanische sowie elektrische Sicherheitskonzept gegeben. Genaueres kann [GRIMMIG, 10] entnommen werden.

Mechanisches Sicherheitskonzept

Um ein mechanisches Versagen des Prüfstandes zu vermeiden, wurden in [GRIMMIG, 10] der Spannsatz (Verbindung von Antriebswelle zu Drehsteller) und die Antriebswelle mechanisch dimensioniert. Bei einem Haftreibungskoeffizienten von 0,08 ([Tab_Metall, 08] geschmierte Stahl-Stahl-Reibpaarung) zwischen Spannsatz und Antriebswelle ergibt sich eine minimale Sicherheit gegen Durchrutschen des Spannsatzes von 1,5. Die Dimensionierung der Antriebswelle ergibt einen Sicherheitsfaktor von 3,9 gegen Dauerbruch.

Um zu vermeiden, dass aus der Fahrbahn gelöste Steinchen oder Fahrbahnteile den Prüfstandsbedienenden verletzen, wurde nahezu der gesamte Prüfstand mit einem 5 mm starken Aluminiumblech eingekapselt. Eine überschlägige Berechnung hier-

zu wurde ebenfalls in [GRIMMIG, 10] durchgeführt. Für die beiden Sichtfenster wurden Makrolonscheiben mit 8 mm Stärke verwendet.

Elektrisches Sicherheitskonzept

Da der Griffigkeits- und Abriebprüfstand mit Drehstrom (380 V) bei gleichzeitigem Betrieb der Bewässerungseinrichtung arbeitet, ist es unbedingt notwendig, das elektrische Sicherheitskonzept so auszulegen, dass selbst bei Wassereintritt in die Elektrik keine Lebensgefahr für den Prüfstandsbediener besteht. Aus diesem Grund wird die gesamte Stromversorgung über zwei unterschiedliche Fehlerstromschutzschalter und zusätzliche elektrische Sicherungen betrieben. Beide Fehlerstromschutzschalter lösen bei einem Fehlerstrom von ≥ 30 mA aus. Dadurch ist der Personenschutz gewährleistet und der Prüfstand kann nahezu gefahrlos betrieben werden.

Als weitere Sicherheitseinrichtungen sind zwei Not-ausschalter am Prüfstandgehäuse sowie ein Magnetschalter an der Prüfstandtür angebracht. Beim Öffnen der Prüfstandtür bremst der Umrichter den Drehstrommotor innerhalb einer Sekunde bis zum Motorstillstand ab. Somit ist es ausgeschlossen, dass der Prüfstandsbediener mit der drehenden Fahrbahnprobe in Kontakt kommt. Bei Betätigung eines Notauschalters wird zuerst der Motor bis zum Stillstand abgebremst (≤ 1 s) und im Anschluss der Hauptschütz des Prüfstandes betätigt, wodurch der Drehstromteil vollständig von der Spannungsversorgung getrennt wird. Ein Notauschalter des Prüfstandes ist mit einem Schloss versehen, sodass der Prüfstand nach Betätigung dieses Notauschalters nur mit dem zugehörigen Schlüssel wieder in Betrieb genommen werden kann. Die Schaltpläne sowie genaueren Beschreibungen können [GRIMMIG, 10] entnommen werden.

4.2.3 Messsystem

Der Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) wird mit einem NI-PXI-Messsystem betrieben. Folgende Komponenten werden hierbei verwendet:

- NI-PXI-8106 (Messrechner),
- NI-PXI-6281 (Multichannel-Karte),
- NI-SCC-68 (Anschlussbox).

Das Messprogramm wurde in Labview 2010 programmiert. Die Benutzeroberfläche ist in Bild 24 abgebildet.

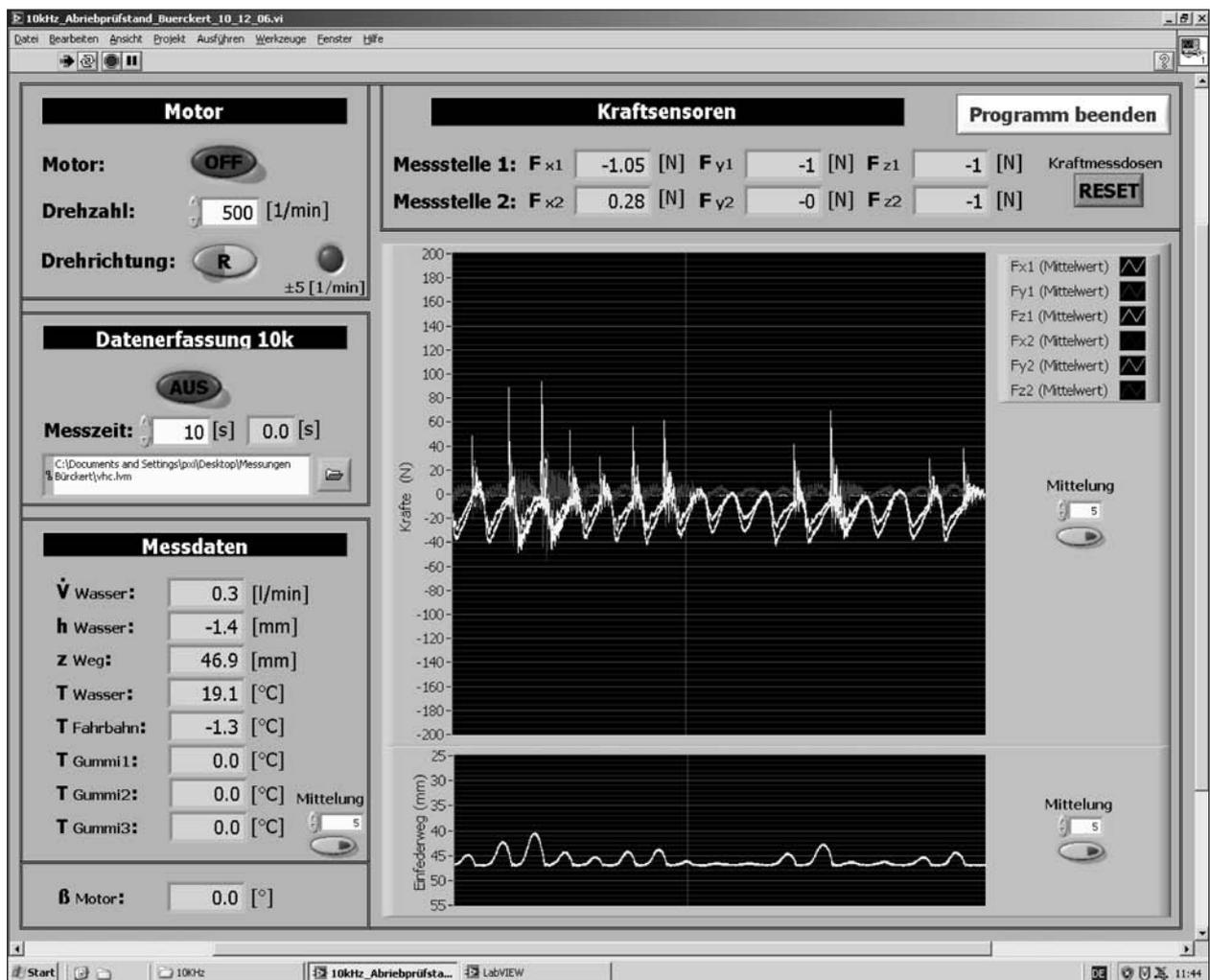


Bild 24: Benutzeroberfläche des GAT-Messprogramms

Zur Messwertaufzeichnung wird jeder zu messende Kanal mit 40 kHz abgetastet. Bevor die Daten abgespeichert werden, wird aus 4 aufeinanderfolgenden Messwerten ein Mittelwert (arithmetischer Mittelwert) gebildet und dieser dann abgespeichert. Daraus folgt, dass die Frequenz der Messwertaufzeichnung bei 10 kHz liegt. Bei der gegebenen Aufzeichnungsfrequenz von 10 kHz erhält man bei der Maximaldrehzahl der Fahrbahnprobe von 1.500 U/min 400 Messwerte (je Messkanal) pro Fahrbahnprobenumdrehung.

Momentan ist in diesem Messsystem kein Anti-Aliasingfilter integriert. Dies bedeutet, dass mit den erhaltenen Messergebnissen zurzeit keine Frequenzanalysen durchgeführt werden können. Dies ist für die Auswertung der Griffigkeitsmessungen innerhalb dieses Forschungsprojektes jedoch nicht von Bedeutung.

4.2.4 Einstell- und Messmöglichkeiten

Die folgenden Parameter können am Griffigkeitsprüfstand eingestellt werden:

- Anpresskraft (0 bis 200 N), (Einstellgenauigkeit ± 1 N statisch),
- Motordrehzahl (0 bis 1.500 1/min),
- Motordrehrichtung (links/rechts),
- Schräglauf ($+8^\circ$ bis -8° , gradgenau),
- Gummiprobe(n)position auf dem Bohrkern,
- Wasservolumenstrom (≤ 20 l/min),
- Wassertemperatur über externe Wassertanks in Kombination mit einer Wassermischbatterie (nicht Bestandteil des GAT).

In Tabelle 5 sind die technischen Daten der verwendeten Sensoren angeführt, deren Kanäle bei Griffigkeitsmessungen aufgezeichnet werden.

| Messgröße | Messbereich | Messgenauigkeit |
|--|---------------------|---|
| Kraft in x-Richtung (Kraftmessdose 1) | - 200 N bis + 200 N | Linearität: $\pm 0,5 \%$ Übersprechen: $\leq 1 \%$ |
| Kraft in y-Richtung (Kraftmessdose 1) | - 200 N bis + 200 N | Linearität: $\pm 0,5 \%$ Übersprechen: $\leq 1 \%$ |
| Kraft in z-Richtung (Kraftmessdose 1) | - 200 N bis + 200 N | Linearität: $\pm 0,5 \%$ Übersprechen: $\leq 1 \%$ |
| Fahrbahnprobendrehzahl (Inkrementalgeber) | ± 1.500 1/min | $\pm 1 \%$ |
| Fahrbahnprobendrehwinkel (Inkrementalgeber) | 0 .. 360 ° | $\pm 0,25 \%$ |
| Wasservolumenstrom (Ultraschalldurchflussmesser) | 0,08 .. 20 l/min | $\pm (0,7 \%$ des momentanen Messwertes + 0,7 % des Endwertes) |
| Wassertemperatur (Pt100) | 0 .. 100 °C | $\pm 1,7 \%$ |
| Fahrbahnprobentemperatur (Hochleistungs-pyrometer) | 0 .. 100 °C | $\pm 1 \%$ |
| Fahrbahnprobenposition (Distanzlaser) | 30 .. 50 mm | 0,01 mm Auflösung $\pm 0,03$ mm Linearität |

Tab. 5: Technische Daten der verwendeten Sensoren am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)

5 Auswahl und Herstellung der Prüfkörper (Fahrbahnproben)

In diesem Kapitel werden die Prüfkörper (Fahrbahnproben) vorgestellt, die für die Untersuchungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) zur Verfügung standen.

5.1 Bohrkerne aus existierenden Fahrbahndeckschichten

Der GAT wurde so konzipiert, dass runde Fahrbahnproben mit einem Außendurchmesser bis zu max. 150 mm und einer Höhe bis max. 60 mm eingebaut und untersucht werden können. Diese Fahrbahnproben werden aus Bohrkernen, welche zu Kontrollzwecken aus realen Fahrbahndecken gezogen werden, hergestellt. In Bild 25 ist ein solcher Kontrollbohrkern abgebildet.

Der in Bild 25 abgebildete Bohrkern kann aufgrund seiner Abmessungen nicht in den GAT eingebaut werden. Hierzu muss die oberste Schicht (60 mm) vom Rest abgetrennt werden. Das Abtrennen der unteren Schichten hat keinen Einfluss auf die Griffigkeit, da für die Untersuchungen in diesem Projekt ohnehin nur die Textur der Fahrbahnoberfläche von Bedeutung ist. In Bild 26 ist eine Fahrbahnprobe abgebildet, wie sie in den GAT eingespannt und untersucht werden kann.

Da in diesem Forschungsprojekt der Einfluss der Makrotextur auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit auf SKM-Messergebnisse untersucht werden soll-



Bild 25: Bohrkern aus einer Fahrbahnbefestigung

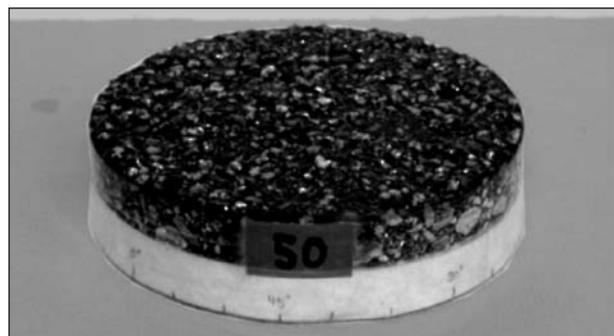


Bild 26: Für Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) zugeschnittener und vorbereiteter Bohrkern

te, war es notwendig, Griffigkeitsversuche auf möglichst vielen unterschiedlichen Fahrbahntexturen, mit unterschiedlichen Ausprägungen der Makrotextur, durchzuführen.

5.1.1 Bohrkernübersicht

Die 20 Fahrbahnproben, die verfügbar waren (Bohrkerne aus Fahrbahnbelägen) sind in Tabelle 6 aufgelistet. Diese konnte nicht vollständig ausgefüllt werden, da nicht alle Daten zu den Bohrkernen vorlagen. Dies hatte jedoch für die weitere Bearbeitung des Projektes keine größere Bedeutung, da bei den Griffigkeitsversuchen ausschließlich die Textur der Fahrbahnproben und nicht deren Zusammensetzung von Interesse ist. Im Anhang I ist zu jedem in Tabelle 6 aufgelisteten Bohrkern eine Fotografie abgebildet.

Die Nummerierung der Bohrkern in Tabelle 6 wurde aufgrund der Herkunft der verschiedenen Bohrkern gewährt. Die Bohrkern 4 bis 32 sind Bohrkern, die am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (KIT) für dieses Forschungsprojekt zur Verfügung standen.

| Bohrkern | Art | Größtkorn [mm] |
|----------|----------------------|----------------|
| 4 | Splittmastix | 8 |
| 5 | Splittmastix | 11 |
| 6 | Asphaltbeton | 11 |
| 7 | Splittmastix | 11 |
| 10 | Splittmastix | 16 |
| 11 | Asphaltbeton | 8 |
| 14 | Splittmastix | 11 |
| 21 | Offenporiger Asphalt | 11 |
| 29 | - | 5 |
| 30 | Beton | - |
| 32 | Beton | - |
| 40 | Splittmastix | - |
| 41 | Splittmastix | - |
| 42 | Splittmastix | - |
| 43 | Splittmastix | - |
| 50 | Gussasphalt | 11 |
| 51 | Beton | - |
| 52 | Beton | - |
| 53 | Waschbeton | 8 |
| 54 | Beton | - |

Tab. 6: Bohrkernübersicht

Die Bohrkern 40 bis 43 wurden freundlicherweise vom Institut für Straßen und Eisenbahnwesen (ISE) zur Verfügung gestellt.

Die Bohrkern 50 bis 54 stammen von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt).

Da für dieses Forschungsprojekt ausschließlich die Oberflächentextur der Bohrkern von Interesse ist, wurde auf die eigentliche Fahrbahnzusammensetzung (Bindemittel, Körnung usw.) nicht weiter eingegangen. Die Fahrbahndeckschichten wurden vor Versuchsbeginn mittels geeigneter texturbasierender Kennwerte charakterisiert (Kapitel 5.4).

5.1.2 Problemstellung bei der Verwendung von realen Fahrbahnbohrkernen

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, kommen auf deutschen Straßen unterschiedliche Fahrbahnläge, die die jeweiligen Anforderungen an den Einsatzzweck und den Einsatzort erfüllen, zur Anwendung. Hauptsächlich handelt es sich hierbei um Beton- und Asphaltfahrbahnbeläge.

Da die Griffigkeit auch von der Materialpaarung (Gummi und Fahrbahnbelag) abhängt, sind aufgrund der unterschiedlichen Fahrbahnmaterialien unterschiedliche Griffigkeitswerte zu erwarten, selbst wenn alle anderen Einflussgrößen (Fahrbahntextur, Schmierfilmeinfluss, Temperaturen usw.) identisch sind. Dieser Unterschied kann auf die unterschiedlichen materialabhängigen Adhäsionsreibbeiwertanteile zurückgeführt werden.

Da in diesem Forschungsvorhaben jedoch ausschließlich der Einfluss der Makrotextur auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit der SKM-Griffigkeitswerte untersucht werden sollte, musste der Materialeinfluss durch das Erzeugen einer konstanten Materialpaarung eliminiert werden. Dadurch konnte der Textureinfluss unabhängig vom Materialeinfluss betrachtet werden.

Ein weiteres Problem stellt der Versuchsablauf im Prüfstand dar. Hierbei gleitet ein Gummikörper bei der Versuchsdurchführung immer wieder über dieselbe Stelle auf der Fahrbahnprobe, wodurch die Mikrorauheit möglicherweise mit fortschreitender Versuchszeit immer weiter abgebaut wird. Da die Griffigkeit der Fahrbahn von der Mikrorauheit abhängt, äußert sich die mehrmalige Überrollung in fallenden Griffigkeitswerten. Dies kann auf Poliereffekte und/oder Verschmutzungen (z. B. Gummi-

abrieb) der Fahrbahn zurückgeführt werden. Daher war es bisher nicht möglich, ein und denselben Griffigkeitsversuch reproduzierbar wiederholen zu können.

Um die beschriebenen Probleme zu lösen, wurde innerhalb dieses Forschungsprojektes ein Verfahren zur künstlichen Herstellung von reproduzierbaren Probekörpern (Fahrbahnproben) entwickelt welches im folgenden Kapitel näher erläutert wird.

5.2 Herstellung von Fahrbahnabdrücken mit realen Fahrbahntexturen

Beim hier entwickelten Verfahren handelt es sich um ein Abdruckverfahren. Die in Tabelle 6 angeführten Bohrkern wurden hierfür als Vorlagen verwendet. Im Folgenden wird das entwickelte Verfahren detailliert beschrieben.

5.2.1 Ausrichtung und Einbettung des Originalbohrkerns

In einem ersten Schritt wurde ein Negativabdruck eines Originalbohrkerns erstellt. Hierzu war es notwendig, den Originalbohrkern zuerst auf einer Unterlage so zu positionieren, dass die Oberfläche waagrecht ausgerichtet ist. Dazu wurde der Bohrkern mit Knetmasse an drei Stellen auf einer Unterlage gelagert. Mit einer hochgenauen Wasserwaage und gezieltem Anpressen konnte der Bohrkern nun in die geforderte Position gebracht werden. Nach der Positionierung musste das Original nun eingebettet werden. In Bild 27a sind der Originalbohrkern und in Bild 27b der ausgerichtete und eingebettete Original-Bohrkern abgebildet.

Zur Einbettung (Anbringung einer Umrandung) wurde hier ein handelsüblicher Tortenring verwendet,

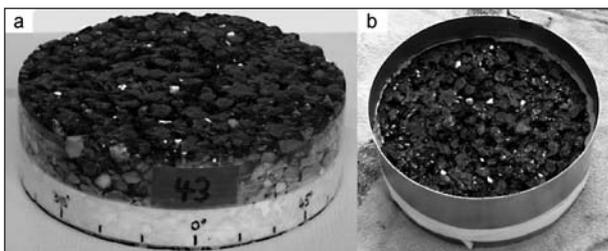


Bild 27: Originalbohrkern (a), ausgerichteter und eingebetteter Originalbohrkern (b)

da dieser problemlos an unterschiedliche Außendurchmesser angepasst werden konnte. Das Einbetten musste sehr vorsichtig geschehen, so dass sich die Lage des ausgerichteten Bohrkernes nicht änderte.

5.2.2 Herstellung des Negativabdrucks

Für die Herstellung des Negativabdrucks wurde ein 2-Komponenten-Flüssig-Silikon verwendet. Bei Vorversuchen wurden verschiedene Silikone verwendet und miteinander verglichen. In den weiteren Abformprozessen wurde allerdings nur noch das Flüssigsilikon „Neukasil RTV 22“ mit dem Vernetzer „Neukasil VNA 142“ der Firma Altropol verwendet, da dieses Silikon sehr fließfähig ist und der Verzögerer „SN 2432“ zur Verfügung stand, um den Aushärteprozess zu verlangsamen. Durch den längeren Aushärteprozess und die sehr gute Fließfähigkeit konnte das Flüssigsilikon besser in die Fahrbahntextur eindringen. Außerdem befanden sich, durch die längere Aushärtezeit, weniger Lufteinschlüsse in der ausgehärteten Silikonform. In Bild 28a sind das Einfüllen der Silikongießmasse und in Bild 28b die fertige Silikonform abgebildet. Die angefertigte Silikonform stellt den Negativabdruck der Textur des Original-Bohrkernes dar.

Die ausgehärtete Silikonform ließ sich sehr gut auch ohne Trennmittel von der Originalvorlage ablösen. Hierbei musste allerdings darauf geachtet werden, dass das Ablösen sehr langsam geschah, damit die Silikonmasse aus eventuell vorhandenen Hinterschnitten der Textur gleiten konnte. Die Anwendbarkeit ohne Trennmittel war für die Durchführung dieses Forschungsprojektes von großem Vorteil, da so feine Texturanteile nicht durch ein vorhandenes Trennmittel überdeckt wurden und somit beim Abformen erhalten blieben.

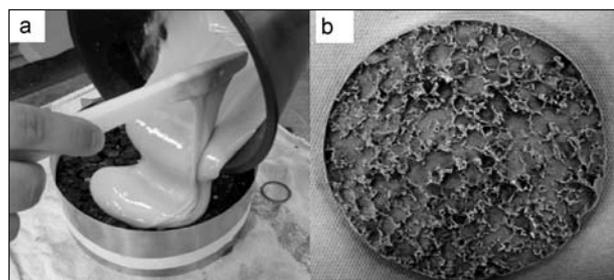


Bild 28: Gießprozess mit Flüssigsilikon (a), fertige Silikonform (b)

5.2.3 Herstellung des Positivabdrucks

Für die Herstellung des Positivabdrucks wurde die Silikonform (Negativabdruck), analog zum Originalbohrkern aus dem vorherigen Unterkapitel, ausgerichtet und eingebettet. Danach wurde das Abgussmaterial, aus dem der spätere Fahrbahnbelag bestehen soll, eingefüllt. In diesem Forschungsprojekt wurden Fahrbahnabdrücke aus Kunstharz mit dem Füllstoff Strahlkorund hergestellt.

In Bild 29 sind die ausgerichtete und eingebettete Silikonform (a) sowie der Gießprozess mit Kunstharz (b) abgebildet.

Die Fließfähigkeit des Abgussmaterials bestimmt in erheblichem Maße die Vergleichbarkeit der Textur von Original und Replikat. Bei der Auswahl des Abgussmaterials muss darauf geachtet werden, dass kein oder nur vernachlässigbares Schrumpfen beim Aushärten auftritt, da ansonsten keine ausreichende Vergleichbarkeit zwischen Original und Replikat gegeben ist. Zu Beginn wurden hierzu Vorversuche mit verschiedenen Abgussmaterialien durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass der Schrumpfeffekt bei manchen Kunstharzen so groß war, dass ein Verziehen der gesamten Probe stattfand. Die Verwendung des Kunstharzes „Neukadur Multicast 12“ der Firma „Altropol“ brachte augenscheinlich ein sehr gutes Ergebnis. Die Abbildungsgenauigkeit der Abdrücke wird im Kapitel 5.2.4 genauer beurteilt. In

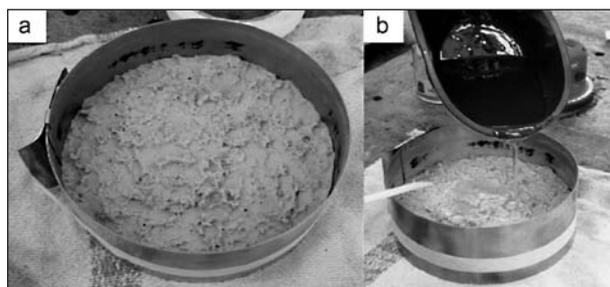


Bild 29: Ausgerichtete und eingebettete Silikonform (a), Gießprozess mit Kunstharz (b)

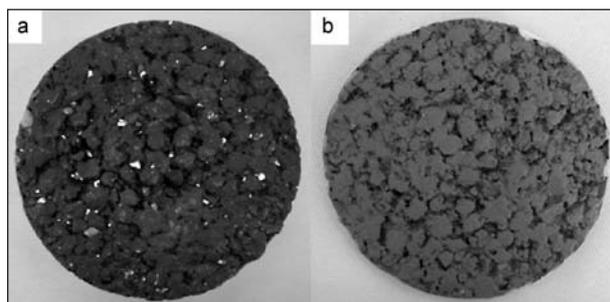


Bild 30: Originalfahrbahnbelag (a), Kunstharzabdruck mit Strahlkorund „Körnung 0,075-0,125 mm“ (b)

Bild 30a sind der Originalfahrbahnbelag und in Bild 30b der zugehörige Kunstharzabdruck (Neukadur MultiCast 12 „Altropol“ mit Strahlkorund) abgebildet.

Das Kunstharz wurde mit Strahlkorund der Körnung 0,075-0,125 mm als zusätzlichem Füllstoff vermischt. Durch die Beimischung des Strahlkorundes soll die Haltbarkeit des Fahrbahnabdrucks bei späteren Griffigkeitsmessungen erhöht werden. Im Anhang II ist die Übersichtstabelle zu den 20 verfügbaren Originalbohrkernen und den damit hergestellten Abdrücken abgebildet.

5.2.4 Abbildungsgenauigkeit

Um sicherzustellen, dass das hier entwickelte Abdruckverfahren für die Herstellung von Fahrbahnabdrücken geeignet ist, wurde eine Quantifizierung der Abbildungsgenauigkeit durchgeführt. Hierzu wurde ein Abdruck eines Rauheitsnormals nach dem bereits zuvor beschriebenen Verfahren (vgl. Kapitel 5.2.2 und 5.2.3) angefertigt. Das Rauheitsnormal sowie der davon erstellte Abdruck wurden anschließend mittel Tastschnittgeräts vermessen und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Vorgehen

In einem ersten Schritt wurde analog zu der in Kapitel 5.2 beschriebenen Vorgehensweise ein Silikonabdruck (Negativabdruck) von einer Originaltextur hergestellt. Als Original wurde hierzu ein Oberflächenvergleichsnormals aus Stahl (Rugotest 1 „Studenroth“) verwendet. Mit Hilfe der gewonnenen Negativform wurde nun mittels Kunstharzes („Neukadur MultiCast 12“) ein Positivabdruck angefertigt.

Die Oberflächen des Originals sowie des Positivabdrucks wurden anschließend mittels Tastschnittgeräts „Mahr Perthometer M2“ abgetastet.

Tastschnittgerät

Bei dem verwendeten Messgerät wird eine Tastschneidspitze über die zu vermessende Oberfläche gezogen und das Höhenprofil aufgezeichnet. Das Messgerät besitzt in Längsrichtung (x-Achse) eine Auflösung von 0,5 µm und in Hochrichtung (z-Achse) eine Auflösung von 12 nm. In Bild 31 ist der Messaufbau des Perthometer M2 mit dem verwendeten Oberflächenvergleichsnormals abgebildet.

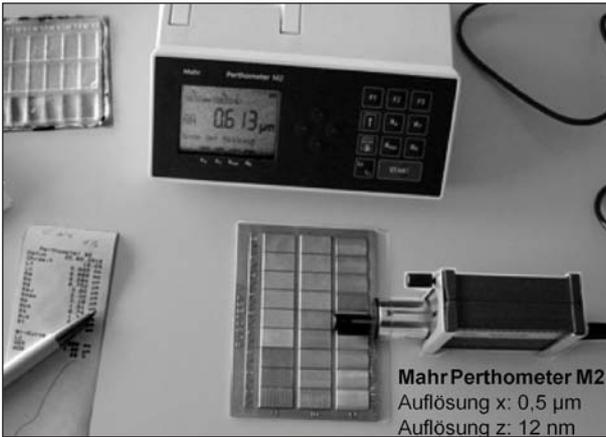


Bild 31: Messaufbau Perthometer M2 „Mahr“

Ergebnis

Zur Bewertung der Abbildungsgenauigkeit wurde hier der arithmetische Mittenrauhwert R_a verwendet. In Bild 32 ist die Rauheitseinteilung des Rauheitsnormals „Rugotest 1“ abgebildet. Das Rauheitsnormal ist in die Kategorien A, B und C (unterschiedliche Bearbeitungsverfahren) und Rauheitsklassen N2 bis N10 eingeteilt.

Für den Vergleich des Originalrauheitsnormals und dessen Kunstharzabdrucks wurden jeweils die Rauheitsklassen N4 bis N10 der Kategorie C vermessen. Die Kategorie C wurde gewählt, da hier die gleichmäßigsten Oberflächen zu erkennen sind und daher die Reproduzierbarkeit der Messung am besten ist.

In Bild 33 sind die Abweichungen der R_a -Werte vom Oberflächenvergleichsnormale zum Kunstharzabdruck abgebildet. Die maximale Abweichung (zwischen Original und Abdruck) der Messwerte (R_a) lag für Oberflächen, die Rauheiten im μm -Bereich aufweisen, im niedrigen Prozentbereich (ca. 1 % bis 7 %). Daraus kann geschlossen werden, dass das entwickelte Abdruckverfahren in Kombination mit dem verwendeten Silikon und Kunstharz gute Abbildungseigenschaften bis in den μm -Bereich aufweist.

In Bild 34 sind exemplarisch die Messschriebe des Rauheitsfeldes CN10 abgebildet.

Beim Vergleich der beiden Messkurven ist zu erkennen, dass diese nahezu identisch sind. Die vorhandenen Abweichungen sind teilweise durch die unterschiedlichen Messpositionen des Tasters auf der Probe zu erklären, da es aus Positionierungsgründen nicht möglich ist, die identische Messlinie auf Original und Positivabdruck zu vermessen.

| Rugotest 1 | | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------|-----|-----|-----------|-----|--------|-----|-----|-----|--|
| | N 10 | N 9 | N 8 | N 7 | N 6 | N 5 | N 4 | N 3 | N 2 | |
| A | Walzfräsen | | | Schleifen | | | | | | |
| | Stirnfräsen | | | | | Läppen | | | | |
| B | Hobeln / Drehen | | | | | Hohnen | | | | |
| | 12.5 | 6.3 | 3.2 | 1.6 | 0.8 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | |
| Rauheit R_a | | | | | | | | | | |

Bild 32: Rauheitseinteilung des Rugotest 1 „Studenroth“ [STUDENROTH, 10]

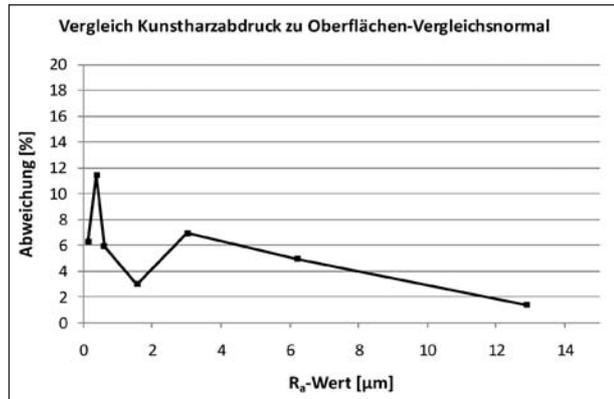


Bild 33: Vergleich des Kunstharzabdrucks zum Oberflächen-Vergleichsnormale

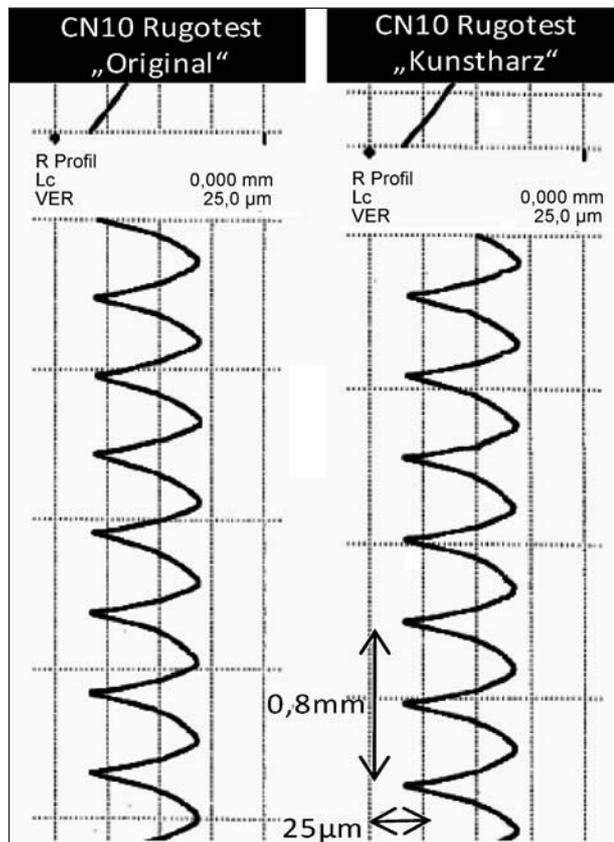


Bild 34: Messschriebe des Oberflächenvergleichsnormals und des Kunstharzabdrucks

5.2.5 Vor- und Nachteile

In diesem Kapitel werden die Vor- und Nachteile des in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Abdruckverfahrens vorgestellt.

Vorteile

- Alle Proben sind aus demselben Material hergestellt. Dadurch ist der Griffigkeitswert nicht mehr materialabhängig. Der Textureinfluss kann hierdurch isoliert vom Materialeinfluss betrachtet werden.
- Jede Fahrbahnprobe kann nahezu beliebig oft wiederhergestellt werden, wenn die Mikrotextur der Probe durch Griffigkeitsversuche verändert wird.
- Die Mikro- und Makrotextur der Fahrbahnproben kann durch eine Erweiterung des Abdruckverfahrens gezielt variiert werden (Weiteres hierzu in Kapitel 5.3).

Nachteile

- Griffigkeitsergebnisse der Kunstharzabdrücke sind eventuell nicht direkt auf reale Fahrbahnen übertragbar.
- Die Oberflächenchemie wird durch die Verwendung des Kunstharzes verändert.

Fazit

Durch das hier entwickelte Abdruckverfahren können Abdrücke von beliebigen Fahrbahnoberflächen reproduzierbar hergestellt werden. Hierdurch sind Griffigkeitsuntersuchungen unabhängig vom Fahrbahnmaterial möglich.

Die Texturabweichung des Kunstharzabdrucks zum Original beträgt selbst im μm -Bereich nur wenige Prozent.

5.3 Herstellung von Proben mit künstlichen Fahrbahntexturen

Im vorangegangenen Unterkapitel wurde das neu entwickelte Verfahren vorgestellt, mit welchem es möglich ist, Abdrücke von vorhandenen realen Fahrbahntexturen herzustellen.

In diesem Unterkapitel soll nun eine Erweiterung des entwickelten Verfahrens vorgestellt werden. Mit

dieser Erweiterung soll es möglich sein, Fahrbahnproben mit frei wählbaren artifiziellen Texturen herstellen zu können.

5.3.1 Problemstellung

Um ein Grundverständnis für die Reibeigenschaften unterschiedlicher Texturen zu erlangen, wäre es wünschenswert, Fahrbahntexturen mit frei wählbarer Textur herstellen zu können. Hierbei wurde innerhalb dieses Projektes darauf geachtet, dass eine regelmäßige, geometrisch eindeutig definierte Oberfläche erzeugt werden konnte. Die Makrotextur sowie die Mikrotextur sollten gezielt variiert werden können. Weiterhin sollte die Herstellung verschiedener Kombinationen aus Makro- und Mikrotextur möglich sein.

5.3.2 Lösungsansatz

Um die Makrotextur (Dränage) und die Mikrotextur (Schärfe) eindeutig festlegen zu können, sollte die Oberfläche aus kugelförmigen Texturen zusammengesetzt sein.

5.3.3 Herstellung von Fahrbahnproben mit unterschiedlicher Makrotextur

Die Herstellung der Fahrbahnproben mit unterschiedlicher Makrotextur lief in den folgenden Schritten ab:

1. Herstellung des Probengrundkörpers (Aluminiumgrundplatte),
2. Beschichtung des Probengrundkörpers mit Knetmasse,
3. Aufbringung der Makroglaskugeln auf die Knetmasse,
4. leichtes Einpressen der Glaskugeln in die Knetmasse,
5. Herstellung eines Silikonabdrucks,
6. Herstellung eines Kunstharzabdrucks auf Grundlage des Silikonabdrucks.

Der beschriebene Ablauf wird im Folgenden genauer erläutert.

Um mit den hergestellten Fahrbahnabdrücken Griffigkeitsversuche am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) durchführen zu können, war es notwendig, dass die Fahrbahnproben eine runde Pro-

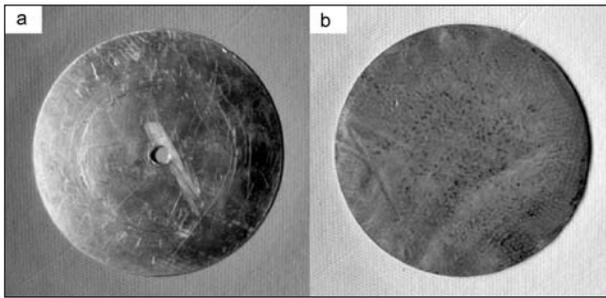


Bild 35: Aluminiumgrundplatte (a), mit Knetmasse beschichtete Aluminiumgrundplatte (b)

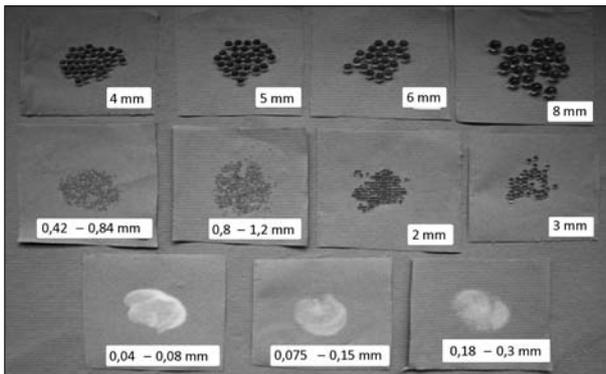


Bild 36: Glaskugeln bzw. Mikroglasskugeln

bengeometrie (Kapitel 5.1) aufwiesen. In Bild 35 sind der Probengrundkörper (a) und der mit Knetmasse (Pelikan-Plastilin-Qualitätsknetmasse) beschichtete Probengrundkörper (b) abgebildet.

Die Kugeltextrur wurde mit Glaskugeln bzw. Mikroglasskugeln erzeugt. In Bild 36 sind die verwendeten Glaskugeln bzw. Mikroglasskugeln in den entsprechenden Größen abgebildet.

Die Glaskugeln wurden auf den mit Knetmasse beschichteten Probengrundkörper aufgebracht (dichteste Kugelpackung) und leicht in die Knetmasse eingepresst, um deren Position zu fixieren (Bild 37).

Der in Bild 37 abgebildete Probengrundkörper mit den leicht eingepressten Glaskugeln konnte für Griffigkeitsversuche nicht verwendet werden, da die Glaskugeln bei Kontakt mit dem Gummigleitkörper aus der Knetmasse gerissen würden. Aus diesem Grund wurde analog zum vorherigen Kapitel ein Silikonabdruck angefertigt. Dieser ist in Bild 38 abgebildet.

Mit dem Silikonabdruck aus Bild 38 wurde anschließend ein Kunstharzabdruck (gleiche Zusammensetzung wie bei realen Fahrbahnabdrücken) angefertigt. Dieser ist in Bild 39 abgebildet.

Mit diesem Kunstharzabdruck konnten nun Griffigkeitsversuche am Griffigkeits- und Abriebprüfstand

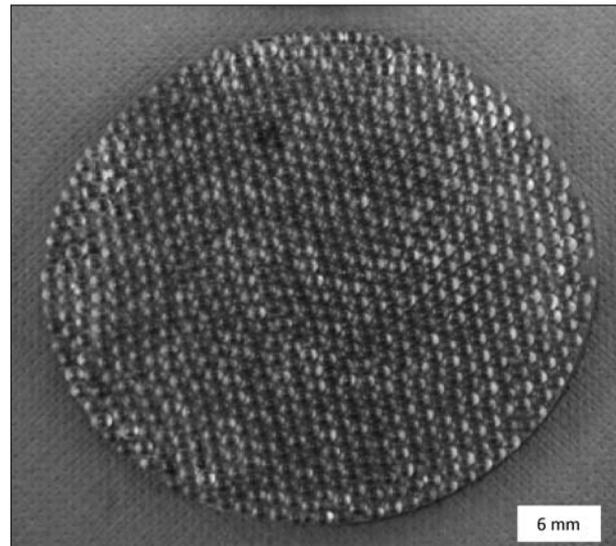


Bild 37: Beispiel eines Probengrundkörpers mit eingepressten Glaskugeln

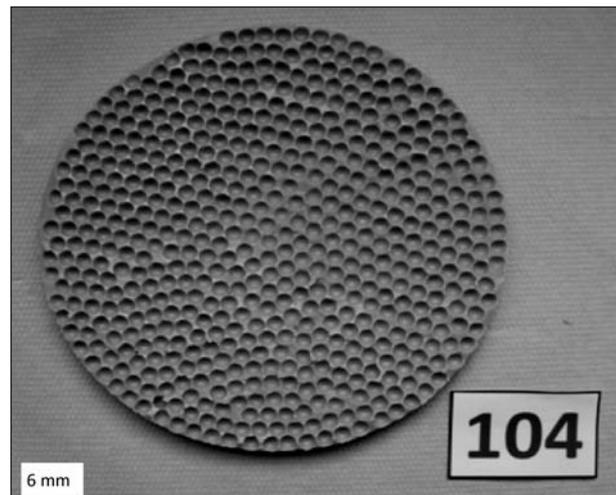


Bild 38: Beispiel eines Silikonabdrucks des Probengrundkörpers mit eingepressten Glaskugeln (6 mm)

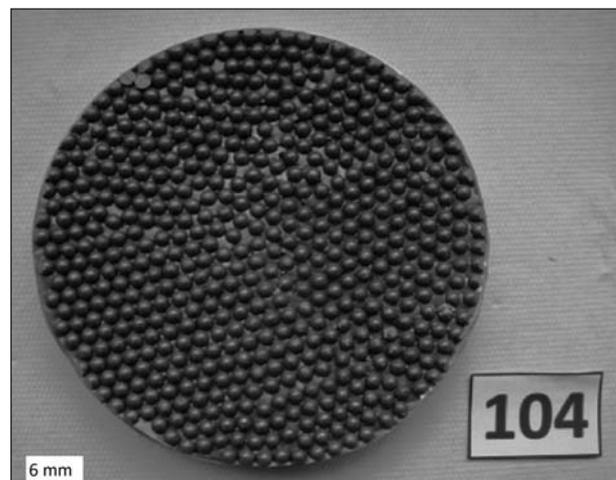


Bild 39: Kunstharzabdruck des Probengrundkörpers mit eingepressten Glaskugeln (6 mm)

(GAT) durchgeführt werden. Es wurden Fahrbahnproben mit folgenden Kugelgrößen hergestellt:

- 8 mm,
- 6 mm,
- 5 mm,
- 4 mm,
- 3 mm,
- 2 mm,
- 0 mm (glatte Oberfläche).

Im Anhang III sind die hergestellten Kunstharzabdrücke mit künstlicher Makrotextur aufgelistet.

5.3.4 Herstellung von Proben mit unterschiedlicher Mikrotextur

Die Abdrücke aus Kapitel 5.3.3 weisen alle unterschiedliche Makrotexturen bei nahezu keiner Mikrotextur auf. In diesem Kapitel soll nun die Erzeugung einer künstlichen und reproduzierbaren Mikrotextur erläutert werden.

Die Aufbringung bzw. Variation der Mikrotextur lief in den folgenden Schritten ab:

1. Auswahl einer Fahrbahnprobe mit gewünschter Makrotextur,
2. Aufbringung einer dünnen Klebeschicht (Sprühkleber) auf den Kunstharzabdruck,
3. Bestreuung mit Mikrokugeln (bzw. Eintauchen in Mikrokugeln),
4. Trocknung,
5. Reinigung,
6. Herstellung eines Silikonabdrucks,
7. Herstellung eines Kunstharzabdrucks.

Der beschriebene Ablauf wird im Folgenden genauer erläutert.

Als Ausgangspunkt wurde hier beispielhaft der Kunstharzabdruck „104“ mit der Kugelgröße 6 mm verwendet. Dieser ist in Bild 40 abgebildet.

Auf den Kunstharzabdruck wurde eine dünne Klebeschicht mit einem Sprühkleber aufgebracht. Nach kurzem Antrocknen des Klebers wurde die Kunstharzprobe um 180° gedreht und in Mikrokugeln eingetaucht (Bild 41). Nach wenigen Sekun-



Bild 40: Kunstharzabdruck des Probengrundkörpers mit eingepressten Glaskugeln (6 mm)

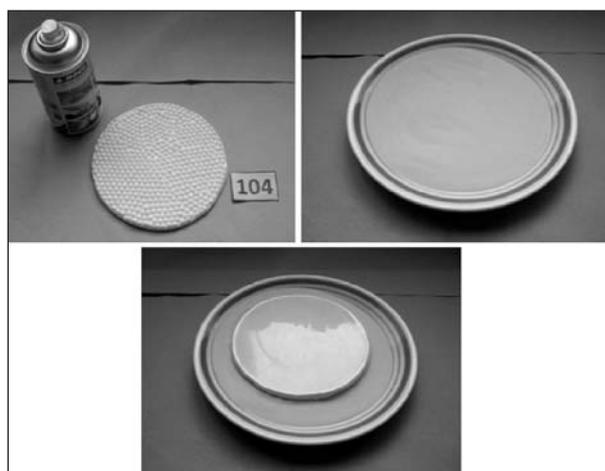


Bild 41: Aufbringung der Mikrotextur

den hafteten die Mikrokugeln an der Probenoberfläche und die Kunstharzprobe konnte zum Trocknen beiseitegelegt werden. Nach dem vollständigen Aushärten des Klebers wurde die Kunstharzprobe mit Druckluft abgeblasen, um die überschüssigen Mikrokugeln von der Probenoberfläche zu entfernen. Im Anschluss daran wurden, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, eine Silikonform und anschließend damit ein Kunstharzabdruck angefertigt.

Folgende Mikrokugeln standen für die Beschichtung von Kunstharzproben zur Verfügung:

- 0,8-1 mm,
- 0,42-0,84 mm,
- 0,18-0,3 mm,
- 0,075-0,15 mm,
- 0,04-0,08 mm.

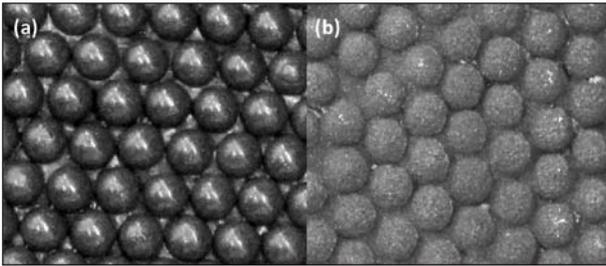


Bild 42: Kunstharzprobe ohne Mikrotextrur (a) und mit Mikrotextrur (b)

Im Anhang III sind die hergestellten Kunstharzabdrücke mit künstlicher Mikro- und Makrotextrur aufgelistet.

In Bild 42 sind eine Kunstharzprobe ohne Mikrotextrur (a) und eine mit Mikrotextrur (b) abgebildet.

5.3.5 Fazit

Mit dem hier vorgestellten Verfahren ist es möglich, die Makro- sowie die Mikrotextrur von Proben gezielt zu erzeugen und reproduzierbar herzustellen. Die hergestellten künstlichen Fahrbahnproben bestehen aus demselben Material wie die Fahrbahnabdrücke der realen Fahrbahntextruren. Damit ist eine direkte Vergleichbarkeit, was den Materialeinfluss angeht, möglich.

5.4 Charakterisierung der Fahrbahnprobenoberflächen

Vor der Durchführung der Griffigkeitsversuche am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) wurden die realen Fahrbahnbohrkerne, die Kunstharzabdrücke der realen Fahrbahnbohrkerne und die Kunstharzabdrücke der künstlichen Oberflächen (Kugeloberflächen) mit den nachfolgend aufgeführten Verfahren charakterisiert. Die Verfahren werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben:

- Sandfleckverfahren [DIN EN 13036-1],
- Texturmessung mit dem Gerät „ELAtextrur®“,
- Ausflussmessung [DIN EN 13036-3],
- SRT-Messung [TP Griff-StB (SRT)],
- SRT_{GAT} -Messung,
- 3D-Texturvermessung.

Die gemessenen Daten werden in Form von Diagrammen dargestellt. Die tabellarische Darstellung befindet sich jeweils im Anhang IV.



Bild 43: Versuchsaufbau für das Sandfleckverfahren

5.4.1 Sandfleckverfahren

[DIN EN 13036-1]

Das Sandfleckverfahren ist ein Verfahren zur Bestimmung der mittleren Texturtiefe der Fahrbahnoberfläche MTD (Mean Texture Depth). Durch sorgfältiges Aufbringen und Verteilung einer bekannten Sandmenge (Normsand) auf die Oberfläche und die anschließende Größenmessung der gesamten bedeckten Fläche kann die mittlere Texturtiefe bestimmt werden. Die Technik ist so ausgelegt, dass sie einen Mittelwert ausschließlich für die Tiefe der Makrotextrur der Fahrbahn liefert und die Beschaffenheit der Mikrotextrur der Fahrbahn nicht berücksichtigt.

Dieses Verfahren sollte nur bei Oberflächen angewandt werden, welche MPD-Werte (Mean Profile Depth) von 0,25 bis 5 mm aufweisen. Die Interpretation von Ergebnissen außerhalb des genannten Bereiches muss vorsichtig geschehen.

In Bild 43 ist der Versuchsaufbau des hier durchgeführten Sandfleckverfahrens abgebildet.

Vorgehen

Bei der Versuchsdurchführung wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Festlegung und Portionierung der Sandmenge ($7 \text{ g}/4.204 \text{ mm}^3$); Die Sandmenge wurde so ausgewählt, dass das Sandfleckverfahren auch an Bohrkernen mit kleiner Makrotextrur durchgeführt werden kann,
2. lokale, zentrische Aufbringung der Sandmenge auf den Bohrkern,
3. Verteilung der Sandmenge durch rotatorische Bewegung des Stempels von innen nach außen, bis sich der Sandfleck nicht weiter vergrößert,

4. Vermessung des Sandfleckdurchmessers an vier Stellen (45°-Verschiebung),
5. Mittelung des Durchmessers,
6. Berechnung der mittleren Oberflächentexturtiefe aus Sandvolumen und Sandfleckgröße.

Um verlässliche Ergebnisse zu erhalten, wurde das Sandfleckverfahren auf jeder zu untersuchenden Oberfläche zweimal durchgeführt.

Ergebnisse

In Bild 44 sind die MTD-Werte der Fahrbahnproben mit realen Texturen und der Kunstharzabdrücke aufgetragen. Hierbei wurden die Datenreihen nach den MTD-Werten der Originalfahrbahnproben sortiert.

Aus den Ergebnissen der Sandfleckuntersuchung ist zu erkennen, dass die MTD-Werte der Kunstharzabdrücke tendenziell über denen der Originalfahrbahnen liegen. Dies könnte darauf hindeuten, dass sich die Silikonform beim Ablösen von der Originalfahrbahn leicht plastisch verformt hat. Die gemessenen MTD-Werte reichen von ca. 0,3 mm bis

ca. 1,3 mm und decken damit das in der Praxis vorkommende Spektrum ab.

In Bild 45 sind die MTD-Werte der künstlichen Fahrbahntexturen aufgetragen.

Für die Bohrkern 106, 116, 126, 136 und 146 (völlig glatte Oberfläche bzw. nur vorhandene Mikrorauheit) liegen keine Messergebnisse vor, da aufgrund der nahezu nicht vorhandenen Makrotextur die Sandfleckmethode auf der begrenzten Bohrkernoberfläche nicht durchführbar ist bzw. das notwendige Sandvolumen zu gering wäre. Diese Texturen liegen zudem außerhalb des in der Norm ([DIN EN 13036-1]) vorgesehenen Einsatzbereiches.

Der Vergleich von Bild 44 und Bild 45 zeigt, dass die realen Fahrbahntexturen MTD-Werte von ca. 0,3 mm bis ca. 1,4 mm und die künstlichen Fahrbahntexturen von ca. 0,5 mm* bis ca. 1,5 mm aufweisen (* die untere Grenze kann weiter nach unten korrigiert werden, da die Bohrkern 106, 116, 126, 136 und 146 aufgrund der nicht vorhandenen Makrotextur nicht mit dem Sandfleckverfahren untersucht werden konnten). Daraus lässt sich schließen, dass die künstlichen Makrotexturen den in der Realität vorkommenden Bereich abdecken.

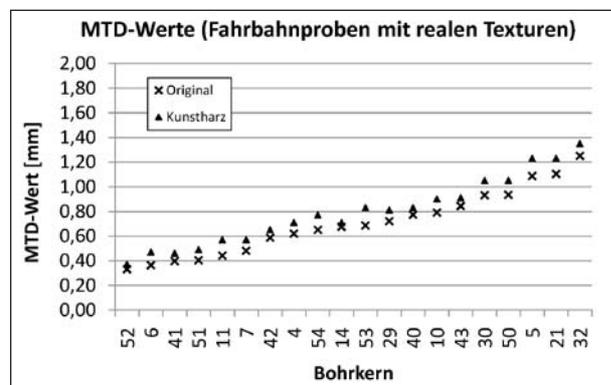


Bild 44: Mittlere Texturtiefen der Fahrbahnproben mit realen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

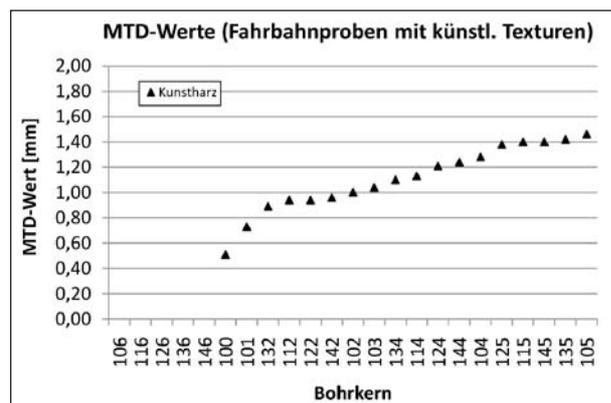


Bild 45: Mittlere Texturtiefen der künstlichen Fahrbahntexturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

5.4.2 Texturmessgerät „ELAtextur®“

[IWS Messtechnik]

Das Texturmessgerät „ELAtextur®“ wurde durch die Fa. IWS-Messtechnik, Celle, für die Projektbearbeitung zur Verfügung gestellt (Bild 46).

Mit diesem Gerät ist es möglich, die Makrotextur der Straßenoberfläche mittels MPD-Werts „Mean Profile Depth“ (DIN EN ISO 13473-1) und ETD-Wert „Estimated Texture Depth“ (DIN EN ISO



Bild 46: Texturmessgerät ELAtextur® [IWS Messtechnik]

13473-1) zu charakterisieren. Bei der Versuchsdurchführung tastet ein hochauflösender Distanzlaser die Fahrbahntextur ringförmig ab. Der MPD-Wert und der ETD-Wert werden nach der Messung automatisch im integrierten Mini-PC berechnet und ausgegeben.

Vorgehen

Bei der Versuchsdurchführung wurde folgendermaßen vorgegangen:

1. Festlegung der Messstelle,
2. Platzierung des Messgeräts,
3. Durchführung der Messung,
4. Ablesung der Messergebnisse.

Um verlässliche Werte zu erhalten, wurde jede Fahrbahnprobe (reale Bohrkern, Kunstharzabdrücke der realen Bohrkern, Kunstharzabdrücke der künstlichen Fahrbahntexturen) auf 5 unterschiedlichen Messlinien vermessen und daraus jeweils der Mittelwert gebildet. Hierfür war es ausreichend, das Messgerät nur um wenige Millimeter zu verschieben, da bei diesem Messverfahren keine Fläche, sondern nur eine Linie in Form einer Kreisbahn vermessen und ausgewertet wird. In Bild 47 sind die 5 vermessenen Stellen beispielhaft dargestellt.

Ergebnisse

Bei der Beurteilung der Ergebnisse wurde hier nur der MPD-Wert betrachtet, da der ETD-Wert aus dem MPD-Wert berechnet wird.

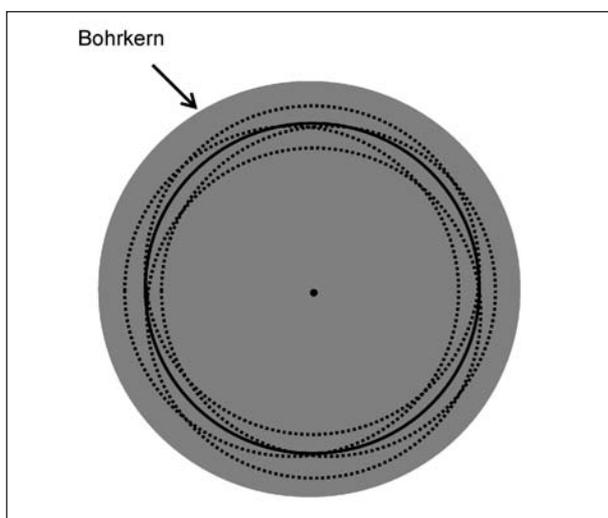


Bild 47: Beispiel für die Anordnung der 5 Messlinien bei der Messung mit dem Texturmessgerät ELAtextur®

In Bild 48 sind die MPD-Werte der realen Fahrbahntexturen und der Kunstharzabdrücke aufgetragen. Hierbei wurden die Datenreihen nach den MPD-Werten der Originalfahrbahnproben sortiert.

In Bild 49 sind die MPD-Werte der künstlichen Fahrbahntexturen aufgetragen.

In Bild 48 ist zu erkennen, dass die Kunstharzabdrücke (ausgeschlossen Bohrkern 5 und 10) sehr gut mit den Originalbohrkernen übereinstimmen. Daraus lässt sich schließen, dass das Abdruckverfahren im Makrotexturbereich sehr gute Ergebnisse liefert. Die MPD-Werte bei den realen Fahrbahntexturen reichen von ca. 0,3 mm bis ca. 1,6 mm. Die MPD-Werte der Kunstharzabdrücke mit künstlicher Textur reichen von ca. 0,1 mm bis ca. 1,7 mm. Hieraus ist ersichtlich, dass die gewählten Kugelgrößen und somit die sich ergebenden MPD-Werte den Bereich der realen Fahrbahntexturen vollständig abdecken und damit verglichen werden können.

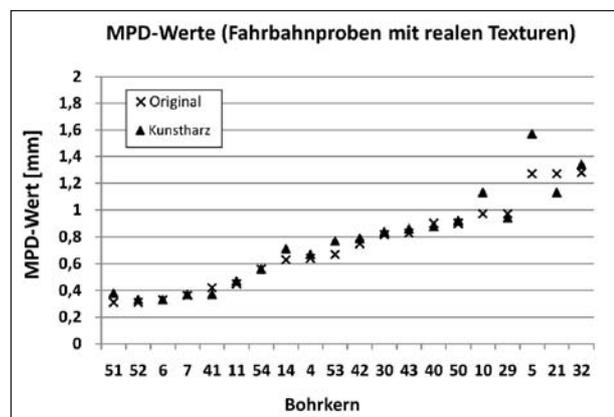


Bild 48: MPD-Werte der Fahrbahnproben mit realen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

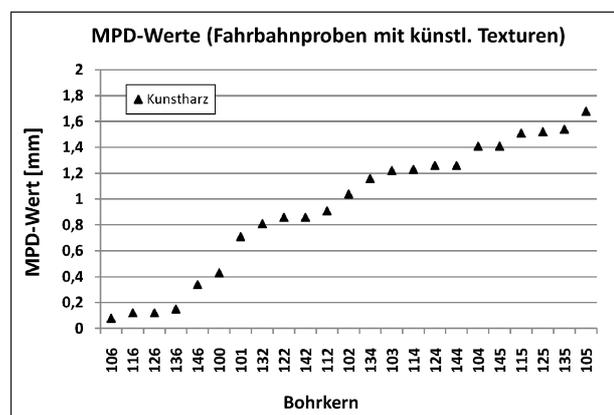


Bild 49: MPD-Werte der Fahrbahnproben mit künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

5.4.3 Ausflussmesser nach Moore

[DIN EN 13036-3]

Der Ausflussmesser nach Moore ist ein Verfahren zur Bestimmung der horizontalen Entwässerung von Fahrbahnoberflächen. Das Verfahren simuliert das Abfließen von Wasser im Kontaktbereich unterhalb eines sich bewegenden Fahrzeugreifens. Das Ausflussmessgerät wird auf die Prüfoberfläche gestellt und mit Wasser gefüllt. Die Zeit, die zum Abfallen des Wasserspiegels von einer oberen Markierung bis zu einer unteren Markierung erforderlich ist, wird aufgezeichnet.

Die Messung der horizontalen Entwässerung stellt ebenso wie die Sandfleckuntersuchung ein Maß für die Makrorauheit dar. Dieses Verfahren kann bei Oberflächen angewandt werden, welche einen MPD-Wert von 0,0 mm bis 0,4 mm aufweisen. Somit kann dieses Verfahren laut [DIN EN 13036-1] für den Großteil der Proben nicht normgerecht für die Charakterisierung der Fahrbahn verwendet werden, da die vorliegenden MPD-Werte (Bild 48 und Bild 49) nicht in dem vorgeschriebenen Bereich liegen. Innerhalb dieses Forschungsprojekts wurde dieses Verfahren jedoch angewandt und mit den anderen Messverfahren verglichen. Es muss jedoch beachtet werden, dass die damit gewonnenen Ergebnisse großen Streuungen unterliegen.

In Bild 50 ist der Versuchsaufbau zu den hier durchgeführten Messungen mit dem Ausflussmesser nach Moore abgebildet.

Vorgehen

Bei der Versuchsdurchführung wurde wie folgt vorgegangen:



Bild 50: Versuchsaufbau für Messungen mit dem Ausflussmesser nach Moore

1. Überprüfung der Dichtheit des Ausflussmessgerätes auf einer Glasoberfläche. Hierzu wird das Messgerät auf einer Glasplatte platziert. Nach Einfüllen des Wassers darf der Wasserspiegel fünf Minuten nicht absinken,
2. Positionierung des Ausflussmessers auf der zu vermessenden Fahrbahnprobe,
3. Einfüllen von Trinkwasser in den Messzylinder,
4. Feststellung der Ausflusszeit von der oberen bis zur unteren Markierung,
5. Durchführung von 2 Messungen an jeweils 5 Messstellen, die gleichmäßig über die Probe verteilt sind.

Bei der Durchführung ist es sehr wichtig, darauf zu achten, dass das Messgerät nicht auf einer lokalen Erhöhung steht, da dadurch die Messergebnisse sehr stark verfälscht werden. Außerdem können Auswaschungen bzw. Kornausbrüche in der Fahrbahnoberfläche die Messergebnisse sehr stark beeinflussen.

Um verlässliche Werte zu erhalten, wurde jede Fahrbahnprobe (reale Bohrkern und Kunstharzabdrücke der realen Bohrkern sowie der künstlichen Fahrbahntexturen) an 5 unterschiedlichen Messstellen vermessen und daraus der Mittelwert gebildet. In Bild 51 ist ein Beispiel für die Anordnung der Messstellen abgebildet.

Ergebnisse

In Bild 52 sind die OT_P -Werte (Ausflusszeiten) der Fahrbahnproben mit realen Texturen, der Original-

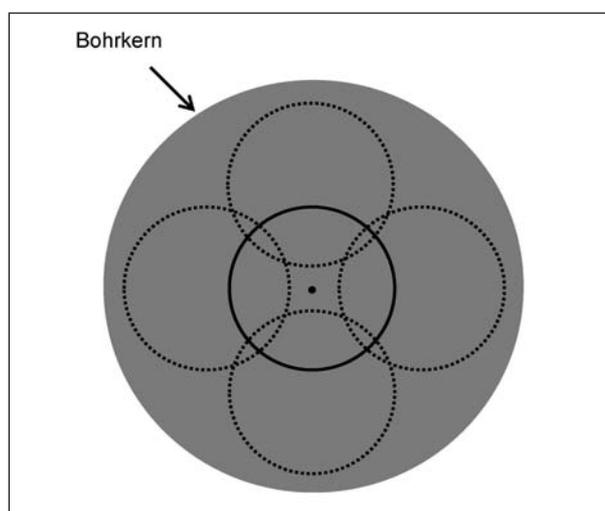


Bild 51: Beispiel für die Anordnung der Messstellen bei der Messung mit dem Ausflussmesser nach Moore

bohrkerne und der Kunstharzabdrücke aufgetragen. Hierbei wurden die Datenreihen nach den Ausflusszeiten der Originalbohrkerne sortiert. Es ist zu erkennen, dass alle Kurven ähnlich verlaufen. Bei den Proben 11, 52 und 41 weichen die Messwerte zwischen Originalbohrkern und den Abdrücken voneinander ab.

In Bild 53 sind die Ausflusszeiten der Fahrbahnproben mit künstlichen Texturen aufgetragen.

Beim Vergleich von Bild 52 und Bild 53 sind ähnliche Tendenzen zu erkennen. Mit steigender Ausprägung der Makrotextur fällt wie zu erwarten die Ausflusszeit (OT_p -Werte). Die Ausprägung der Makrotextur kann durch den MPD-Wert beurteilt werden (Bild 54 und Bild 55). Beim Vergleich von Bild 52 und Bild 53 ist weiterhin zu erkennen, dass die Ausflusszeiten jeweils bei ca. 1 s beginnen und über dem Kurvenverlauf ungefähr die gleiche Steigung aufweisen. In Bild 53 nimmt die Steigung ab dem Bohrkern 146 sehr stark zu. Dies liegt daran,

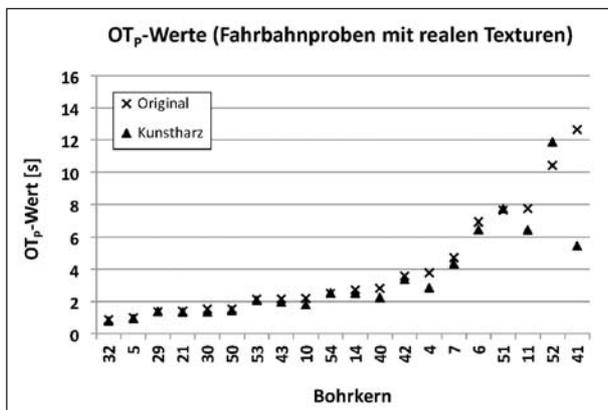


Bild 52: OT_p -Werte der Fahrbahnproben mit realen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

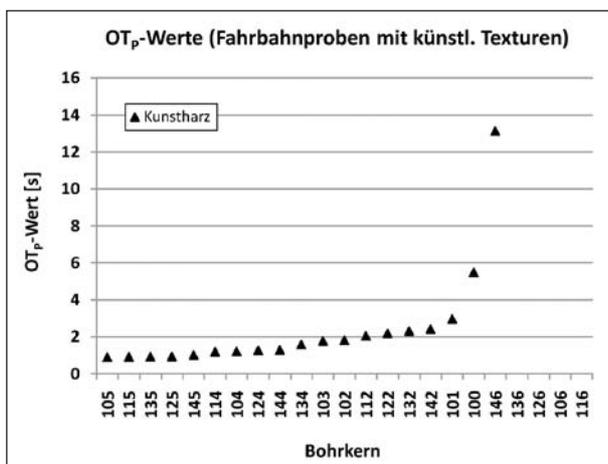


Bild 53: OT_p -Werte der Fahrbahnproben mit künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

dass die Ausflusszeiten der Fahrbahnproben 136, 126, 106 und 116 (völlig glatte Oberfläche bzw. nur vorhandene Mikrorauheit) aufgrund der nahezu nicht vorhandenen Makrotextur sehr hoch sind. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die künstlichen und die realen Texturen zu einem großen Teil sehr ähnliche Drainagewirkungen zeigen.

5.4.4 Vergleich der Makrotexturwerte

Um die Ergebnisse des Sandfleckverfahrens mit der ELAtextur[®]-Messung und der Ausflussmessung nach Moore vergleichen zu können, werden die Ergebnisse in diesem Unterkapitel in Diagrammen zusammengefasst.

Die Zusammenfassung der Makrotexturwerte beschränkt sich auf die Kunstharzabdrücke der realen Texturen sowie die Kunstharzabdrücke der künstlichen Texturen. Diese Einschränkung wird getroffen, da innerhalb dieses Forschungsprojektes ausschließlich Griffigkeitsversuche mit Kunstharzabdrücken durchgeführt werden. Es sei jedoch erwähnt, dass zwischen den Originalfahrbahnen und den Kunstharzabdrücken keine großen Unterschiede der Makrotexturen zu erkennen sind.

In Bild 54 sind die zusammengefassten Makrotexturgrößen für die Kunstharzabdrücke der Fahrbahnproben mit realen Texturen abgebildet.

In Bild 55 sind die zusammengefassten Makrotexturgrößen für die Kunstharzabdrücke der künstlichen Fahrbahntexturen abgebildet.

Wie zu erwarten, ist in Bild 54 und Bild 55 zu erkennen, dass der MPD-Wert und der MTD-Werte tendenziell die gleichen Verläufe zeigen, der OT_p -Wert jedoch gegensätzlich verläuft.

Je größer die Texturtiefe ist, desto kürzer ist die Ausflusszeit und umgekehrt. Der nicht ganz stetige

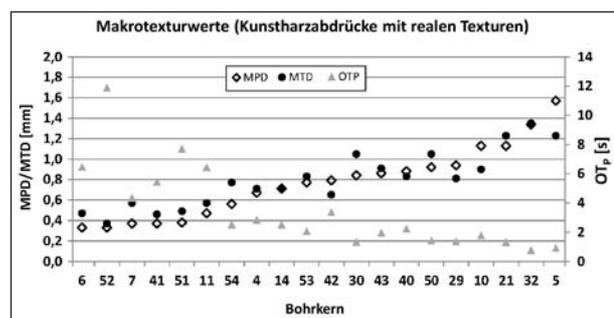


Bild 54: Zusammenfassung der Makrotexturwerte der Kunstharzabdrücke mit realen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

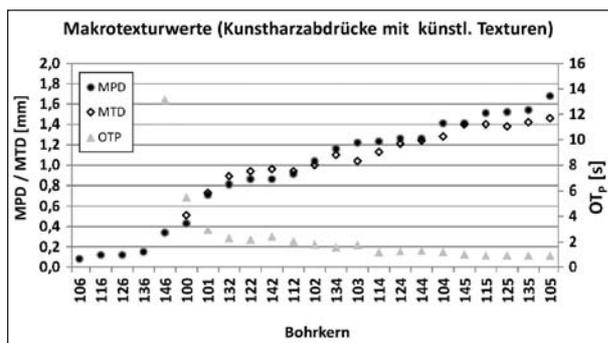


Bild 55: Zusammenfassung der Makrotexturwerte der Kunstharzabdrücke mit künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

Verlauf der Ausflusszeit kann durch die großen Streuungen in den Versuchsergebnissen erklärt werden. Wie zuvor erwähnt, konnte der Großteil der Proben nicht normgerecht mit dem Ausflussmesser charakterisiert werden, da die Makrotextur zu sehr ausgeprägt ist ($MPD > 0,4$ mm). Beim Verschieben des Ausflussmessgerätes um wenige Millimeter können so teilweise große Veränderungen der Messergebnisse festgestellt werden.

Die Reproduzierbarkeit des Sandfleckverfahrens und des Elektronischen Ausflussmessers (ELAtex[®]) sind im Vergleich zur Ausflussmessung deutlich robuster, da diese beiden Messmethoden lokale Überhöhungen weniger stark bewerten.

5.4.5 SRT-Messung

[DIN EN 13036-4], [TP Griff-StB (SRT)]

Der Pendeltest ist ein Verfahren, um die Griffigkeit eines kleinen Oberflächenbereiches (etwa $0,01$ m²) zu bestimmen. Das Pendelgerät umfasst einen federbelasteten Gleitkörper, der aus einem genormten Gummi hergestellt und am Ende eines Pendels angebracht ist. Nach Auslösen des Pendels aus einer waagerechten Lage schwingt der Gleitkörper über die Prüffläche. Die anschließende Steighöhe des Pendels verringert sich infolge des Energieverlustes beim Überstreichen der Oberfläche innerhalb einer definierten Reiblänge. Der Verlust, welcher ein Maß für die Griffigkeit ist, wird mittels einer kalibrierten Skala abgelesen.

Der SRT-Wert (SRT, Skid Resistance Tester) ist im Gegensatz zur Sandfleckmethode und Ausflussmethode hauptsächlich ein Maß für die Mikrorauheit.

In Bild 56 ist der Versuchsaufbau zu den hier durchgeführten Pendelversuchen auf Fahrbahnbohrkernen abgebildet.



Bild 56: Versuchsaufbau des SRT-Pendelversuches

Vorgehen

Bei der Versuchsdurchführung wurde folgendermaßen vorgegangen:

1. horizontale Ausrichtung des Basisgestells des Pendels,
2. Überprüfung des so genannten SRT_0 -Wertes (Durchschwingung und Ablesung ohne Gummiprobekörperkontakt),
3. Einspannung und horizontale Ausrichtung der Fahrbahnprobe,
4. Annäherung der Fahrbahnprobe,
5. Einstellen der Reiblänge ((126 ± 1) mm),
6. Durchführung von drei Pendeldurchläufen ohne Ablesung (mit jeweils vorheriger Annäherung der Probe),
7. Durchführung von fünf Messungen mit Ablesung (SRT-Wert/Temperatur) (mit jeweils vorheriger Annäherung der Probe),
8. Mittelwertbildung aus den 5 Messwerten für eine Pendelrichtung,
9. Temperaturkorrektur des Mittelwertes,
10. Drehung der Fahrbahnprobe und Wiederholung der Punkte 2 bis 8, bis Probe um 360° gedreht wurde. Als Drehwinkel wurden 30° gewählt (vereinzelt wurde der Drehwinkel zu 15° gewählt, um die Richtungsabhängigkeit genauer auflösen zu können),



Bild 57: Kantenberührung des SRT-Gummis beim Aufsetzen auf die Fahrbahnprobe

- Mittelwertbildung für den Bohrkern aus den Mittelwerten über die 0°, 90°, 180°- und 270°-Probenorientierung.

Durch das Drehen der Bohrkerns und erneutes Pendeln kann eine eventuelle Richtungsabhängigkeit der Mikrorauheit (Griffigkeit) festgestellt werden.

Bei der Vermessung der Bohrkerns muss darauf geachtet werden, dass der Gummikörper beim Aufsetzen auf die Fahrbahnoberfläche mit der gesamten Kantenlänge aufsetzt, da der SRT-Wert ansonsten verfälscht ist. Außerdem darf der Gummikörper beim Aufsetzen die Kante des Bohrkernes nicht berühren, da sonst die Messwerte unbrauchbar werden (Bild 57).

Ergebnisse

In Bild 58 sind beispielhaft die SRT-Messdaten des Bohrkerns 4 und des Bohrkerns 5 abgebildet. Jeder Punkt steht hierbei für den Mittelwert einer Pendelrichtung. Im Anhang V sind die SRT-Messdaten für alle Bohrkerns angefügt.

Es ist zu erkennen, dass der Bohrkern 4 nahezu keine Richtungsabhängigkeit des SRT-Wertes aufweist. Der Bohrkern 5 hingegen zeigt eine deutliche Richtungsabhängigkeit.

In Bild 59 sind die SRT-Werte der Originalbohrkerne und der Kunstharzabdrücke mit realen Texturen aufgetragen. Hierbei wurden die Datenreihen nach den SRT-Werten der Originalbohrkerne sortiert.

Die Abweichung zwischen Originalprobe und Kunstharzprobe kann vermutlich auf Benetzungsprobleme des Kunstharzbelages zurückgeführt werden. Dieser Effekt ist bei Griffigkeitsversuchen am GAT nicht zu erwarten, da die Fahrbahnprobe hier ausreichend bewässert wird.

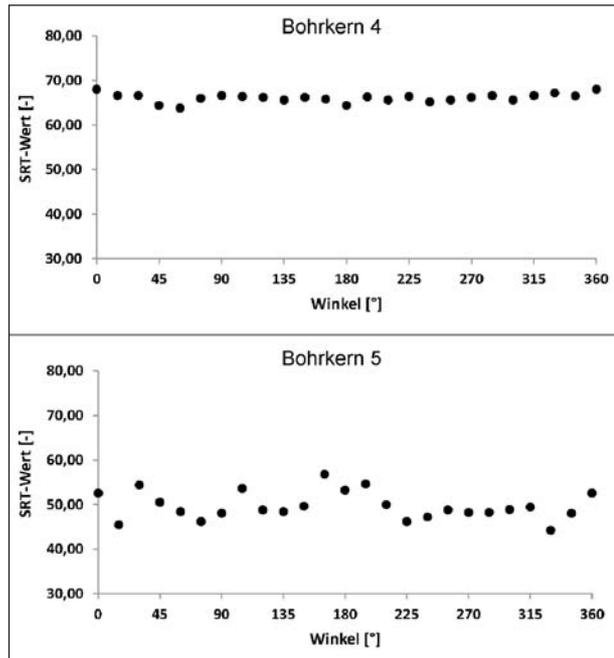


Bild 58: SRT-Messdaten von Bohrkern 4 und Bohrkern 5

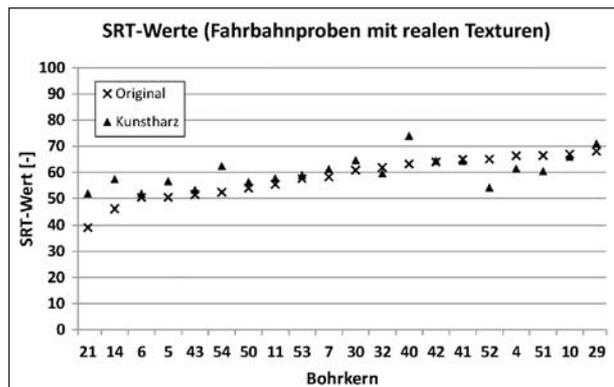


Bild 59: SRT-Werte der Fahrbahnproben mit realen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

In Bild 60 sind die SRT-Werte der künstlichen Fahrbahn Texturen aufgetragen.

Bei den Proben 100 bis 106 (in Bild 60 zusammengefasst als Makrokugeln) handelt es sich um Proben, welche ausschließlich Makrotexturen aufweisen. Damit erklärt sich der niedrige SRT-Griffigkeitswert. Der Bereich „Makrokugeln & Mikrokugeln“ kennzeichnet die Fahrbahnproben, welche Mikro- und Makrotexturen aufweisen. Damit erklärt sich das höhere SRT-Griffigkeitsniveau. Die genaue Oberflächenzusammensetzung (Mikro- und Makrokugelgröße) kann dem Anhang III entnommen werden.

Aus den Ergebnissen der SRT-Versuche ist zu erkennen, dass eine große Vielfalt an unterschiedlichen Mikrorauheiten für Versuchszwecke zur Verfügung steht. Der Vergleich von Bild 59 und Bild 60

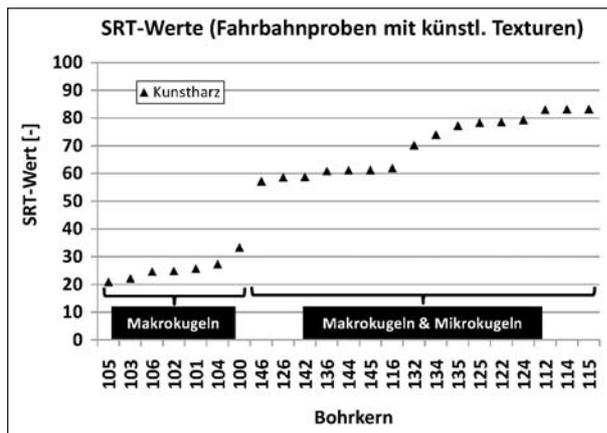


Bild 60: SRT-Werte der Fahrbahnproben mit künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

zeigt, dass die realen Bohrkern SRT-Werte von ca. 40 bis ca. 70 SRT-Einheiten und die künstlich erzeugten Texturen SRT-Werte von ca. 20 bis ca. 80 SRT-Einheiten aufzeigen. Somit decken die Mikrorauheiten (SRT-Werte) der künstlichen Texturen den Bereich der realen Texturen ab.

5.4.6 SRT_{GAT}-Messung

Zur Erfassung der Mikrostrukturveränderung im Laufe der später folgenden Griffigkeitsversuchsreihen (Hauptuntersuchungen) am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) sollen SRT-Messungen vor und zwischen den durchzuführenden Messungen (unterschiedliche Gleitgeschwindigkeiten und unterschiedliche Temperaturbedingungen) auf ein und derselben Fahrbahnprobe durchgeführt werden. Hierfür ist die in Kapitel 5.4.5 vorgestellte SRT-Messung jedoch nur bedingt geeignet, da die Messfläche des SRT-Pendels von der Berührfläche des SKM_{GAT}-Gummigleitkörpers bei Griffigkeitsversuchen am GAT abweicht (siehe Bild 61).

Zwar kann unter der Annahme einer gleichmäßigen Mikrorauheit über der kompletten Fahrbahnprobe die SRT-Wertbestimmung vor Versuchsbeginn mit dem normalen SRT-Pendel bestimmt werden, werden anschließend jedoch Griffigkeitsversuche mit einem SKM_{GAT}-Gleitkörper durchgeführt, ändert sich die Mikrostruktur nur in der in Bild 61b abgebildeten Kontaktfläche. Um nun gezielt die Änderung der Mikrorauheit in dieser Kontaktfläche feststellen zu können, ist es notwendig, ein neues Verfahren, welches dem SRT-Pendel möglichst ähnlich ist, zu entwickeln. Hierzu wird der reale SRT-Gummigleitkörper insoweit bearbeitet, dass er die Breite wie der später verwendete SKM_{GAT}-Gummigleitkörper (10 mm) aufweist.

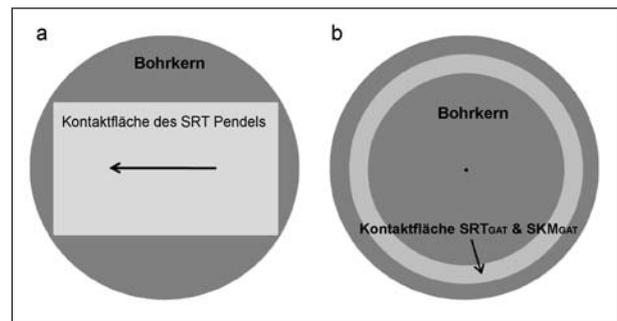


Bild 61: Messfläche des „normalen“ SRT-Pendels (a) und Berührfläche des SKM_{GAT}- bzw. SRT_{GAT}-Gleitkörpers (b) am GAT

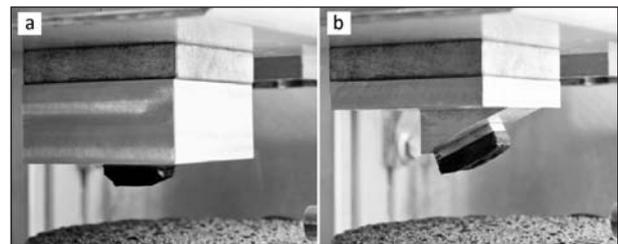


Bild 62: SKM_{GAT}-Gummigleitkörper (a), bearbeiteter SRT_{GAT}-Gummigleitkörper (b)

In Bild 62a ist der SKM_{GAT}-Gummigleitkörper und in Bild 62b ist der bearbeitete SRT_{GAT}-Gummigleitkörper abgebildet. Dieser kann am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) montiert werden.

Beide Gummigleitkörper sind 10 mm breit und bewerten somit dieselbe Oberfläche. Der SRT_{GAT}-Gummigleitkörper ist wie der SRT-Gummigleitkörper mit einem Anstellwinkel von 25° (Sollwert [TP Griff-StB (SRT)] 26° ± 3°) montiert.

Die Anpresskraft des SRT-Pendels wurde mittels Waage überprüft (Sollwert [TP Griff-StB (SRT)] 22,2 N ± 0,5 N). Bei der Breite des SRT-Gleitkörpers von ca. 76 mm ergibt sich eine notwendige Anpresskraft des modifizierten SRT-Gleitkörpers (Bild 62b) von 2,9 N. Diese ermittelte geringe Anpresskraft kann jedoch aufgrund konstruktiver Gegebenheiten (Eigengewicht der beweglichen Teile, Reibung etc.) des Griffigkeits- und Abriebprüfstandes (GAT) nicht eingestellt werden. Für die durchzuführenden SRT_{GAT}-Versuche wird eine Mindestanpresskraft von 10 N gewählt (kleinste reproduzierbar einstellbare Anpresskraft).

Die Gleitgeschwindigkeit wird wie beim SRT-Pendel zu 10 km/h eingestellt. Die Fahrbahnprobe wird während der Versuchsdurchführung mit Wasser benetzt (Ausflussmenge 5 l/min).

Vorgehen

Um den SRT_{GAT} -Wert festzustellen, wird wie folgt vorgegangen:

1. SRT_{GAT} -Prüfkörper montieren,
2. Gleitgeschwindigkeit 10 km/h einstellen,
3. Bewässerung einschalten (5 l/min),
4. Messwertaufzeichnung starten,
5. SRT_{GAT} -Prüfkörper mit 10 N Anpresskraft absetzen,
6. Prüfkörper nach 1 s Versuchsdauer abheben (ca. 7 Umdrehungen, Durchmesser der Kreisbahn ca. 61 mm),
7. Messung beendet.

Ergebnisse

In Bild 63 sind die SRT_{GAT} -Werte der Kunstharzabdrücke mit realen Texturen aufgetragen. Die SRT_{GAT} -Messungen wurden, wie die späteren SKM_{GAT} -Griffigkeitsmessungen, ausschließlich auf den Kunstharzabdrücken durchgeführt, um den Textureinfluss vom Materialeinfluss isoliert untersuchen zu können.

Die SRT_{GAT} -Werte reichen von ca. 0,4 bis ca. 0,7 SRT_{GAT} -Einheiten. In Bild 64 sind die SRT_{GAT} -Werte der Kunstharzabdrücke mit künstlichen Texturen aufgetragen.

Hierin ist zu erkennen, dass der Verlauf ähnlich zum Kurvenverlauf aus Bild 60 ist. Bei den Proben 100 bis 106 handelt es sich um Proben, welche nahezu keine Mikrorauheit aufweisen. Damit erklärt sich der niedrige SRT_{GAT} -Griffigkeitswert.

Der Vergleich der SRT-Werte und SRT_{GAT} -Werte der realen Fahrbahtexturen und der künstlichen Fahrbahtexturen folgt im Kapitel 5.4.7.

Ein Vergleich von Bild 59 und Bild 60 veranschaulicht die größere Spreizung der SRT-Werte der Kunstharzabdrücke mit künstlichen Fahrbahtexturen ($SRT = \text{ca. } 20 \dots 80$) im Vergleich zu den Kunstharzabdrücken mit realen Fahrbahtexturen ($SRT = \text{ca. } 50 \dots 75$). Der gleiche Trend ist auch aus Bild 63 und Bild 64 zu erkennen. Auch hier zeigen die SRT_{GAT} -Werte der künstlichen Fahrbahtexturen ($SRT_{GAT} = \text{ca. } 0,15 \dots 0,95$) eine größere Bandbreite als die SRT_{GAT} -Werte der realen Fahrbahtexturen ($SRT_{GAT} = \text{ca. } 0,4 \dots 0,7$).

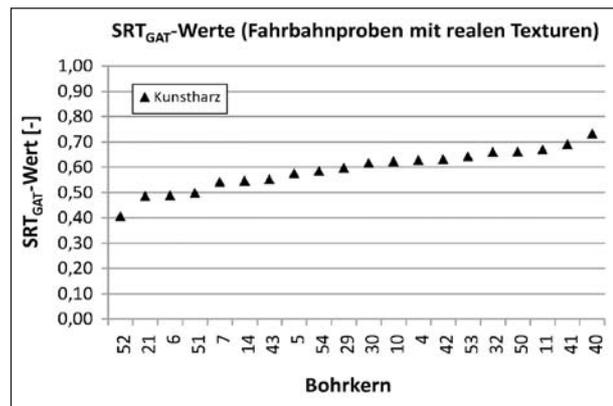


Bild 63: SRT_{GAT} -Werte der Kunstharzabdrücke mit realen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

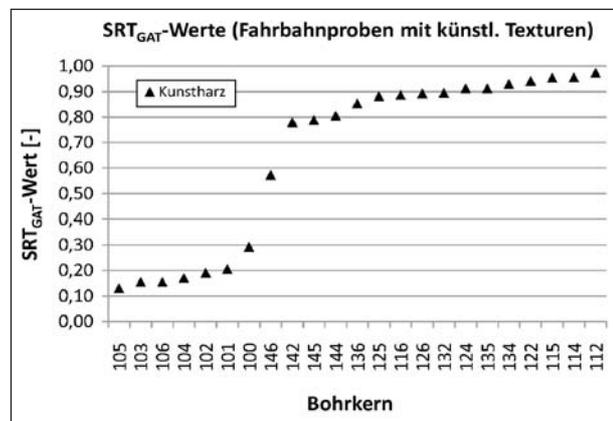


Bild 64: SRT_{GAT} -Werte der Kunstharzabdrücke mit künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

5.4.7 Vergleich der Mikrotextrurwerte

In Bild 65 sind SRT-Werte und die SRT_{GAT} -Werte der Kunstharzabdrücke mit realen Texturen abgebildet. Die Daten sind nach dem SRT_{GAT} -Wert aufsteigend sortiert.

Der Verlauf der SRT_{GAT} -Werte weicht teilweise stark vom Verlauf der SRT-Werte ab. Dies lässt sich vermutlich durch die Bestimmung bzw. das Messen des SRT_{GAT} -Wertes bzw. SRT-Wertes erklären. Der SRT_{GAT} -Wert bewertet ausschließlich die Griffigkeit der ringförmigen Fläche aus Bild 61b. Der SRT-Wert hingegen charakterisiert die rechteckige Fläche aus Bild 61a.

In Bild 66 sind die SRT-Werte und die SRT_{GAT} -Werte der Kunstharzabdrücke mit künstlichen Texturen abgebildet. Diese sind nach dem SRT_{GAT} -Wert aufsteigend sortiert. Bei der Betrachtung des Diagramms ist zu beachten, dass jeder Kurve eine eigene Skala zugewiesen ist und die Absolutwerte deshalb nicht direkt miteinander verglichen werden

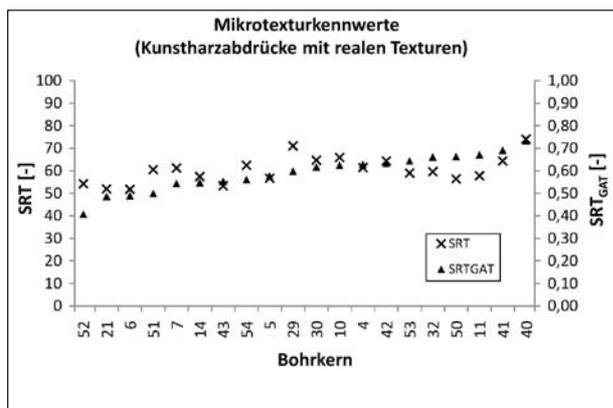


Bild 65: Gegenüberstellung von den SRT-Werten und den SRT_{GAT} -Werten der Kunsthazabdrücke mit realen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

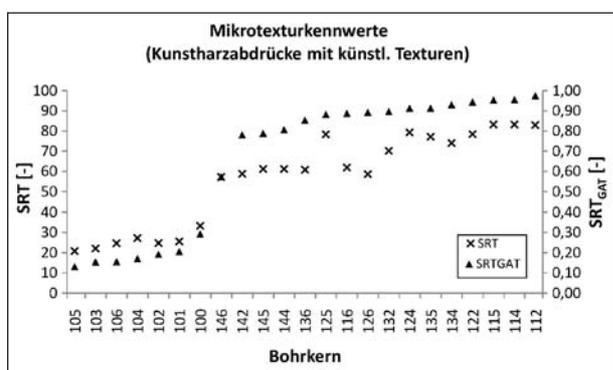


Bild 66: Gegenüberstellung von den SRT-Werten und den SRT_{GAT} -Werten der Kunsthazabdrücke mit künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

können. Die Unterschiede in den beiden Kurvenverläufen können vermutlich auf Wärmeeffekte zurückgeführt werden, welche innerhalb dieses Forschungsprojektes nicht näher untersucht werden konnten. Eine texturabhängige Wärmeentwicklung (je schärfer die Textur, desto mehr Reibungswärme) entsteht beim SRT_{GAT} -Versuch aufgrund der im Gegensatz zum „regulären“ SRT-Versuch vorhandenen längeren Versuchszeit (ca. 1 s). Beim „regulären“ SRT-Versuch hat der Gummiprüfkörper beim Durchschwingen nur Sekundenbruchteile Fahrbahnkontakt, sodass dabei eine texturspezifische Erwärmung nicht zu erwarten ist.

In Bild 67 sind die SRT_{GAT} -Werte über den SRT-Werten der Kunsthazabdrücke der realen und künstlichen Texturen abgebildet. Der Zusammenhang zwischen SRT_{GAT} -Wert und SRT-Wert wird hier für die realen und künstlichen Texturen separat veranschaulicht. An den Bestimmtheitsmaßen (R^2) ist zu erkennen, dass die SRT_{GAT} -Werte mit den SRT-Werten bei den realen Fahrbahntexturen nur in einem geringen Maße, bei den künstlichen Fahr-

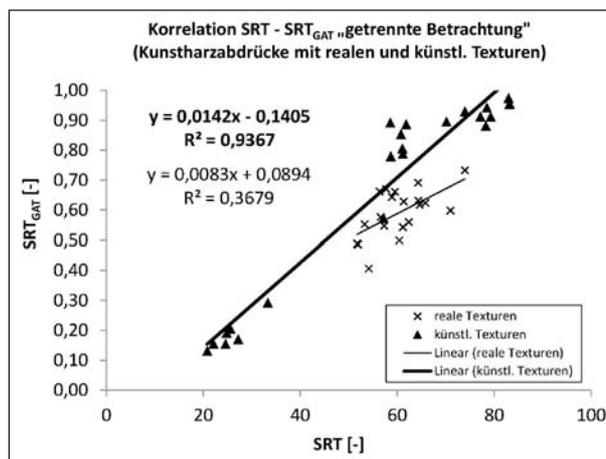


Bild 67: Getrennte Betrachtung der Korrelation zwischen den SRT-Werten und den SRT_{GAT} -Werten der Kunsthazabdrücke mit realen und künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

bahntexturen jedoch gut korrelieren. Das niedrige Bestimmtheitsmaß auf den realen Fahrbahntexturen könnte durch die unterschiedlichen Flächenbereiche erklärt werden, welche durch die SRT_{GAT} - bzw. SRT-Messung bewertet werden (Bild 61). Durch Inhomogenitäten in den Oberflächenstrukturen der realen Fahrbahntexturen werden deshalb durch die unterschiedlich bewerteten Oberflächenbereiche sich stark unterscheidende Oberflächenstrukturen charakterisiert, was zu den beobachteten Streuungen der berechneten Kennwerte führt.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die künstlichen Texturen, im Vergleich zu den realen Texturen, einen größeren Bereich vorkommender SRT_{GAT} - bzw. SRT-Werte abdecken. Die dadurch ermittelte Ausgleichsgerade wird deshalb durch Ausreißer weniger beeinflusst und ist robuster als bei den Messergebnissen mit realen Texturen. Die vorkommenden SRT_{GAT} - bzw. SRT-Werte weisen bei den realen Texturen eine vergleichsweise geringe Spreizung auf.

Die gute Korrelation auf künstlichen Oberflächen lässt sich vermutlich durch die sehr homogene Textur der künstlichen Fahrbahntexturen erklären. Hierdurch weisen diese Beläge keine Richtungsabhängigkeit auf, und es ist unerheblich, welcher Flächenbereich der Fahrbahnprobe durch die Messung charakterisiert wird.

In Bild 68 sind die SRT_{GAT} -Werte über den SRT-Werten der Kunsthazabdrücke der realen und künstlichen Texturen abgebildet. Bei der Bestimmung des mathematischen Zusammenhanges wird hierbei nicht zwischen realen und künstlichen Tex-

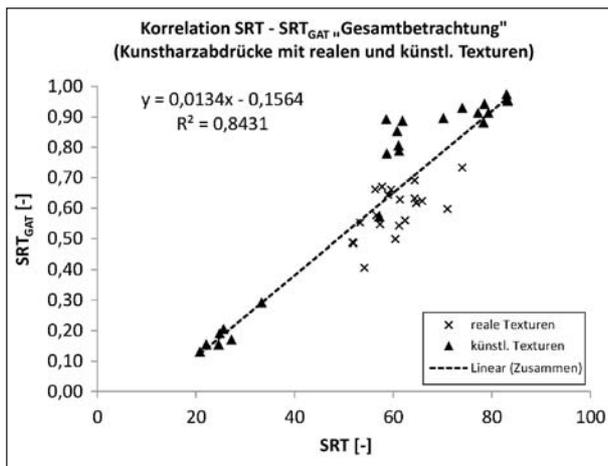


Bild 68: Gesamtbetrachtung der Korrelation zwischen den SRT-Werten und den SRT_{GAT}-Werten der Kunstharzabdrücke mit realen und künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang IV)

turen unterschieden. Aus dem Vergleich von den SRT_{GAT}- und SRT-Messwerten wird abgeleitet, dass der SRT-Wert und der SRT_{GAT}-Wert bei identischer Textur (künstliche Fahrbahntextur) gut korrelieren da beide die Textur ähnlich bewerten.

Die schlechtere Korrelation auf realen Fahrbahntexturen wird auf die Inhomogenität der Fahrbahntextur einer Fahrbahnprobe zurückgeführt. Da die Griffigkeitsversuche am GAT (Hauptversuche) jedoch ausschließlich auf der ringförmigen Fläche (Bild 61) der Fahrbahnprobe durchgeführt werden, eignet sich der SRT_{GAT}-Wert, der ebenfalls nur durch Messungen auf der ringförmigen Fläche ermittelt wird, besser als der SRT-Wert zur Charakterisierung der Mikrorauheit der Messfläche.

5.4.8 Optische Vermessung der Originalfahrbahntexturen (flächenhafte Vermessung)

Die hier untersuchten Fahrbahntexturen wurden bei der NanoFocus AG mittels μ scan-custom (3D-Profilometersystem) mit dem holografischem Sensor CP42 (chromatischer Kofokalsensor) vermessen. Dieser Sensor hat in z-Richtung eine Auflösung von 6,0 μ m. Auf eine genaue Beschreibung des Messverfahrens wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Bei der flächenhaften Vermessung wurde zur Abtastung ein Schrittabstand von 100 μ m in x-Richtung (tangential) und 20 μ m in y-Richtung (radial zur Probenmitte) verwendet. Jede Fahrbahnprobe (Originalfahrbahnbelag) wurde an 4 Stellen (jeweils 25 mm x 25 mm) vermessen. Diese sind beispielsweise in Bild 69a abgebildet. Der Bereich, auf dem

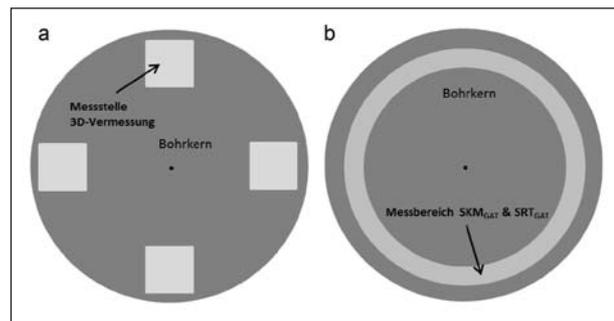


Bild 69: Messstellen der flächenhaften Vermessung (a), Messbereich bei späteren Griffigkeitsmessungen am GAT

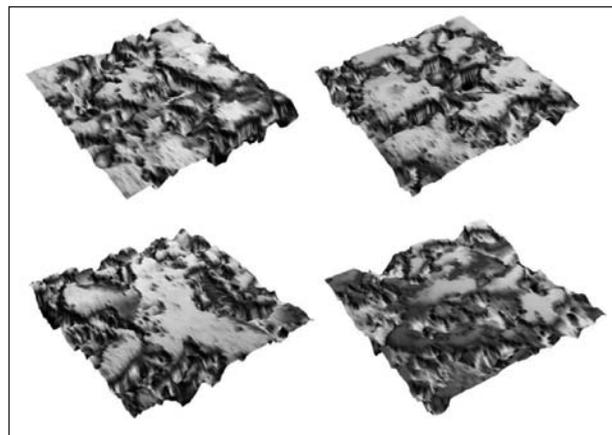


Bild 70: Flächenhafte Messdaten zu Bohrkern 4 (Größe jeder Messstelle 2,5 x 2,5 mm)

die Griffigkeitsmessungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) durchgeführt werden, ist in Bild 69b abgebildet.

Die Größe sowie die Anzahl der Messstellen mussten projektbedingt aus Zeit- und Kostengründen sehr stark eingeschränkt werden. Aus demselben Grund wurde die flächenhafte Vermessung ausschließlich auf den Originalbohrkernen durchgeführt.

In Bild 70 sind beispielsweise die flächenhaften Aufnahmen für den Bohrkern 4 abgebildet.

Bei der Auswertung der Daten ist zu erkennen, dass die auf einem Bohrkern vermessenen Stellen sehr unterschiedliche Texturkennwerte aufweisen. Der Höhenparameter S_q beschreibt beispielsweise die durchschnittliche quadratische Höhe der Oberfläche und weist auf den in Bild 70 abgebildeten Messflächen Werte von 0,459 mm bis 0,730 mm auf. Die großen Texturunterschiede führen dazu, dass die daraus berechneten Oberflächenkennwerte großen Streuungen unterliegen. Aus diesem Grund können die gewonnenen flächenhaften Messwerte innerhalb dieses Projektes nur in sehr begrenztem Maße für die Oberflächencharakte-

risierung herangezogen werden. Durch die flächenhafte Vermessung der künstlichen Fahrbahntexturen wären vermutlich kleinere Streuungen bei den ermittelten Oberflächenkenngrößen zu erwarten gewesen, da diese Oberflächen homogene Oberflächenstrukturen aufweisen.

Als weitere Schwierigkeit sind die unterschiedlichen Messstellen für die flächenhafte Vermessung am μ scan-custom (Bild 69a) und den Messbereich für die Griffigkeitsmessungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (Bild 69b) zu betrachten. Hier treten vermutlich ähnliche Effekte auf wie beim Vergleich der SRT- und der SRT_{GAT} -Messung auf realen Fahrbahntexturen, welche auch unterschiedliche Oberflächenbereiche bewerten.

Die Texturdaten wurden mit der Software „ μ -Soft Analysis Premium“ ausgewertet. Hierbei wurden die Oberflächen horizontal ausgerichtet und danach die Oberflächenkennwerte bestimmt.

Es wurden Parameter aus den folgenden Parametergruppen berechnet:

- Höhenparameter,
- Funktionsparameter,
- Raumparameter,
- Hybridparameter,
- Featureparameter.

Auf die einzelnen Parameter wird aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingegangen. Im Anhang VI befindet sich beispielhaft die Auswertung zum Bohrkern 4 (Bild 70).

5.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde die Herstellung von Fahrbahnproben mit realen Fahrbahntexturen sowie künstlich erzeugten Texturen vorgestellt. Die Probekörper wurden mittels neu entwickelten Abdruckverfahren hergestellt und können am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) untersucht werden. Die realen Fahrbahntexturen stammen von Kontrollbohrkernen aus realen Straßenbelägen, die künstlichen Texturen von künstlich hergestellten Kugeloberflächen.

Alle hergestellten Fahrbahnproben bestehen aus demselben Material (Kunstharz mit Korund als Füllstoff). Hiermit kann der Einfluss der Textur auf die

Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit vom Materialeinfluss isoliert betrachtet werden.

Die vorliegenden Fahrbahnabdrücke wurden hinsichtlich ihrer Textur mit dem Sandfleckverfahren, dem Texturmessgerät ELAtextur[®], dem Ausflussmesser nach Moore, dem SRT-Pendel und dem SRT_{GAT} -Messverfahren charakterisiert.

Die Ergebnisse des Sandfleckverfahrens, des Texturmessgeräts ELAtextur[®] und der Ausflussmessung nach Moore zeigen, dass die untersuchten realen Fahrbahntexturen eine große Vielfalt unterschiedlicher Makrotexturen aufweisen. Die MPD-Werte reichen von ca. 0,3 mm bis ca. 1,6 mm. Die Abdrücke mit künstlicher Textur weisen MPD-Werte von ca. 0,1 mm bis ca. 1,7 mm auf, d. h., der Texturbereich der realen Fahrbahntexturen wird gut abgedeckt. Bei den durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass die Charakterisierung der Makrotextur der Fahrbahnproben mittels Texturmessgeräts ELAtextur[®] oder des Sandfleckverfahrens durchgeführt werden sollte, da diese beiden Verfahren die verlässlichsten Ergebnisse liefern. Im Hinblick auf Versuchsdauer und Reproduzierbarkeit, auch bei wechselndem Versuchspersonal, ist das Texturmessgerät ELAtextur[®] der Sandfleckmethode vorzuziehen.

Die Ergebnisse der SRT-Messung und der SRT_{GAT} -Messung zeigen, dass die Fahrbahnproben SRT-Werte von ca. 50 bis ca. 75 und SRT_{GAT} -Werte von ca. 0,4 bis ca. 0,7 aufweisen. Die SRT-Werte und SRT_{GAT} -Werte korrelieren auf realen Fahrbahntexturen nur in einem geringen Maße und auf den gleichmäßigen künstlich erzeugten Texturen eher gut. Die geringe Korrelationsgüte auf realen Fahrbahntexturen wird auf die unterschiedlichen Flächenbereiche zurückgeführt, welche durch die beiden Verfahren bewertet werden.

Da der SRT_{GAT} -Wert denselben Flächenbereich wie die Griffigkeitsversuche am GAT (Hauptversuche) bewertet, kann der SRT_{GAT} -Wert zur Charakterisierung der Mikrorauheit der Fahrbahnproben herangezogen werden.

Nach Auswertung der Messergebnisse wurde festgestellt, dass die durchgeführten flächenhaften Texturvermessungen innerhalb dieses Forschungsprojektes nicht für die Oberflächencharakterisierung herangezogen werden können, da die Oberflächenkenngrößen von Messstelle zu Messstelle sehr stark streuten. Durch eine Vergrößerung der Messstellen könnten diese Streuungen bei zukünftigen

Untersuchungen minimiert werden. Weiterhin sollten bei zukünftigen Untersuchungen die künstlichen (homogenen) Fahrbahntexturen flächenhaft vermessen werden um verlässliche Oberflächenkennwerte zu erhalten.

6 Vorversuche am Innentrommelprüfstand (IPS)

Für die späteren Griffigkeitsuntersuchungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) ist es wichtig, die gleichen Umgebungs- und Randbedingungen, wie sie bei realen SKM-Messungen auftreten, einzustellen. Da am Griffigkeits- und Abriebprüfstand allerdings Gummigleitkörper und keine realen SKM-Reifen untersucht werden, ist es notwendig, den Gleitgeschwindigkeitsanteil (Geschwindigkeitsanteil quer zum SKM-Reifen) bei der realen SKM-Messung zu kennen, um die richtige Gleitgeschwindigkeit bei den späteren Messungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand einstellen zu können. Beim SKM-Verfahren tritt ein Querschlepp von ca. 34,2 % (20° Schräglaufwinkel „sin 20° = 0,342“) auf. Das entspricht bei 80 km/h Fahrgeschwindigkeit einer Quergeschwindigkeit von 27,36 km/h (= 80km/h · 34,2 %). Diese Quergeschwindigkeit kann, wie in Kapitel 2.4 bereits erläutert, in einen Gleit- und einen Verformungsanteil (Gleitschlupf und Verformungsschlupf) aufgeteilt werden. Der Verformungsanteil beschreibt hierbei den Geschwindigkeitsanteil, der durch die Reifenverformung beim Eintritt in den Reifenlatsch entsteht, der Gleitanteil beschreibt den Geschwindigkeitsanteil, der durch das Gleiten des Gummis auf der Fahrbahn entsteht.

6.1 Bestimmung des Gleitschlupfes

Zur Bestimmung des mittleren Gleitschlupfes wurden SKM-Messungen mit den vorgeschriebenen SKM-Randbedingungen und einem realen SKM-Reifen im Innentrommelprüfstand des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) durchgeführt. An diesem Prüfstand ist es möglich, unterschiedliche Reifen unter verschiedenen Messbedingungen auf unterschiedlichen Fahrbahnen zu untersuchen [FISCHLEIN, 99].

6.1.1 Fahrbahnbelag

Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein Fahrbahnbelag aus Asphaltbeton 0/11 mit Harzer Grau-

wacke als Gestein verwendet. Dieser wurde in 8 Fahrbahnkassetten in den Innentrommelprüfstand eingebaut.

Fahrbahncharakterisierung

Zur Fahrbahncharakterisierung wurde die Fahrbahn mit der Sandfleckmethode, dem Ausflussmesser und dem SRT-Pendel untersucht. Zur Ausflussmessung wurde in diesem Fall ein modifiziertes Gerät verwendet (modifizierte Halterung des Gummiringes), das die aus der Trommelkontur resultierende Fahrbahnkrümmung berücksichtigt.

In Bild 71 sind die Ergebnisse der Sandfleckuntersuchung und der Ausflussmessung zusammengefasst.

Es ist zu erkennen, dass die vermessenen Fahrbahnkassetten unterschiedliche mittlere Texturtiefen und unterschiedliche Ausflusszeiten aufweisen. Dies kann durch die Fertigungstoleranzen, welche bei diesem Belag vorlagen, erklärt werden.

In Bild 72 sind die Ergebnisse der SRT-Versuche abgebildet. Die angeführten SRT-Werte wurden

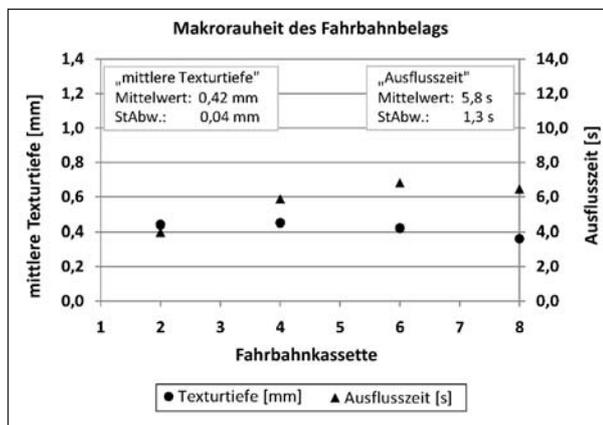


Bild 71: Makrorauheit des Fahrbahnbelages (tabellarische Daten im Anhang VII)

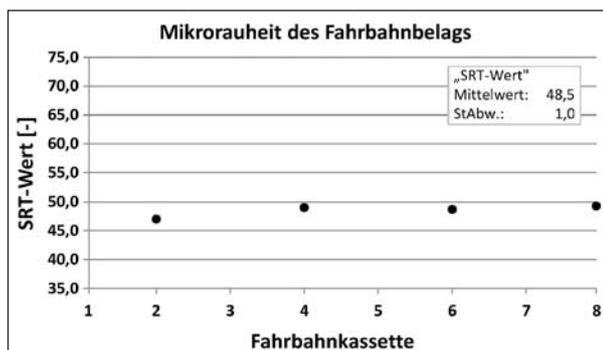


Bild 72: Mikrorauheit des Fahrbahnbelages (tabellarische Daten im Anhang VII)

nach der Messung einer Temperaturkorrektur unterzogen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die SRT-Werte über alle vermessenen Fahrbahnkassetten relativ gleichmäßig verteilt sind. Während der Durchführung der Vorversuche wurden mehrmals SRT-Messungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass sich die SRT-Werte über die Versuchsdauer nicht merklich änderten ($SRT_{\max} = 49,4$; $SRT_{\min} = 47,7$).

6.1.2 Versuchsplan

Die Bestimmung des mittleren Gleitschlupfanteils kann über eine $S-\alpha$ -Kennlinie durchgeführt werden. Hierbei entsprechen S der gemessenen Seitenkraft und α dem eingestellten Schräglaufwinkel. Zu Beginn des Versuchsablaufs wurde der SKM-Messreifen bei einer Trommelgeschwindigkeit von 80 km/h 15 Minuten lang eingefahren, was einer Messstrecke von 20 km entspricht. Dieses Einfahren musste, wie in den [TP Griff-StB (SKM)] vorgeschrieben, durchgeführt werden, da neue SKM-Reifen zum Einsatz kamen.

Das Einfahren wurde mit folgenden Einstellungen, entsprechend den Messbedingungen beim SKM, durchgeführt:

- 80 km/h Trommelgeschwindigkeit,
- ca. 0,5 mm Wasserfilmdicke,
- 3,5 bar Reifeninnendruck,
- 20° Schräglaufwinkel,
- 0° Sturzwinkel,
- Radlast ca. 1.960 N,
- frei drehendes Rad.

Nach dem Einfahren wurden Versuche mit den in Tabelle 7 angeführten Parametern durchgeführt, wobei die Trommelgeschwindigkeit variiert wurde und der Messreifen frei drehbar gelagert war.

Die Versuche wurden wie folgt durchgeführt:

- Warmfahren des Messreifens unter SKM-Bedingungen, damit dieser die Arbeitstemperatur erreicht:
 - Mindestwarmfahrstrecke: 2 km nach [TP Griff-StB (SKM)],

| Messung | Trommelgeschwindigkeit [km/h] | Wasserfilmdicke [mm] | Reifeninnendruck [bar] | Schräglaufwinkel [°] | Sturzwinkel [°] | Radlast [N] |
|---------|-------------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------|-------------|
| AXY_11 | 20 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_12 | 40 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_13 | 60 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_14 | 80 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_15 | 100 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_16 | 20 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_17 | 40 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_18 | 60 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_19 | 80 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |
| AXY_20 | 100 | ca. 0.5 | 3.5 | 0 .. 20 | 0 | 1.960 |

Tab. 7: Versuchsparameter bei den Vorversuchen

- Schräglauf: 20°,
- Geschwindigkeit 80 km/h,
- Einstellen der Trommelgeschwindigkeit,
- Einstellen der Wasserfilmdicke,
- Aufsetzen des Messreifens mit geforderter Radlast bei 0° Schräglaufwinkel,
- Verstellung des Schräglaufwinkels von 0° bis 20° und wieder zurück auf 0° über eine Versuchsdauer von ca. 10 Sekunden.

Aufgrund technischer Randbedingungen konnte der Schräglaufwinkel allerdings nicht bis 20°, sondern lediglich bis 18° eingestellt werden. Dies ist für die weitere Auswertung jedoch nicht von Bedeutung, da sich bereits ab einem Schräglaufwinkel von ca. 5° keine nennenswerten Änderungen im Seitenkraftbeiwert zeigten (siehe Bild 78). In diesem Bericht wird, um den Zusammenhang zum SKM-Verfahren zu verdeutlichen weiterhin von einem Schräglaufwinkel von 20° gesprochen.

Für die Erstellung der $S-\alpha$ -Kennlinie wurden die Messdaten, die bei der Verstellung des Schräglaufwinkels von 20° zurück auf 0° aufgezeichnet wurden, verwendet.

In Bild 73 ist der Messaufbau im Innentrommelprüfstand abgebildet.



Bild 73: Messaufbau im Innentrommelprüfstand

6.1.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messung AXY_12 exemplarisch vorgestellt und ausgewertet. Die Messdaten aller Versuche sind im Anhang VIII aufgeführt. In Bild 74 sind die gemessenen Rohdaten der Radlast und der Seitenkraft über dem Schräglaufwinkel aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass die Radlast einen sinusähnlichen Verlauf aufweist. Der Verlauf lässt sich durch eine Ungleichförmigkeit der Asphaltfahrbahn, die an der Innentrommel des Prüfstandes montiert ist, erklären. Dieser Effekt ist durch die sehr steife Struktur des SKM-Messreifens deutlich zu erkennen.

Durch die auftretenden Radlaständerungen ändert sich auch die auftretende Seitenkraft ($F_R = \mu \cdot F_N$). Die Seitenkraftänderung ist jedoch nicht in Phase mit der Radlaständerung, da sich der Reifen zum Aufbau einer Seitenkraft zunächst verformen muss.

Beim Verlauf der Seitenkraft bis ca. $\alpha \leq 5^\circ$ können zwei sich überlagernde Effekte beobachtet werden. Zum einen steigt die Seitenkraft aufgrund der Schräglaufwinkeländerung ($\Delta\alpha$) stetig an, zum anderen ändert sich die Seitenkraft aufgrund der schwankenden Radlast.

Ab einem Schräglaufwinkel von ca. $\alpha \geq 5^\circ$ kann die Seitenkraftschwankung nahezu vollständig auf die Radlaständerung zurückgeführt werden, da der Reifen bereits vollständig abgleitet und die Schräglaufwinkelhöhung keinen Einfluss mehr auf die Seitenkraft besitzt.

Der Seitenkraftbeiwert μ_y ist in Bild 75 abgebildet und lässt sich, wie in Kapitel 2.1.1 erwähnt, über die Formel (1) bestimmen.

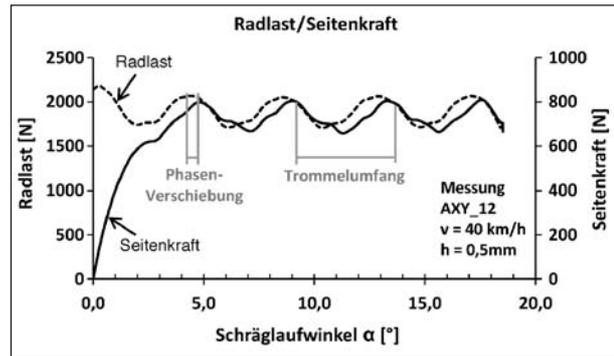


Bild 74: Gemessene Radlast und Seitenkraft über dem Schräglaufwinkel (nicht stationär)

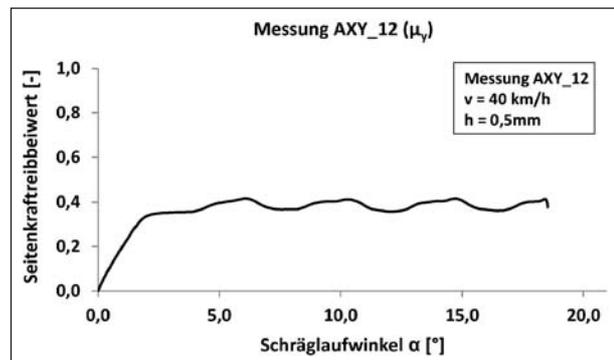


Bild 75: Seitenkraftbeiwert μ_y bei nicht korrigierter Phasenverschiebung zwischen Radlast und Seitenkraft

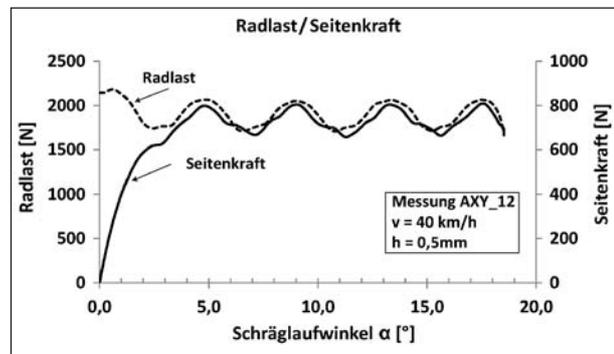


Bild 76: Radlast und Seitenkraft nach Korrektur der Phasenverschiebung

Durch die bereits erwähnte Phasenverschiebung zwischen Radlast und Seitenführungskraft ergibt sich der ungleichmäßige Verlauf des Seitenkraftbeiwertes.

Um einen gleichmäßigeren Verlauf des Seitenkraftbeiwertes zu erhalten, wurde die Phasenverschiebung durch ein Verschieben der Radlastkurve im Folgenden korrigiert. In Bild 76 sind die phasenangepassten Daten dargestellt.

Aus diesen phasenangepassten Daten wurde nun erneut der Verlauf des Seitenkraftbeiwertes bestimmt (Bild 77).

Wie zu erwarten, ist der Verlauf des Seitenkraftbeiwertes mit korrigierter Phasenverschiebung deutlich geglättet.

Die Ermittlung des Gleitschlupfanteils wird im Folgenden mit den korrigierten Daten durchgeführt. Die Daten wurden, wie in Bild 78 dargestellt, ausgewertet.

Die Bestimmung des Gleitschlupfes bzw. Verformungsschlupfes aus der S - α -Kurve verläuft analog zur Bestimmung des elastischen bzw. plastischen Dehnungsanteils aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Zugversuches (Werkstoffkunde).

Zuerst wird die lineare Anfangssteigung des Seitenkraftbeiwertverlaufes bestimmt. Danach wird eine Gerade mit der ermittelten Steigung durch den Messwert bei $\alpha = 20^\circ$ gelegt. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der horizontalen Achse zeigt direkt den Anteil des Gleitschlupfes (plastischer Anteil bei der entsprechenden Spannungs-Dehnungskurve) an.

In Bild 79 ist die Auswertung des Gleitschlupfanteils bzw. des Verformungsschlupfanteils aller durchgeführten Messungen zusammengefasst.

Es ist zu erkennen, dass der Gleitschlupfanteil sowie der Verformungsschlupfanteil bei allen Trommelgeschwindigkeiten nahezu gleich sind. Der Gleitschlupf beträgt durchschnittlich ca. 30,7 %, der Verformungsschlupf ca. 3,5 %. Mit diesen Parametern kann die Gleitgeschwindigkeit bei den späteren Griffigkeitsmessungen mit dem Griffigkeitsprüfstand entsprechend der gewünschten SKM-Messgeschwindigkeit eingestellt werden.

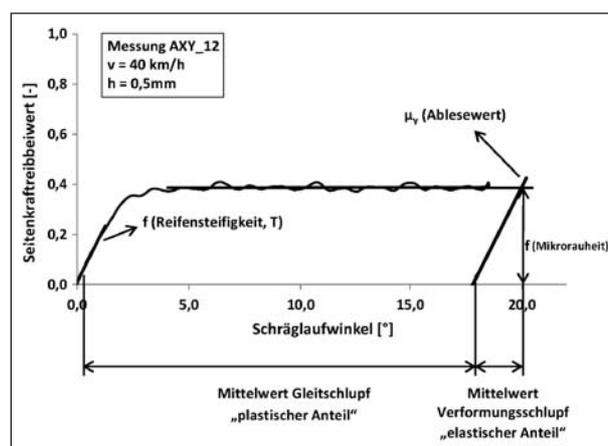


Bild 78: Ermittlung des Gleitschlupfanteils

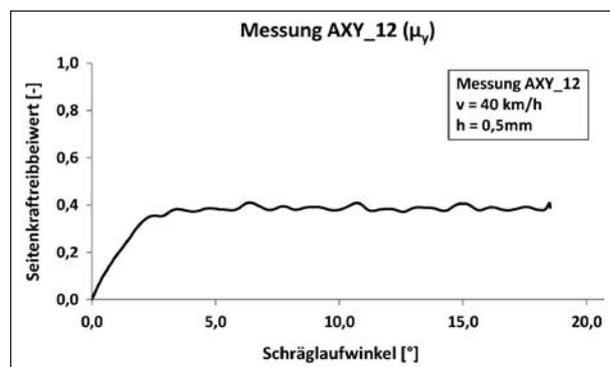


Bild 77: Seitenkraftbeiwert μ_y bei korrigierter Phasenverschiebung zwischen Radlast und Seitenkraft

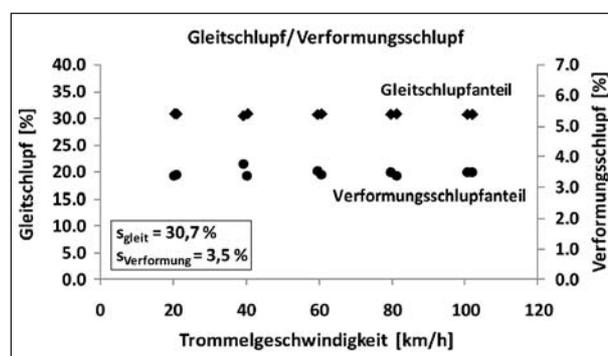


Bild 79: Gleitschlupfanteil/Verformungsschlupfanteil über der Trommelgeschwindigkeit

| Fahrgeschwindigkeit SKM* [km/h] | Gleitgeschwindigkeit GAT [km/h] | Einzustellende Drehzahl GAT [U/min] |
|--|------------------------------------|--|
| 20 | 6,1 | 266 |
| 40 | 12,3 | 532 |
| 60 | 18,4 | 798 |
| 80 | 24,6 | 1064 |
| 100 | 30,7 | 1330 |
| Gleitgeschwindigkeit SRT (rechnerisch) [km/h] | Gleitgeschwindigkeit GAT [km/h] | Einzustellende Drehzahl GAT [U/min] |
| 10 | 10,0 | 433 |

Tab. 8: Solldrehzahlen für die Griffigkeitsmessungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)

In den nachfolgenden Kapiteln wird daher von der SKM*-Messgeschwindigkeit gesprochen. Hiermit ist der Gleitanteil (30,7 % der SKM-Geschwindigkeit bei realen SKM-Messungen) gemeint, mit welcher der SKM-Reifen quer über die Fahrbahn gleitet. Am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) wird immer die Drehzahl eingestellt, mit welcher dieselbe Gleitgeschwindigkeit wie beim SKM-Verfahren erreicht wird. Dies wird durch ein „*“ gekennzeichnet. In Tabelle 8 sind die benötigten Drehzahlen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) angegeben. Der Gummigleitkörper gleitet dabei auf dem Gleitradius von 61,25 mm auf der Fahrbahnprobe.

7 Vorversuche am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)

Um bei Griffigkeitsversuchen reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, möglichst bei allen Versuchen exakt die gleichen Randbedingungen einzustellen.

Vor der Durchführung der Griffigkeitsmessungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand wurden deshalb verschiedene Vorversuche durchgeführt, um den Einfluss der folgenden Parameter auf die Griffigkeitsergebnisse abschätzen zu können:

- Position der Wasseraufbringung und Wasserausflussmenge,
- Fahrbahnverschleiß,
- Prüfstandsteifigkeit.

7.1 Einfluss der Wasseraufbringung und Wasserausflussmenge

7.1.1 Position der Wasseraufbringung

Bei den hier durchgeführten Griffigkeitsmessungen handelt es sich um Griffigkeitsmessungen auf nasser Fahrbahn. Der Wasserfilm sollte hierbei so eingestellt werden, dass er dem Wasserfilm realer SKM-Messungen auf der Straße möglichst ähnlich ist (rechnerische Wasserfilmdicke von 0,5 mm). Hierbei wurden zu Versuchsbeginn zwei unterschiedliche Konzepte verfolgt:

1. Wasseraufbringung in Probenmitte,
2. Wasseraufbringung direkt vor dem Gummigleitkörper.

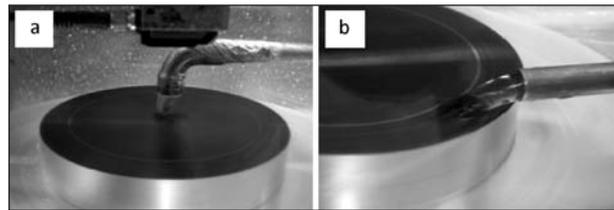


Bild 80: Unterschiedliche Varianten der Wasseraufbringung auf die Probe

In Bild 80a ist die Wasseraufbringung in Probenmitte und in Bild 80b ist die Wasseraufbringung direkt vor dem Gummigleitkörper abgebildet.

Die Wasseraufbringung in Probenmitte hat den Vorteil, dass die komplette Probenoberfläche mit Wasser benetzt ist und dadurch nach dem Kontakt mit dem Gummigleitkörper bis zum nächsten Kontakt ständig gekühlt wird. Der große Nachteil hierbei ist, dass eine sehr große Wassermenge auf die Probe aufgebracht und wieder abgeleitet werden muss. Um einen gleichmäßigen Wasserfilm auf der Fahrbahnprobe zu erzeugen, muss bei dieser Methode die Wasseraufbringung exakt im Mittelpunkt der Fahrbahnprobe erfolgen.

Bei der Wasseraufbringung direkt vor dem Gummigleitkörper sind erheblich kleinere Wassermengen ausreichend, um die benötigte Wasserfilmdicke zu erzeugen, da sich das Wasser nicht auf der kompletten Probe verteilt, sondern nur den benötigten Wasserfilm direkt vor dem Gummigleitkörper erzeugen muss.

Da bei den späteren Griffigkeitsversuchen der Einfluss unterschiedlicher Wassertemperaturen untersucht werden soll und die kontinuierliche Temperierung kleiner Wassermengen deutlich einfacher zu realisieren ist, wurde die Wasseraufbringung direkt vor dem Gummigleitkörper umgesetzt.

7.1.2 Düsenform

Zur Aufbringung des Wassers vor dem Gummigleitkörper können unterschiedliche Düsen verwendet werden. Hierzu wurden unterschiedliche Formen während der Vorversuche am Prüfstand angebracht und untersucht. In Bild 81 sind die unterschiedlichen Düsen abgebildet:

- a gerades Rohr,
- b gequetschtes Rohr,
- c um 45° abgewinkeltes Rohr,
- d um 90° abgewinkeltes Rohr.

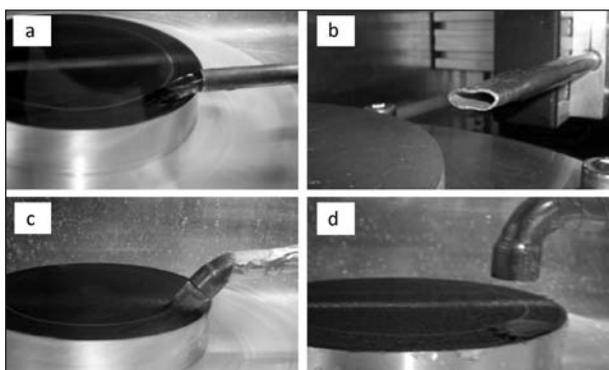


Bild 81: Wasserdüsen

Bei Vorversuchen hat sich gezeigt, dass die Variante a die besten Ergebnisse verspricht, da sich hiermit der gleichmäßigste Wasserfilm ausbildet.

7.1.3 Ermittlung der tatsächlichen Höhe des Wasserfilms

Um die vorliegende Wasserfilmdicke bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (Bohrkern-drehzahlen) zu bestimmen, wurden unterschiedliche Konzepte untersucht. Zum einen wurde versucht, mittels Ultraschalls die tatsächliche Wasserfilmdicke zu messen, zum anderen wurde versucht, ähnlich zum realen SKM-Verfahren die Wasserfilmdicke rechnerisch aus Wasserfilmbreite, Fahrgeschwindigkeit und Wasserausflussmenge zu bestimmen. Die Wasserfilmdickenbestimmung mittels Ultraschallsensors stellte sich als nicht zielführend heraus, da die auftretenden Luftverwirbelungen aufgrund der Fahrbahnprobenrotation die Messergebnisse stark verfälschen und damit unbrauchbar machen.

Zur rechnerischen Bestimmung der Wasserfilmdicke wurde ein Maßstab am Prüfstand angebracht, an dem die Wasserfilmbreite abgelesen werden konnte. Dieser Maßstab ist in Bild 82 dargestellt.

Mit der Annahme, dass das Wasser in kurzer Zeit die Fahrbahngeschwindigkeit annimmt, kann mit der am Maßstab abgelesenen Wasserfilmbreite (x), der Fahrbahngeschwindigkeit und dem Wasservolumenstrom die vorliegende Wasserfilmhöhe bestimmt werden.

Dieser Lösungsansatz der rechnerischen Bestimmung (siehe Bild 82) führte ebenfalls nicht zum Ziel, da die Wasserfilmbreite in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit nicht in dem benötigten Maße eingestellt werden konnte. Bei der infolge einer Geschwindigkeitserhöhung notwendigen Er-

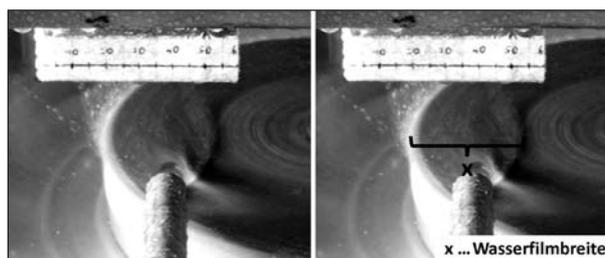


Bild 82: Maßstab für die Bestimmung der Wasserfilmbreite

höhung des Wasservolumenstroms (zur Erzielung der gleichen Wasserfilmdicke wie bei niedriger Geschwindigkeit) änderte sich nämlich auch die Breite des Wasserfilms, sodass die Wasserfilmhöhe nicht wie gewünscht einstellbar war.

Eine mögliche Lösung zur rechnerischen Einstellung der Wasserfilmhöhe hätte die Verwendung eines Wasserschuhs (analog zur SKM) sein können. Hierbei wird ein Wasserschuh mit definierter Breite am Prüfstand befestigt, welcher die Breite des Wasserfilms definiert. Durch den Wasservolumenstrom und die Gleitgeschwindigkeit lässt sich rechnerisch der Wasserfilm ermitteln. Dieser Ansatz wurde jedoch aus Zeitgründen innerhalb des Projektes nicht weiter verfolgt.

7.1.4 Einfluss der Wassermenge

Wie bereits in Kapitel 7.1.3 erläutert, konnte keine Möglichkeit gefunden werden, den Wasserfilm exakt zu vermessen und damit einstellen zu können. Daher wurde im Weiteren der Einfluss unterschiedlicher Wasserausflussmengen auf den zu messenden Griffigkeitswert untersucht. Es wurden hierbei zwei unterschiedliche Fahrbahnproben ausgewählt und an diesen Griffigkeitsmessungen durchgeführt. Hierbei wurden Messungen mit den SKM*-Messgeschwindigkeiten (Bestimmung in Kapitel 6), die den SKM-Messgeschwindigkeiten 20, 40, 60, 80 und 100 km/h entsprechen, bei drei unterschiedlichen Ausflussmengen (3, 4 und 5 l/min) durchgeführt. Eine der beiden Fahrbahnproben weist nahezu keine Makrotextur auf (Safety Walk), die andere Probe weist einen MPD-Wert von 0,56 mm auf. In Bild 83 sind die Messergebnisse abgebildet.

Der Vergleich der Kurven zeigt, dass bei beiden Oberflächen nahezu kein Unterschied zwischen der Ausflussmenge 4 und 5 l/min zu erkennen ist. Die gemessene Griffigkeit bei 3 l/min liegt tendenziell ein wenig höher.

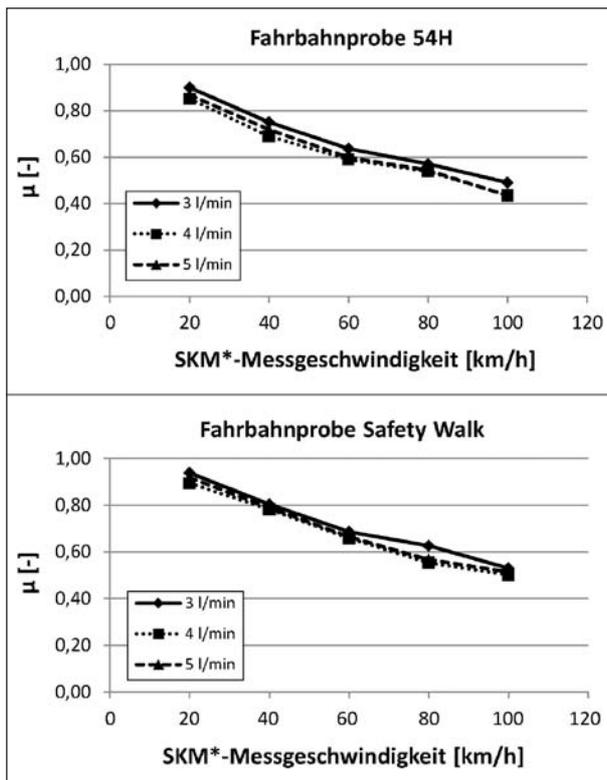


Bild 83: Einfluss der Wassermenge

Aufgrund der hier abgebildeten Ergebnisse wurden im Rahmen der Hauptuntersuchungen die durchzuführenden Griffigkeitsmessungen bei einer Wasserausflussmenge von 5 l/min durchgeführt. Es kann zwar nicht davon ausgegangen werden, dass genau ein Wasserfilm von 0,5 mm vorliegt. Es ist jedoch sichergestellt, dass der Fahrbahnprobenanteil, welcher mit dem Gummigleitkörper in Kontakt steht, mit Wasser benetzt ist.

7.2 Fahrbahnverschleiß

Da in diesem Projekt ein Fahrbahnprobenmaterial zum Einsatz kommt (Kunstharz mit Strahlkorund), zu welchem bisher keine Erfahrungswerte bezüglich Haltbarkeit bei Griffigkeitsversuchen vorliegen, wurden hierzu Verschleißversuche durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden immer SRT_{GAT} -Messungen mit SKM_{GAT} -Messungen im Wechsel durchgeführt. Durch die SKM_{GAT} -Messungen sollte der Fahrbahnverschleiß, wie er bei den späteren Griffigkeitsmessungen auftritt, simuliert werden und durch die SRT_{GAT} -Messungen sollte dieser Verschleiß detektiert und quantifiziert werden. Die SKM_{GAT} -Versuche dauerten zu Beginn 5 s (3x), dann 10 s (3x) und gegen Ende der Versuchsreihe 20 s (3x). Somit ergab sich eine Gesamtbelas-

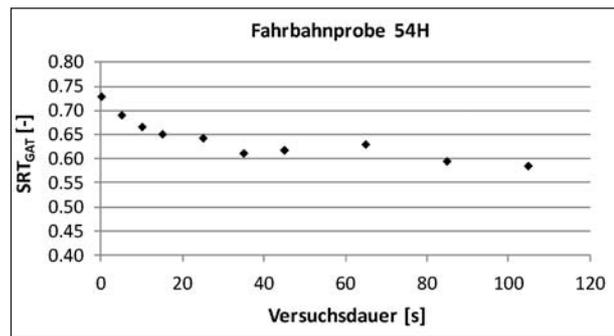


Bild 84: Verschleiß der Kunstharzprobe 54H

tungszeit von 105 s. Bei den späteren Griffigkeitsversuchen wurden die Proben ca. 90 s bei ähnlicher Intensität belastet. In Bild 84 sind die Ergebnisse der SRT_{GAT} -Messungen abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass der Griffigkeitsabfall zu Versuchsbeginn der Versuche, wie zu erwarten, stärker ausfällt als zu späteren Versuchszeiten. Ähnliche Effekte können bei Prüfstandversuchen am Innentrommelprüfstand (IPS) mit realen Fahrbahnbelägen beobachtet werden. Aus diesem Grund wurde jede Fahrbahnprobe vor den eigentlichen Griffigkeitsversuchen eingefahren, um sicherzustellen, dass sich das Griffigkeitsniveau während der Griffigkeitsversuche möglichst nicht ändert.

7.3 Einfluss der Prüfstandsteifigkeit

Zu Beginn der Prüfstandinbetriebnahme wurde festgestellt, dass der Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) bei der Durchführung von Griffigkeitsmessungen zu Schwingungen angeregt wird. Um die Auswirkung dieses Verhaltens auf die Griffigkeitsergebnisse beurteilen zu können, wurde die Prüfstandsteifigkeit durch Austausch der Linearführung (Führung der Einfederbewegung) variiert. Durch Griffigkeitsmessungen vor und nach dem Austausch der Linearführung konnte ein unterschiedliches Schwingungsverhalten (Amplitudenhöhe der gemessenen Kräfte) des Prüfstandes festgestellt werden. Dies lässt sich durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der zwei unterschiedlichen Linearführungen erklären.

Die steifere Linearführung bietet im Gegensatz zur elastischeren Linearführung den Vorteil, dass diese spielfrei ist und mit zwei Führungsschlitzen ausgeführt ist. Durch die Verwendung von zwei Führungsschlitzen können Drehmomente besser abgestützt werden. Bei Verwendung der elastischen Linearführung konnten leichte Verkippungen des

Führungsschlittens während der Griffigkeitsmessungen festgestellt werden.

In Bild 85 sind die Ergebnisse der Vergleichsmessung zwischen elastischer Linearführung und steifer Linearführung bei der SKM*-Gleitgeschwindigkeit, welche einer SKM-Messgeschwindigkeit von 60 km/h entspricht, abgebildet. Die Anpresskraft von 40 N wurde im statischen Zustand eingestellt. Die Probenoberfläche wurde mit einem Wasservolumenstrom von 5 l/min benetzt. Die Vergleichsmessungen wurden bei unterschiedlichen SKM*-Fahrerhöhen durchgeföhrt (20, 40, 60, 80 und 100 km/h). Die Diagramme zu allen Messgeschwindigkeiten befinden sich im Anhang IX.

Die Fahrbahnprobe wurde zwischen den beiden Vergleichsmessungen nicht ausgebaut, um den Einfluss einer eventuellen Probeneinspannung zu eliminieren.

In Bild 85 ist zu erkennen, dass die Schwingungen bei der steifen Linearführung in ihrer Amplitude gegenüber den Schwingungen bei elastischer Linearführung weniger ausgeprägt sind. Dieser Effekt konnte bei allen durchgeföhrt Messungen festgestellt werden. Aus diesem Grund werden die Griffigkeitsmessungen mit der steiferen Linearführung durchgeföhrt, da hiermit der Prüfstand weniger zum Schwingen angeregt wird und deshalb aussagekräftigere Ergebnisse zu erwarten sind.

Weiterhin ist zu erkennen, dass der dargestellte Kraftverlauf (F_y), wie zu erwarten, periodisch mit

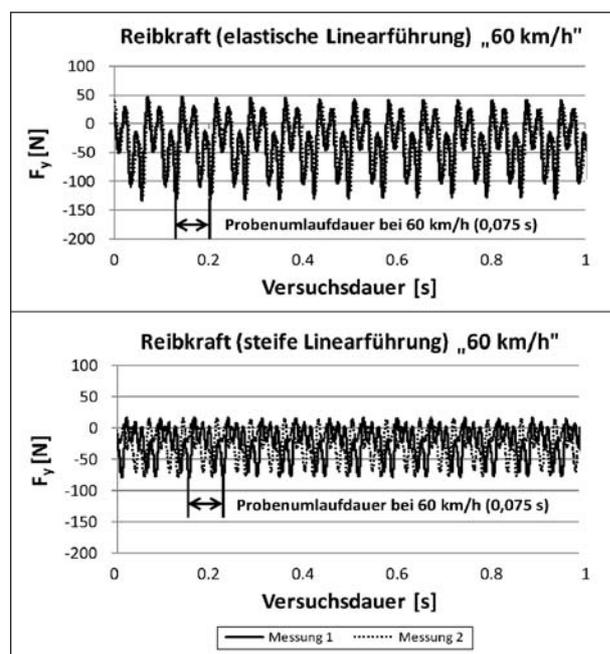


Bild 85: Einfluss der Prüfstandsteifigkeit bei 60 km/h

der berechneten Probenumlaufdauer von 0,075 s wiederkehrt. Somit können die Schwankungen im Kraftsignal auf die Textur der untersuchten Probe zurückgeföhrt werden.

Beim Vergleich der fünf unterschiedlichen SKM*-Messgeschwindigkeiten (20, 40, 60, 80 und 100 km/h) fällt auf, dass der Steifigkeitseinfluss im niederen Geschwindigkeitsbereich stärker als im hohen Geschwindigkeitsbereich ausgeprägt ist (Anhang IX). Dies deutet darauf hin, dass die Fahrbahnprobe, welche eine hier nicht näher charakterisierte Fahrbahntextur aufweist, den Prüfstand bei der Messgeschwindigkeit von 20 km/h nahe einer Resonanzfrequenz anregt. Bei den höheren Messgeschwindigkeiten ist dieser Effekt weniger ausgeprägt. Bei einer gröberer bzw. feineren Fahrbahntextur würde vermutlich diese Resonanzfrequenz dementsprechend bei höheren bzw. niedrigeren Messgeschwindigkeiten angeregt werden.

Da jedoch bei den hier durchgeföhrt Untersuchungen ausschließlich der Steifigkeitseinfluss auf den Mittelwert des Reibbeiwertes (bzw. der Reibkraft) ermittelt werden sollte, wurden während dieser Vorversuche aus Zeitgründen keine weiteren Untersuchungen zum möglichen Textureinfluss durchgeföhrt. In Bild 86 sind die ermittelten Mittelwerte der Reibbeiwerte für die beiden unterschiedlichen Linearführungen bei der jeweiligen Messgeschwindigkeit abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass die Prüfstandsteifigkeit (Steifigkeit der Linearführung) nahezu keinen Einfluss auf den Mittelwert der Reibbeiwerte hat. Lediglich bei 20 km/h kommt es zu Abweichungen, da hier die Amplituden bei der elastischen Linearführung besonders groß waren. Eventuell kann die Abweichung bei 20 km/h auch durch Einreibeffekte des Fahrbahnbelags erklärt werden.

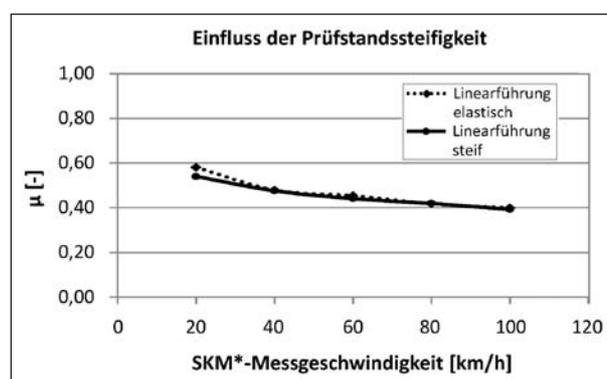


Bild 86: Einfluss der Prüfstandsteifigkeit auf den Mittelwert des Reibbeiwertes

8 Griffigkeitsmessungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Griffigkeitsmessungen am GAT präsentiert. Weiterhin werden die Ergebnisse der Vergleichsmessungen, die am IPS durchgeführt wurden, vorgestellt.

8.1 Griffigkeitsmessungen am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT)

Die Griffigkeitsmessungen wurden am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (Kapitel 4) mit dem in Bild 22 (rechts) abgebildeten Gummigleitkörper durchgeführt. Die verwendeten Gummigleitkörper hatten eine quadratische Reibfläche (10 x 10 mm) und wurden aus einem SKM-Messreifen gefertigt. Die Betriebsparameter (Anpressdruck und Gleitgeschwindigkeit) wurden so eingestellt, dass sie möglichst den SKM-Bedingungen entsprechen. Auf die in diesem Zusammenhang durchgeführten Vorversuche wurde bereits in Kapitel 6 und Kapitel 7 eingegangen. Die Griffigkeitsversuche, die hier vorgestellt werden, wurden ausschließlich auf Kunstharzabdrücken durchgeführt. Die Unterschiede in den Griffigkeitswerten können somit ausschließlich auf die Fahrbahntextur zurückgeführt werden (kein Materialeinfluss).

8.1.1 Versuchsplan

In Tabelle 9 ist der Versuchsplan für die am GAT durchgeführten Griffigkeitsversuche für eine Probe abgebildet. Nach diesem Plan wurden alle Fahrbahnproben (Kunstharzabdrücke) untersucht.

Es wurden Griffigkeitsmessungen bei der Wassertemperatur 15 °C und teilweise auch bei 20 °C und 25 °C durchgeführt, um den Einfluss der Wassertemperatur auf die SKM_{GAT} -Griffigkeitsergebnisse ermitteln zu können. Als erste Messung wurde die SRT_{GAT_1} -Messung durchgeführt, um die vorliegende Mikrorauheit (Griffigkeitsniveau) der Oberfläche vor Versuchsbeginn zu charakterisieren. Anschließend wurden die Messungen SKM_{GAT_1} bis SKM_{GAT_5} durchgeführt. Hierbei handelt es sich um die eigentlichen Griffigkeitsmessungen. Bei den darauffolgenden Messungen handelt es sich um Wiederholungsmessungen des SRT_{GAT} - bzw. des SKM_{GAT} -Griffigkeitswertes. Aus dem Vergleich der jeweiligen SRT_{GAT} -Messungen konnte auf mögliche Fahrbahnänderungen aufgrund von eventuel-

lem Fahrbahnverschleiß oder Fahrbahnverunreinigungen durch Gummiabrieb während der Griffigkeitsversuche geschlossen werden. Die Messungen SKM_{GAT_6} bis SKM_{GAT_10} dienen zum Nachweis der Reproduzierbarkeit der durchgeführten Messungen SKM_{GAT_1} bis SKM_{GAT_5} .

Die SRT_{GAT} -Messungen wurden mit einem SRT_{GAT} -Gummigleitkörper, welcher dieselbe geometrische Kontaktfläche (10 x 10 mm) wie der SKM_{GAT} -Gummigleitkörper aufweist, durchgeführt. Dieser SRT_{GAT} -Gummigleitkörper ist in Bild 87 abgebildet. Der SRT_{GAT} -Gummigleitkörper aus Bild 62b, der mit einem Anstellwinkel von 25° montiert

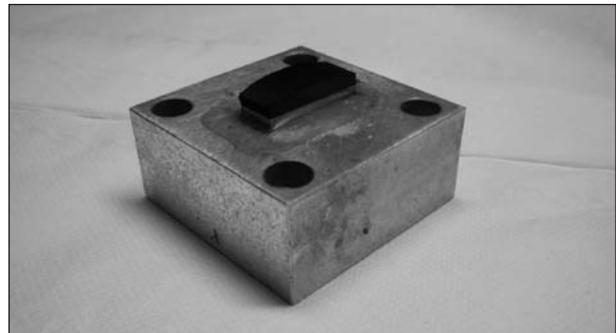


Bild 87: SRT_{GAT} -Gummigleitkörper

| Messung | Gummigleitkörper | v [km/h] | Wasser-Volumenstrom [l/min] | T_{Wasser} [°C] | Anpresskraft [N] | Versuchsdauer [s] |
|-----------------|------------------|----------|-----------------------------|--------------------------|------------------|-------------------|
| SRT_{GAT_1} | SRT_{GAT} | 10 | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_1} | SKM_{GAT} | 20* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_2} | SKM_{GAT} | 80* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_3} | SKM_{GAT} | 40* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_4} | SKM_{GAT} | 100* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_5} | SKM_{GAT} | 60* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SRT_{GAT_2} | SRT_{GAT} | 10 | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_6} | SKM_{GAT} | 60* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_7} | SKM_{GAT} | 100* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_8} | SKM_{GAT} | 40* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_9} | SKM_{GAT} | 80* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SKM_{GAT_10} | SKM_{GAT} | 20* | 5 | 15 | 40 | 1 |
| SRT_{GAT_3} | SRT_{GAT} | 10 | 5 | 15 | 40 | 1 |

Tab. 9: Versuchsplan für die Griffigkeitsversuche am Griffigkeits- und Abriebprüfstand (für eine Probe)

ist, konnte aufgrund des zu großen Kantenverschleißes nicht verwendet werden. Durch diesen Verschleiß hätten sich die Gummiaufstandsfläche und damit die Flächenpressung während der Versuche zu stark verändert und die Griffigkeitsergebnisse verfälscht.

Während der SKM_{GAT} -Griffigkeitsmessungen wurde zusätzlich zum SKM_{GAT} -Gummigleitkörper ein Reinigungsgummi, der wie der SRT_{GAT} -Gummigleitkörper aus SRT-Gummi hergestellt wurde, mit der zweiten Belastungseinheit des Prüfstandes auf die Fahrbahnprobe gepresst. In Bild 88 sind die beiden am GAT montierten Gummigleitkörper (SKM_{GAT} -Gummigleitkörper und der Reinigungsgummi) abgebildet.

Durch die zusätzliche Anpressung des Reinigungsgummis konnte der auftretende Gummiabrieb während der Griffigkeitsmessungen von der Fahrbahnoberfläche augenscheinlich entfernt werden. Die reinigende Wirkung des SRT-Gummis wurde bei der Durchführung der Vorversuche beobachtet. In Bild 89 ist eine Fahrbahnprobe nach der Durchführung von Griffigkeitsmessungen abgebildet. Bild 89a zeigt eine Probenoberfläche, wenn während der Griffigkeitsmessungen kein zusätzlicher Reinigungsgummi gegen die Fahrbahnprobe gepresst wird. In Bild 89b hingegen wurde das Reinigungsgummi während der Griffigkeitsversuche verwendet. Aus dem Vergleich der beiden Probenoberflä-

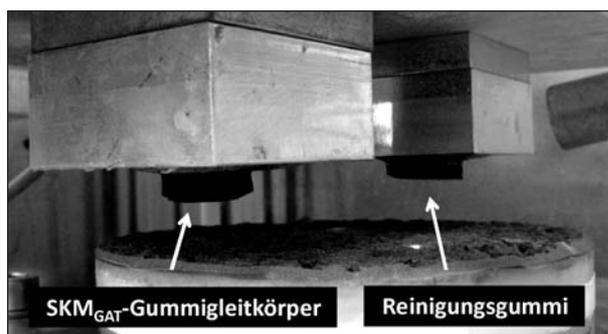


Bild 88: SKM_{GAT} -Gummigleitkörper und Reinigungsgummi am GAT

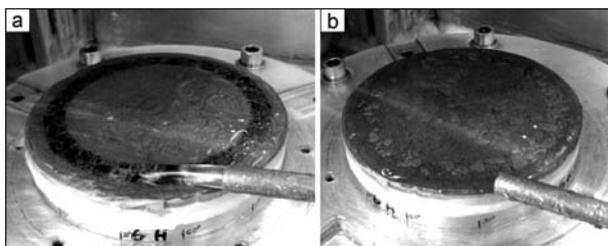


Bild 89: Fahrbahnprobe nach einem SKM-Griffigkeitsversuch ohne (a) und mit Reinigungsgummi (b)

chen ist die Reinigungswirkung des Reinigungsgummis deutlich zu erkennen.

8.1.2 Versuchsdurchführung

Zu Versuchsbeginn wurde die Fahrbahnprobe mit der Drehzahl beaufschlagt, bei welcher die gewünschte Gleitgeschwindigkeit des Gummigleitkörpers erreicht wird. Für den SRT-Gleitkörper ist die Gleitgeschwindigkeit direkt der Tabelle 9 zu entnehmen (10 km/h), für den SKM-Gleitkörper entspricht die Gleitgeschwindigkeit dem Gleitanteil der in Tabelle 9 angegebenen Geschwindigkeit (Bsp. $20 \cdot \text{km/h} = 20 \text{ km/h} \cdot 30,7 \% = 6,14 \text{ km/h}$). Sobald die Fahrbahnprobe die gewünschte Drehzahl erreicht hatte, wurde der Gummigleitkörper von oben mit der vorgegebenen Anpresskraft gegen die Fahrbahnprobe gepresst. Nach der Versuchsdauer von 1 s wurde der Gummigleitkörper wieder abgehoben. Der Wasservolumenstrom wurde bereits vor den eigentlichen Griffigkeitsmessungen mit einem Volumenstrom von 5 l/min direkt vor dem Gummigleitkörper auf die Fahrbahnprobe aufgebracht. Somit hatte die Fahrbahnprobe dieselbe Temperatur wie das Wasser.

Bei der Auswertung der Messdaten wurden jeweils Mittelwerte der gemessenen Kräfte (x-, y- und z-Richtung) über die gesamte Versuchsdauer gebildet. Danach wurde der Reibbeiwert aus dem Quotienten der resultierenden Reibkraft (vektorielle Addition der x- und y-Richtung) und der Anpresskraft (z-Richtung) bestimmt.

8.1.3 Versuchsergebnisse der Griffigkeitsversuche auf Kunstharzabdrücken von realen Fahrbahntexturen

In diesem Kapitel werden exemplarisch die Messergebnisse der Fahrbahnprobe 4H bei einer Wassertemperatur von 15 °C vorgestellt. Die Bezeichnung der Fahrbahnproben steht für die Textur des Originalbohrkerns (4H → Textur des Bohrkerns 4) und das verwendete Abdruckmaterial (4H → Kunstharz). Alle anderen Fahrbahnproben wurden analog hierzu untersucht und ausgewertet.

In Bild 90 sind die gemessenen Kraftverläufe der 1. Messung (SKM_{GAT_3}) und der 2. Messung (SKM_{GAT_8}) der Fahrbahnprobe 4 bei 15 °C Wassertemperatur abgebildet.

Zwischen der 1. Messung (Bild 90 oben) und der 2. Messung (Bild 90 unten) sind keine nennenswerten

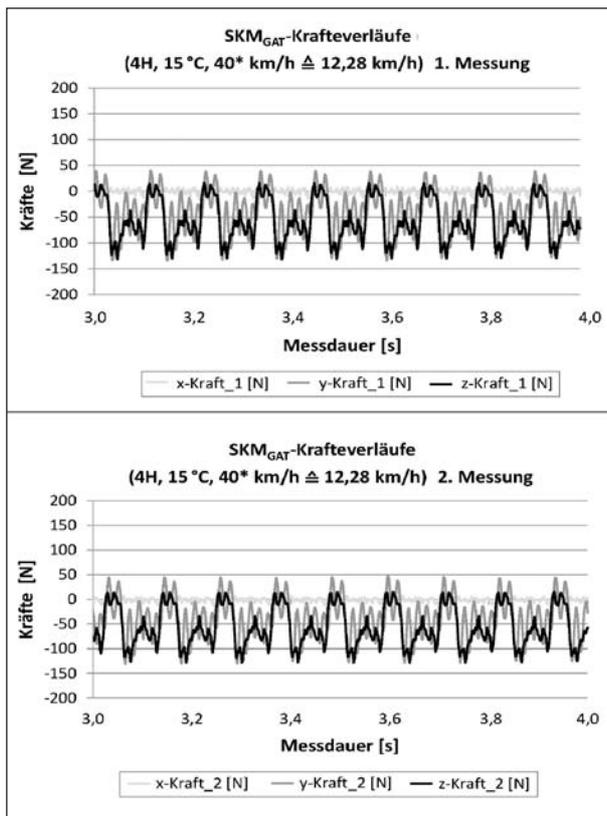


Bild 90: Gemessene Kraftverläufe der SKM₃- und SKM₈-Messung am GAT

Unterschiede zu erkennen. Die Kurvenverläufe sind praktisch deckungsgleich. Die Messdauer (horizontale Achse) ist beim Vergleich der beiden Kurven nicht von Bedeutung, da diese bei den einzelnen Versuchsdurchführung variieren kann. Daraus folgt, dass mit dem GAT Griffigkeitsversuche reproduzierbar durchgeführt werden können. Durch die Versuchsdurchführung, wie in Kapitel 8.1.2 und Kapitel 8.1.3 beschrieben, kann der Griffigkeitsverlauf über der Geschwindigkeit ermittelt werden. In Bild 91 ist diese Auswertung exemplarisch für die Fahrbahnprobe 4H bei einer Wassertemperatur von 15 °C veranschaulicht.

Im oberen Bereich von Bild 91 sind die beiden Einzelmesswerte (1. Messung und 2. Messung) und im unteren Bereich die für jede Geschwindigkeit gemittelten Messwerte abgebildet. Die Griffigkeit zeigt über der Geschwindigkeit einen nahezu linearen Verlauf. Für die folgenden Auswertungen wurden nur noch die Griffigkeitswerte bei 40 km/h, 60 km/h und 80 km/h betrachtet, da nur diese bei SKM-Straßmessungen nach [TP Griff-StB (SKM)] vorkommen.

In Bild 92 ist die Bestimmung der Steigung der Griffigkeit über der Messgeschwindigkeit veranschaulicht.

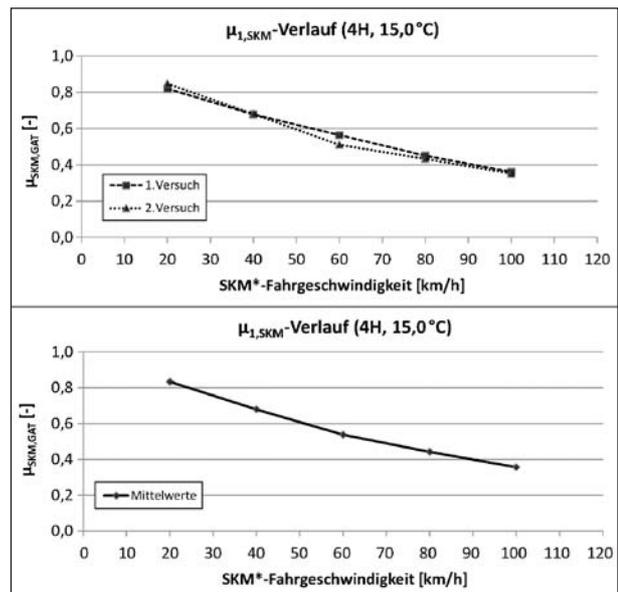


Bild 91: Griffigkeitsverlauf über der SKM*-Geschwindigkeit

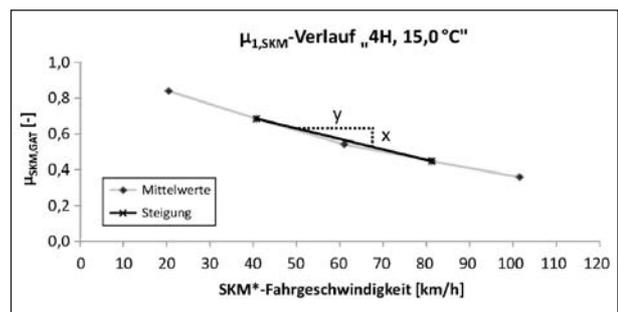


Bild 92: Bestimmung der Steigung des Griffigkeitsverlaufes über der Messgeschwindigkeit

Um die Steigung zu bestimmen, wurde eine Gerade durch die Griffigkeitswerte bei 40 km/h und 80 km/h gelegt. Es wurde angenommen, dass die Steigung der Geraden die Geschwindigkeitsabhängigkeit des SKM_{GAT}-Griffigkeitswertes im relevanten Bereich hinreichend genau beschreibt.

In Tabelle 10 sind die ermittelten Griffigkeitswerte sowie die berechneten Steigungen der Griffigkeitswerte über der Geschwindigkeit für alle Messungen der Fahrbahnabdrücke bei 15 °C Wassertemperatur aufgetragen. Die Messergebnisse der Probe 6H (in Tabelle 10 „fett“) werden bei den weiteren Betrachtungen aufgrund des ungleichmäßigen Griffigkeitsverlaufes nicht berücksichtigt. Bei den angegebenen SRT-Werten handelt es sich um die SRT-Werte, die mit dem SRT-Pendel nach [TP Griff-StB (SRT)] auf den noch nicht untersuchten Fahrbahnabdrücken ermittelt wurden. Die Untersuchungsergebnisse mit den Wassertemperaturen von 20 °C und 25 °C befinden sich im Anhang X.

| Abdruck | MPD [mm] | SRT [-] | μ_{20} [-] | μ_{40} [-] | μ_{60} [-] | μ_{80} [-] | μ_{100} [-] | Steigung [(km/h)-1] |
|-----------|-------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 4H | 0,67 | 60 | 0,834 | 0,679 | 0,537 | 0,442 | 0,356 | -0,0059 |
| 5H | 1,57 | 53 | 0,886 | 0,739 | 0,656 | 0,565 | 0,538 | -0,0044 |
| 6H | 0,33 | 52 | 0,649 | 0,501 | 0,224 | 0,199 | 0,184 | -0,0076 |
| 7H | 0,37 | 61 | 0,976 | 0,792 | 0,617 | 0,474 | 0,331 | -0,0079 |
| 10H | 1,13 | 66 | 0,971 | 0,825 | 0,706 | 0,621 | 0,535 | -0,0051 |
| 11H | 0,47 | 58 | 0,977 | 0,806 | 0,631 | 0,510 | 0,397 | -0,0074 |
| 14H | 0,71 | 57 | 0,822 | 0,672 | 0,546 | 0,375 | 0,300 | -0,0074 |
| 21H | 1,13 | 52 | 0,790 | 0,625 | 0,506 | 0,390 | 0,313 | -0,0059 |
| 29H | 0,94 | 71 | 0,866 | 0,765 | 0,694 | 0,588 | 0,526 | -0,0044 |
| 30H | 0,84 | 65 | 0,928 | 0,772 | 0,644 | 0,553 | 0,453 | -0,0055 |
| 32H | 1,34 | 60 | 0,905 | 0,726 | 0,626 | 0,523 | 0,491 | -0,0051 |
| 40H | 0,88 | 74 | 0,837 | 0,667 | 0,541 | 0,393 | 0,342 | -0,0068 |
| 41H | 0,37 | 64 | 0,987 | 0,798 | 0,656 | 0,534 | 0,416 | -0,0066 |
| 42H | 0,79 | 64 | 0,997 | 0,844 | 0,698 | 0,591 | 0,458 | -0,0063 |
| 43H | 0,86 | 53 | 0,941 | 0,754 | 0,609 | 0,501 | 0,395 | -0,0063 |
| 50H | 0,92 | 56 | 0,900 | 0,740 | 0,621 | 0,525 | 0,450 | -0,0054 |
| 51H | 0,38 | 60 | 0,891 | 0,717 | 0,562 | 0,407 | 0,285 | -0,0078 |
| 52H | 0,33 | 54 | 0,819 | 0,606 | 0,431 | 0,280 | 0,215 | -0,0082 |
| 53H | 0,77 | 59 | 0,881 | 0,754 | 0,634 | 0,548 | 0,490 | -0,0051 |
| 54H | 0,56 | 62 | 0,876 | 0,705 | 0,586 | 0,487 | 0,424 | -0,0054 |

Tab. 10: Ermittelte Griffigkeitswerte und Steigungen der realen Fahrbahntexturen bei 15 °C Wassertemperatur

Auf die Auswertung der SRT_{GAT} -Werte wurde innerhalb dieses Projektes verzichtet, da bei der überwiegenden Mehrheit der SKM_{GAT} -Messungen die Messwerte des ersten und zweiten Versuchsdurchlaufes jeder Messgeschwindigkeit sehr gut übereinstimmen. Daraus wurde geschlossen, dass die Veränderungen der Fahrbahnoberflächen während der Versuche vernachlässigt werden können.

In Bild 93 sind die in Tabelle 10 angeführten Griffigkeitswerte über der Geschwindigkeit aufgetragen. Hierin markiert jedes „x“ den Mittelwert der Griffigkeit der beiden Versuchsdurchläufe.

Es ist zu erkennen, dass alle untersuchten realen Fahrbahntexturen eine relativ hohe Griffigkeit (von $\mu_{SKM,GAT} = 0,8$ bis 1,0) bei geringen Geschwindigkeiten (20 km/h) aufweisen. Dieses einheitlich hohe Niveau war vor Versuchsbeginn nicht zu erwarten, da die untersuchten Fahrbahntexturen SRT-Werte zwischen 50 (relativ niedrig) und 75 (sehr hoch) aufweisen (Bild 59). Weiterhin ist zu erkennen, dass bei der Messgeschwindigkeit von 20 km/h eine kleinere Spreizung als bei der Messgeschwindigkeit von 100 km/h vorliegt (Faktor ca. 1,5). Dies deutet darauf hin, dass die untersuchten Proben unterschiedliche Geschwindigkeitsabhängigkeiten aufweisen.

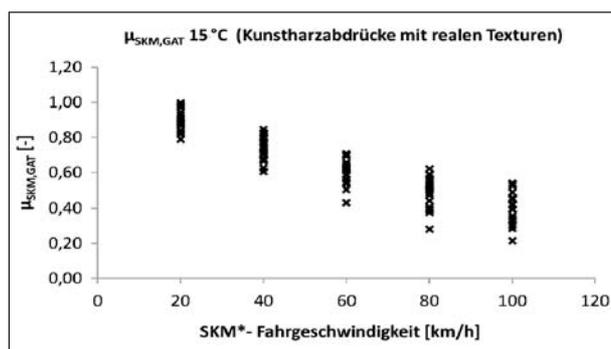


Bild 93: Ermittelte Griffigkeitswerte auf realen Fahrbahntexturen bei 15 °C Wassertemperatur

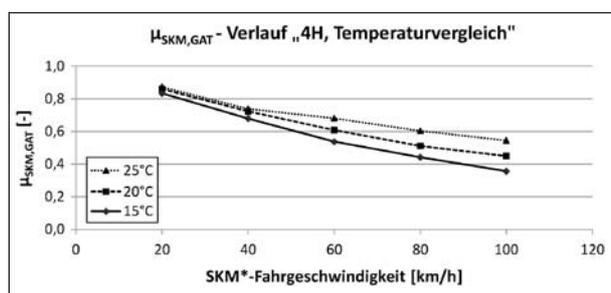


Bild 94: Einfluss der Wassertemperatur auf die Griffigkeit bei Griffigkeitsmessungen auf realen Fahrbahntexturen

In Bild 94 ist der Verlauf der Griffigkeit über der Geschwindigkeit für unterschiedliche Wassertemperaturen aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass die Griffigkeitswerte bei 20 km/h Messgeschwindigkeit annähernd identisch sind und der Abfall der Griffigkeit zu hohen Geschwindigkeiten mit steigender Wassertemperatur weniger stark ausgeprägt ist. Die Griffigkeitswerte bei höheren Wassertemperaturen liegen somit bei hohen Geschwindigkeiten über den Griffigkeiten bei niedrigeren Temperaturen. Dieser Temperatureffekt kann bei allen am GAT untersuchten Fahrbahnproben beobachtet werden. Der Temperatureinfluss war so nicht zu erwarten, da sich sinkende Wassertemperaturen bei SKM-Straßenmessungen nach [TP Griff-StB (SKM)] in steigenden Griffigkeitswerten äußern.

Der umgekehrte Temperatureffekt könnte dadurch begründet sein, dass am GAT ein Gummigleitkörper und kein abrollendes Messrad untersucht wird. Beim Gummigleitkörper ist die Kontaktzeit bei Griffigkeitsversuchen im Vergleich zum SKM-Messreifen bei Straßenversuchen erheblich länger. Dadurch könnten sich Temperatureffekte ergeben, welche den hier beobachteten Trend verursachen. Weiterhin wäre denkbar, dass das verwendete Probenmaterial (Kunstharz mit Korund) den beobach-

teten Temperatureffekt verursacht. Durch die Verwendung des Kunstharzes wurde die Oberflächenchemie im Vergleich zu den Originalfahrbahnmaterialien grundlegend geändert.

Innerhalb dieses Forschungsvorhabens konnte der Temperatureinfluss des Wassers am GAT nicht abschließend untersucht werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Einfluss der Wassertemperatur nicht weiter betrachtet. Die Auswertung der Griffigkeitsversuche wird auf die Wassertemperatur von 15 °C beschränkt.

8.1.4 Versuchsergebnisse der Griffigkeitsversuche auf künstlichen Fahrbahntexturen

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der Griffigkeitsversuche auf den Kunstharzabdrücken mit künstlichen Fahrbahntexturen (Kugeloberflächen) vorgestellt. Diese Versuche wurden aus Zeitgründen nur auf vier unterschiedlichen künstlichen Texturen durchgeführt. Die untersuchten Fahrbahnproben weisen alle eine ähnliche Mikrotextur, aber sehr unterschiedliche Makrotexturen auf (Vergleiche MPD-Werte in Tabelle 11).

Die Griffigkeitsversuche wurden analog zu den realen Fahrbahntexturen ebenfalls an Kunstharzabdrücken durchgeführt (Kapitel 8.1.3). In Tabelle 11 sind die ermittelten Griffigkeitswerte sowie die berechneten Steigungen der Griffigkeitswerte über der Geschwindigkeit bei 15 °C Wassertemperatur aufgeführt. Die Untersuchungsergebnisse mit den Wassertemperaturen von 20 °C und 25 °C befinden sich im Anhang X.

In Bild 95 sind die in Tabelle 11 dargestellten Griffigkeitswerte über der Geschwindigkeit aufgetragen.

| Abdruck | MPD [mm] | SRT [-] | μ_{20} [-] | μ_{40} [-] | μ_{60} [-] | μ_{80} [-] | μ_{100} [-] | Steigung [(km/h)-1] |
|---------|----------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------------|
| 112H | 0,91 | 83 | 1,011 | 0,933 | 0,825 | 0,775 | 0,710 | -0,0040 |
| 114H | 1,23 | 83 | 1,002 | 0,949 | 0,854 | 0,809 | 0,742 | -0,0035 |
| 115H | 1,51 | 83 | 1,012 | 0,979 | 0,853 | 0,794 | 0,752 | -0,0046 |
| 116H | 0,12 | 62 | 1,142 | 0,966 | 0,779 | 0,656 | 0,443 | -0,0077 |

Tab. 11: Ermittelte Griffigkeitswerte & Steigungen der künstlichen Fahrbahntexturen bei 15 °C Wassertemperatur

Wie bereits in Bild 93 ist auch in Bild 95 das einheitlich sehr hohe Griffigkeitsniveau bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten zu erkennen. Dies konnte analog zu den realen Fahrbahntexturen nicht durch die SRT-Werte der Fahrbahnoberflächen erklärt werden, da hier beispielsweise die Probe 116H, die den niedrigsten SRT-Wert zeigt, den höchsten Griffigkeitswert bei niedrigen Geschwindigkeiten (20 km/h) aufweist.

In Bild 96 ist der Verlauf der Griffigkeit über der Geschwindigkeit für unterschiedliche Wassertemperaturen aufgetragen.

Auch hier ist zu erkennen, dass sich der Einfluss der Wassertemperatur auf die Griffigkeit nicht wie erwartet auswirkt, da auch in diesem Fall eine abnehmende Griffigkeit bei sinkender Temperatur festgestellt wurde. Ein Vergleich der Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Kunstharzabdrücke mit realen und künstlichen Texturen kann hier nicht direkt durchgeführt werden, da die hier untersuchten Fahrbahnproben zwar ähnliche MPD-Werte, gleichzeitig jedoch sehr unterschiedliche SRT-Werte aufzeigen.

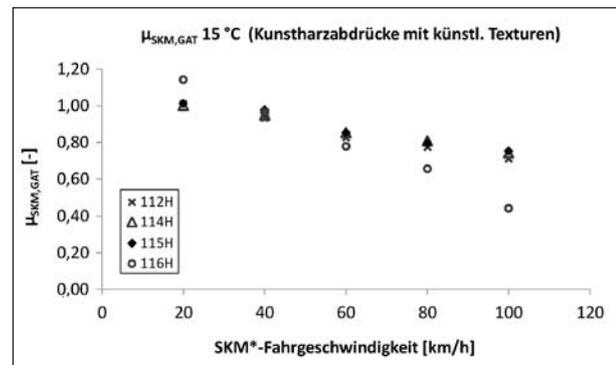


Bild 95: Ermittelte Griffigkeitswerte auf künstlichen Fahrbahntexturen bei 15 °C Wassertemperatur

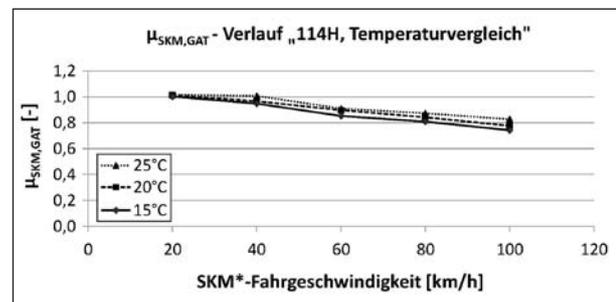


Bild 96: Einfluss der Wassertemperatur auf die Griffigkeit bei Griffigkeitsmessungen auf künstlichen Fahrbahntexturen

8.1.5 Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit und der Fahrbahngrobtexur

Um einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit und der Fahrbahngrobtexur herzustellen, wurden die Steigungen der Griffigkeitswerte über der Geschwindigkeit den ermittelten Texturkenngrößen (Kapitel 5.4) gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass bei einer einfach linearen Regression der MPD-Wert die beste Korrelation mit der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit aufweist. Der Ansatz der zweifach linearen Regression brachte keine merkliche Verbesserung.

Die Erwartung, dass die flächenhaften Oberflächenkennwerte, welche ebenfalls die mittlere Texturtiefe charakterisieren, besser als die 2D-Oberflächenkennwerte (MPD, ETD) mit der Geschwindigkeitsabhängigkeit korrelieren, konnte nicht bestätigt werden. Ein möglicher Grund hierfür könnte der Umstand sein, dass die Messstellen der flächenhaften Vermessung vermutlich zu klein (25 x 25 mm) gewählt wurden und deshalb die flächenhaften Oberflächenkennwerte zu großen Streuungen unterliegen und damit nicht repräsentativ für die gesamte Probenoberfläche sind.

Im Folgenden wird daher nur noch die Korrelation des MPD-Wertes mit der Geschwindigkeitsabhängigkeit weiter betrachtet.

In Bild 97 ist der Zusammenhang der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit mit dem MPD-Wert auf realen Fahrbahntexturen veranschaulicht.

Die in Bild 97 abgebildete Regressionsgerade bezieht sich nicht auf alle 20, sondern nur auf 19 Fahrbahntexturen, da die Fahrbahnprobe 6 aufgrund des ungleichmäßigen Griffigkeitsverlaufes nicht berücksichtigt wurde.

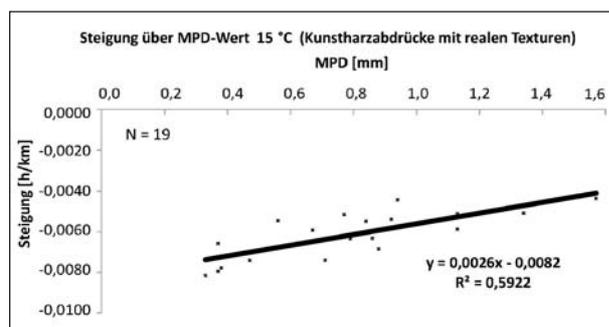


Bild 97: Zusammenhang der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit (Steigung) mit dem MPD-Wert auf realen Fahrbahntexturen (tabellarische Daten im Anhang X)

Der Verlauf der Regressionsgeraden bestätigt tendenziell den von [SCHULZE, 79] gezeigten Einfluss der Makrotextur auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Griffigkeitswertes. Mit steigendem MPD-Wert (d. h. mit steigender Ausprägung der Makrotextur) sinkt die Steigung der Griffigkeit über der Geschwindigkeit (betragsmäßig betrachtet) immer weiter ab. Da die verfügbaren Fahrbahnproben jedoch alle ein hohes Griffigkeitsniveau bei niedrigen Geschwindigkeiten aufweisen, kann das in Bild 12 gezeigte Schaubild bisher nur in den Bereichen c, d und e bestätigt werden. Die Bereiche c, d und e stehen für die Kombinationen aus stark ausgeprägter Oberflächenschärfe (Mikrorauheit) und unterschiedlichen Ausprägungen der Drainagewirkung (Makrotextur) der Oberflächen.

Nach den hier durchgeführten und ausgewerteten Untersuchungen am GAT kann die Korrekturformel (2) um den Einfluss der Makrorauheit auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Griffigkeitswertes erweitert werden, indem der Einfluss der Makrorauheit durch den MPD-Wert beschrieben wird. Beim Aufstellen der Korrekturformel muss darauf geachtet werden, dass die aus Bild 97 entnommene Steigung vorzeichenrichtig, d. h. mit umgekehrtem Vorzeichen, in die Gleichung eingefügt wird, da ansonsten der ermittelte Einfluss der Makrotextur nicht korrigiert, sondern verstärkt wird. Um die ermittelte Korrekturformel mit der in der [TP Griff-StB (SKM)] gegebenen Korrekturformel vergleichen zu können, wurde die Geschwindigkeitskorrekturformel auf die Geschwindigkeitsänderung von 20 km/h bezogen.

$$m_{v,GAT} = m_{GAT} + \frac{(v_{ist} - v_{soll})}{1 \frac{km}{h}} \cdot \left(0,0082 - 0,0026 \frac{1}{mm} \cdot MPD \right)$$

$$\Downarrow$$

$$m_{v,GAT} = m_{GAT} + \frac{(v_{ist} - v_{soll})}{20 \frac{km}{h}} \cdot \left(0,164 - 0,052 \frac{1}{mm} \cdot MPD \right) \quad (11)$$

$m_{v,GAT}$ = normierter, auf Sollmessgeschwindigkeit umgerechneter SKM_{GAT} -Griffigkeitswert [-]

m_{GAT} = Messwert (Ablesewert $\mu_{SKM,GAT}$) [-]

v_{ist} = mittlere Messgeschwindigkeit [km/h]

v_{soll} = Soll-Messgeschwindigkeit [km/h]

MPD = mittlere Profiltiefe (Mean Profile Depth) [mm]

Über (11) kann nun die Geschwindigkeitskorrektur am GAT bei einer Wassertemperatur von 15 °C

durchgeführt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 (Kunstharzabdrücke mit realen Texturen, Bild 97) nur einen Wert von 0,592 aufweist und damit die berechneten Ergebnisse großen Streuungen unterliegen können. Weiterhin ist die Gültigkeit der angegebenen Formel nur für Fahrbahnproben aus Kunstharz, die eine hohe Griffigkeit bei kleinen Geschwindigkeiten aufweisen, nachgewiesen.

In (12) ist die für die SKM-Straßenmessungen übertragene Formel (aus (11)) angegeben.

$$m_v = m + \frac{(v_{ist} - v_{soll})}{20 \frac{km}{h}} \cdot (0,164 - 0,052 \frac{1}{mm} \cdot MPD) \quad (12)$$

m_v = normierter, auf Sollmessgeschwindigkeit umgerechneter SKM-Griffigkeitswert im 1-m-Abschnitt [-]

m = Messwert (Ablesewert μ_y incl. gerätespezifischem Korrekturfaktor) [-]

v_{ist} = mittlere Messgeschwindigkeit [km/h]

v_{soll} = Soll-Messgeschwindigkeit [km/h]

MPD = mittlere Profiltiefe (Mean Profile Depth) [mm]

Die Anwendbarkeit dieser Formel muss jedoch noch mit SKM-Straßenmessungen nach [TP Griff-StB (SKM)] überprüft und nachgewiesen werden. Dieser Nachweis erfolgt in Kapitel 8.3, allerdings nur anhand der SKM-Messdaten eines 5 km langen Streckenabschnitts (A 24). Für (12) gelten dieselben Einschränkungen wie für (11). Weiterhin muss beachtet werden, dass beim SKM-Messsystem die Fahrbahncharakterisierung mit einem abrollenden Messreifen und nicht mit einem Gummigleitkörper erfolgt.

In Bild 98 ist der Zusammenhang der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit mit dem MPD-Wert

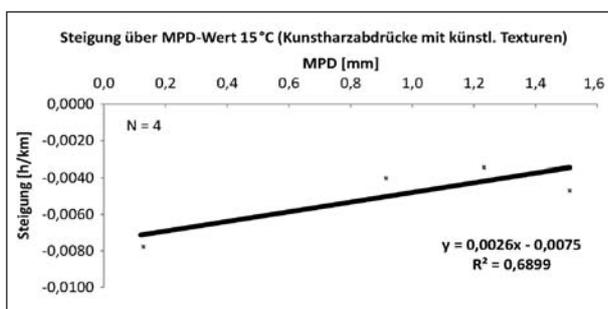


Bild 98: Zusammenhang der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit (Steigung) mit dem MPD-Wert auf Kunstharzabdrücken mit künstlichen Texturen (tabellarische Daten im Anhang X)

auf Kunstharzabdrücken mit künstlichen Texturen veranschaulicht.

Es ist zu erkennen, dass die identische Steigung der Regressionsgeraden wie in Bild 97 vorliegt. Der Stichprobenumfang ist mit $N = 4$ jedoch so gering, dass keine fundierten Aussagen getroffen werden können. Aus diesem Grund wird hieraus keine Korrekturformel bestimmt. Durch die Erhöhung des Stichprobenumfangs der künstlichen Fahrbahnproben ist es wahrscheinlich möglich, eine Regressionsgerade mit einem besseren Bestimmtheitsmaß als bei realen Fahrbahn Texturen zu erzielen, da die künstlichen Fahrbahnproben gleichmäßigere (homogene) Texturen aufweisen.

8.2 Griffigkeitsmessungen am Innentrommelprüfstand (IPS)

In diesem Unterkapitel werden die Griffigkeitsversuche, die am Innentrommelprüfstand durchgeführt wurden, vorgestellt. Mit diesen Untersuchungen soll die Übertragbarkeit der am GAT ermittelten Untersuchungsergebnisse auf Messergebnisse mit dem realen SKM-Messreifen auf realen Fahrbahnbelägen beurteilt werden.

8.2.1 Versuchsplan

In Tabelle 12 ist der Versuchsplan für die am IPS durchgeführten Griffigkeitsversuche exemplarisch für die Wassertemperatur von 15 °C abgebildet.

| Messung | Reifen | v [km/h] | Wasserfilmdicke [mm] | T _{wasser} [°C] | Anpresskraft [N] | Schräglaufwinkel [°] |
|---------|--------|----------|----------------------|--------------------------|------------------|----------------------|
| 1 | SKM | 20 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 2 | SKM | 80 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 3 | SKM | 40 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 4 | SKM | 100 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 5 | SKM | 60 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 6 | SKM | 20 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 7 | SKM | 80 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 8 | SKM | 40 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 9 | SKM | 100 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |
| 10 | SKM | 60 | 0,5 | 15 | 1.960 | 0..20 |

Tab. 12: Versuchsplan für die Griffigkeitsversuche am Innentrommelprüfstand

Die Griffigkeitsversuche wurden auf Asphalt, Beton und Safety Walk durchgeführt. Dabei wurde auch der Einfluss unterschiedlicher Wassertemperaturen (8, 15, 20 und 25 °C) untersucht.

Die Mikrotextur der Fahrbahnoberfläche wurde regelmäßig mittels SRT-Pendels charakterisiert, um jeder SKM-Griffigkeitsmessung einen SRT-Wert zuzuordnen zu können. Auf die detaillierte Darstellung dieser Ergebnisse wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

8.2.2 Versuchsdurchführung

Zu Versuchsbeginn wurde die Innentrommel (Fahrbahnbelag) des Prüfstandes bei abgehobenem Messrad auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt. Danach wurde die benötigte Wasserfilmhöhe mit definierter Wassertemperatur auf die Fahrbahn aufgebracht. Nach dem Einstellen des Wasserfilms wurde das SKM-Messrad mit der vorgeschriebenen Anpresskraft und dem Schräglaufwinkel von 0° von oben gegen die Fahrbahn gepresst. Nach dem Start der Messwertaufzeichnung rollt das Messrad 5 s bei dem Schräglaufwinkel von 0° geradeaus. Danach wurde der Schräglaufwinkel innerhalb 10 s von 0° auf 20° verstellt. Diese Position wurde dann für 60 s gehalten, bevor der Schräglaufwinkel wieder innerhalb 10 s auf 0° zurückgestellt wurde. Nach 5 s Geradeausfahrt wurde das Messrad von der Fahrbahn abgehoben und die Messung war beendet.

8.2.3 Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden exemplarisch die Messergebnisse des Asphaltbelages bei einer Wassertemperatur von 15 °C und 20 km/h Messgeschwindigkeit vorgestellt. Alle anderen Griffigkeitsmessungen wurden analog hierzu durchgeführt und ausgewertet.

In Bild 99 sind die Kraftverläufe sowie der daraus berechnete Reibbeiwert der SKM_{IPS}-Messung bei 15 °C Wassertemperatur und 20 km/h Geschwindigkeit auf dem Asphaltbelag dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass sich der Reibbeiwert ab der Messdauer von ca. 30 s bis ca. 75 s praktisch nicht ändert. Daraus kann geschlossen werden, dass der Messreifen nach kurzer Zeit seine Betriebstemperatur erreicht hat und gleichbleibende Griffigkeitswerte liefert. Für die weitere Betrachtung wird der Mittelwert (arithmetischer Mittelwert) des

Reibbeiwertes von der Messdauer 60 s bis 70 s gebildet.

In Bild 100 ist die Auswertung der Mittelwerte exemplarisch für den Asphaltbelag bei einer Wassertemperatur von 15 °C veranschaulicht.

Als Maß für die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit wird, wie bereits im Kapitel 8.1, die Steigung der Geraden zwischen dem 40km/h- und dem 80km/h-Griffigkeitswert herangezogen. Die Bestimmung verläuft analog zum Kapitel 8.1.

In Tabelle 13 sind die ermittelten Griffigkeitswerte sowie die berechneten Steigungen der Griffigkeitswerte über der Geschwindigkeit bei 15 °C Wassertemperatur dargestellt.

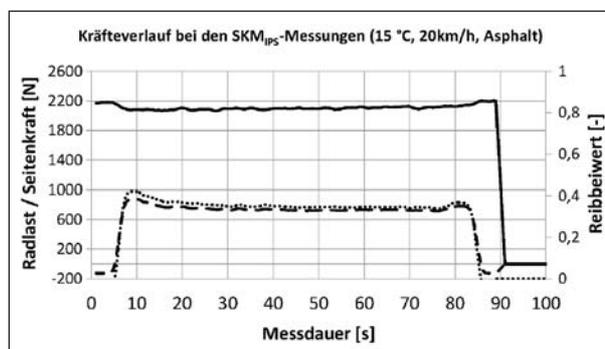


Bild 99: Kraftverläufe der SKM_{IPS}-Messung bei 15 °C Wassertemperatur und 20 km/h Geschwindigkeit auf dem Asphaltbelag

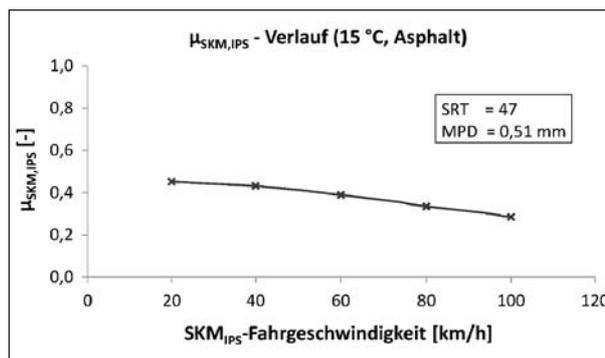


Bild 100: SKM_{IPS}-Griffigkeitsverlauf über der Fahrgeschwindigkeit

| Abdruck | MPD [mm] | SRT [-] | μ ₂₀ [-] | μ ₄₀ [-] | μ ₆₀ [-] | μ ₈₀ [-] | μ ₁₀₀ [-] | Steigung [(km/h)-1] |
|-------------|----------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Asphalt | 0,51 | 47 | 0,452 | 0,432 | 0,389 | 0,334 | 0,285 | -0,0024 |
| Beton | 0,53 | 43 | 0,419 | 0,394 | 0,307 | 0,252 | 0,214 | -0,0036 |
| Safety Walk | 0,21 | 58 | 1,022 | 0,671 | 0,450 | 0,312 | 0,112 | -0,0090 |

Tab. 13: Ermittelte Griffigkeitswerte & Steigungen der verwendeten IPS-Fahrbahnbeläge bei 15 °C Wassertemperatur

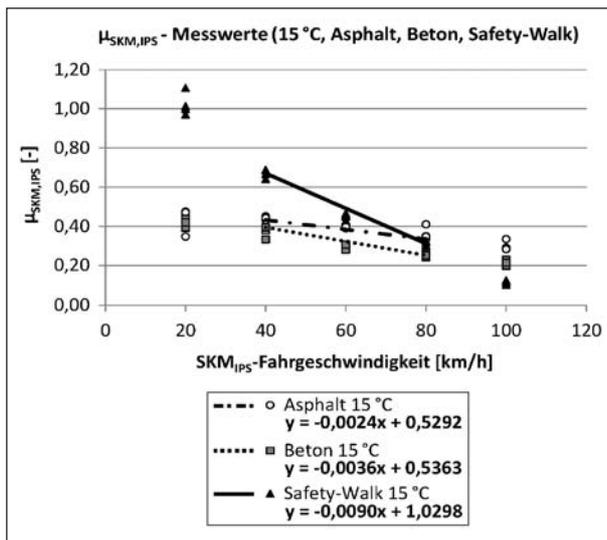


Bild 101: Ermittelte Griffigkeitswerte auf den IPS-Fahrbelägen bei 15 °C Wassertemperatur

In Bild 101 sind die in Tabelle 13 angeführten Griffigkeitswerte über der Geschwindigkeit abgebildet. Die Untersuchungsergebnisse mit allen untersuchten Wassertemperaturen befinden sich im Anhang XI.

Es ist zu erkennen, dass die Griffigkeitsergebnisse des Asphaltbelages und des Betonbelages relativ nahe beieinander liegen. Der Safety Walk weist im Vergleich hierzu eine viel höhere Griffigkeit bei niedrigen Geschwindigkeiten auf. Die berechneten Steigungen des Asphaltbelages sowie des Betonbelages liegen relativ nah an der Steigung, wie sie bei der bisherigen Geschwindigkeitskorrektur [TP Griff-StB (SKM)] Verwendung findet (0,05/ (20 km/h)). Der Steigungswert des Safety-Walk-Belags weicht hiervon sehr stark ab.

Deshalb ist die bisherige Geschwindigkeitskorrektur auf diesem Belag nicht anwendbar. Dies lässt sich dadurch begründen, dass der Safety-Walk-Belag nahezu keine Makrotextur (MPD = 0,21 mm) aufweist. Beim Vergleich der Steigungswerte des Asphalt- und des Betonbelags fällt die Steigung des Betonbelags betragsmäßig höher (ca. 33 %) aus. Dies war nach dem in Bild 12 gezeigten Zusammenhang nicht zu erwarten, da der Betonbelag einen etwas größeren MPD-Wert (etwas stärker ausgeprägte Makrotextur) bei gleichzeitig niedrigerem SRT-Wert (weniger ausgeprägte Oberflächenschärfe) als der Asphaltbelag aufweist. Dies könnte möglicherweise durch den Materialeinfluss der beiden Fahrbeläge erklärt werden. Eine weitere Erklärung könnte die Charakterisierung der Makro- bzw. Mikrotextur durch den MPD- bzw. den SRT-

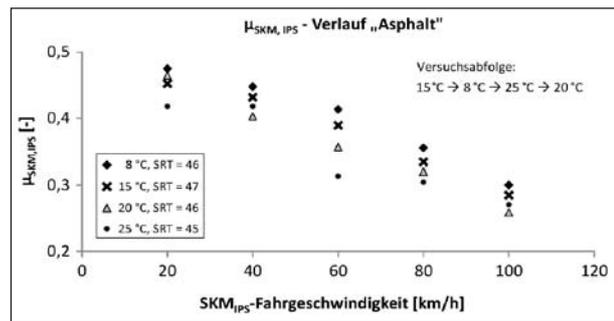


Bild 102: Einfluss der Wassertemperatur auf die Griffigkeit bei Griffigkeitsmessungen auf den IPS-Fahrbelägen

Wert darstellen. Es ist denkbar, dass der MPD- bzw. der SRT-Wert nicht alle notwendigen Textur-einflüsse im Hinblick auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit, zumindest für manche Fahrbelagtexturen, genau genug beschreibt.

In Bild 102 ist der Verlauf der Griffigkeit über der Geschwindigkeit für unterschiedliche Wassertemperaturen auf dem Asphaltbelag aufgetragen.

Die Achsenskalierung wurde so angepasst, dass der Temperatureinfluss gut zu erkennen ist.

Das Bild zeigt, dass sich der Einfluss der Wassertemperaturen von 8, 15 und 20 °C auf die Griffigkeitswerte bei 40, 60 und 80 km/h wie erwartet auswirkt, d. h., mit steigender Temperatur fällt die Griffigkeit. Die Griffigkeitswerte bei der Wassertemperatur von 25 °C sind sehr ungleichmäßig und beeinflussen den Griffigkeitswert nicht bei allen Geschwindigkeiten (40 km/h und 100 km/h) wie erwartet. Dies könnte damit begründet werden, dass es sich bei den dargestellten Messungen um Einzelmessungen handelt und diese dadurch nicht statistisch abgesichert sind. Bei den beiden anderen untersuchten Fahrbelägen (Beton und Safety Walk) kann der Temperatureinfluss nicht so deutlich erkannt werden. Die zugehörigen Diagramme befinden sich im Anhang XII.

In einem nächsten Schritt wurde überprüft, ob die derzeit verwendete Temperaturkorrekturformel für die hier untersuchten Fahrbeläge plausible Ergebnisse liefert. In Bild 103 sind die temperaturabhängigen Griffigkeitswerte beispielsweise für den Asphaltbelag abgebildet.

Im rechten Bereich des Diagramms sind die Regressionsgeraden für jede einzelne Fahrgeschwindigkeit (20, 40, 60, 80 und 100 km/h) angegeben. Durch Mittelwertbildung aller berechneten Steigungen (Bild 103) ergibt sich eine mittlere Steigung

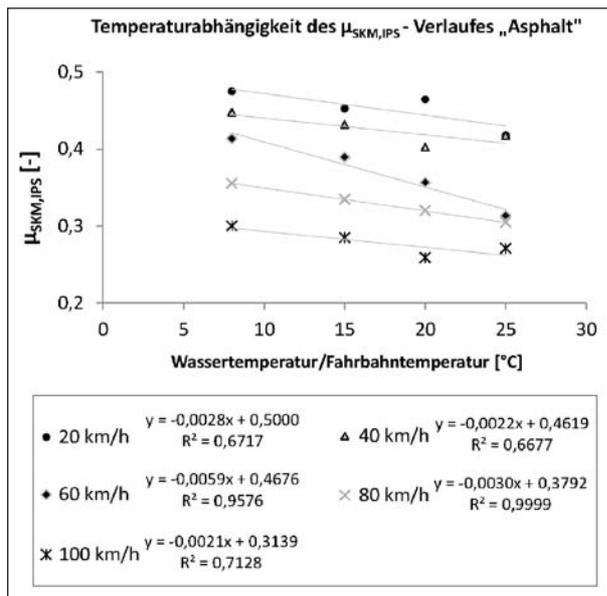


Bild 103: Einfluss der Wassertemperatur auf die Griffigkeit bei Griffigkeitsmessungen auf den IPS-Fahrbahnbelägen

(Temperaturabhängigkeit) von $0,0032 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Die etwas größere Steigung der 60km/h-Kurve konnte innerhalb dieses Projektes nicht genauer erklärt werden.

Um diese ermittelte Steigung mit der in den Prüfvorschriften [TP Griff-StB (SKM)] angegebenen Temperaturkorrekturformel vergleichen zu können, muss die Korrekturformel (3) für die vorliegenden Versuchsbedingungen umformuliert werden. Hierfür wird lediglich die Wassertemperatur mit der Fahrbahntemperatur gleichgesetzt, da diese beiden Temperaturen bei den Prüfstandsversuchen am IPS identisch waren.

Daraus ergibt sich die aus [TP Griff-StB (SKM)] für den Innentrommelprüfstand umformulierte Temperaturkorrekturformel (13).

$$m_{v,T,IPS} = m_{v,IPS} + (T_{W,F} - 20^\circ\text{C}) \cdot \frac{0,0032}{^\circ\text{C}} \quad (13)$$

$m_{v,T,IPS}$ = normierter, auf Soll-Messgeschwindigkeit umgerechneter und Temperatur korrigierter SKM_{IPS} -Griffigkeitswert [-]

$m_{v,IPS}$ = normierter, auf Soll-Messgeschwindigkeit umgerechneter SKM_{IPS} -Griffigkeitswert [-]

$T_{W,F}$ = Wassertemperatur bzw. Fahrbahntemperatur [$^\circ\text{C}$]

Die aus den SKM_{IPS} -Griffigkeitsversuchen mit der Asphaltfahrbahn ermittelte mittlere Steigung

($0,0032 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) stimmt mit der in (13) angegebenen Steigung überein. Daraus folgt, dass die Temperaturkorrekturformel aus [TP Griff-StB (SKM)] für die hier untersuchte Asphaltfahrbahn direkt anwendbar ist.

Aus den Griffigkeitsversuchen auf der Betonfahrbahn ergab sich eine Steigung von $0,00396 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ und aus den Versuchen auf dem Safety Walk eine Steigung von $0,0046 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Die zugehörigen Diagramme befinden sich im Anhang XII. Hieraus könnte geschlossen werden, dass die Temperaturabhängigkeit des Griffigkeitswertes ebenso wie die Geschwindigkeitsabhängigkeit texturabhängig und/oder materialabhängig ist.

Von den drei untersuchten Fahrbahntexturen wiesen zwei Fahrbahnbeläge nahezu gleiche MPD-Werte und der dritte Belag, einen in Bezug zur Praxis, sehr geringen MPD-Wert auf. Aus diesem Grund wird darauf verzichtet, ein Zusammenhang zwischen der Fahrbahntextur und der Geschwindigkeitsabhängigkeit sowie der Temperaturabhängigkeit herzustellen.

Aus den Griffigkeitsversuchen am Innentrommelprüfstand können die folgenden Schlüsse gezogen werden: Mit dem untersuchten Asphaltbelag werden die in [TP Griff-StB (SKM)] gegebenen Korrekturformeln für die Geschwindigkeit und die Temperatur bestätigt. Die Versuchsergebnisse des Betonbelags weichen leicht, die Ergebnisse des Safety-Walk-Belags stark von den gegebenen Korrekturformeln ab. Die Korrektur der Geschwindigkeit sowie der Temperatur sollte aus diesem Grund texturabhängig und ggf. materialabhängig erfolgen.

9 Griffigkeitsmessungen mit einem realen SKM-System

In diesem Kapitel werden Daten von SKM-Straßenmessungen (Bundesautobahn A 24) ausgewertet, welche durch die Fa. IWS-Messtechnik, Celle, für die Projektbearbeitung zur Verfügung gestellt wurden.

Bei diesen Messungen wurde der untersuchte Streckenabschnitt (5 km Länge) mit unterschiedlichen Messgeschwindigkeiten (40, 60, 80 und 100 km/h) vermessen. Zusätzlich zu den SKM-Messdaten wurden Texturdaten (MPD-Wert) der Fahrbahnoberfläche mit einer am SKM-Messfahrzeug angebrachten Textursonde aufgezeichnet.

Außer dem gemessenen und aufgezeichneten MPD-Verlauf liegen keine weiteren Daten zur Charakterisierung der Fahrbahn vor.

Ergebnisse der SKM-Messungen

Die Auswertung der Daten beschränkt sich auf die Messgeschwindigkeiten 40, 60 und 80 km/h, da SKM-Straßenmessungen nach [TP Griff-StB (SKM)] nur mit diesen Messgeschwindigkeiten durchgeführt werden. In Bild 104 sind der gleitende Mittelwert als 1-m-Wert über eine Abschnittslänge von je 100 m des SKM-Griffigkeitswertes bei 40, 60 und 80 km/h Messgeschwindigkeit und der Verlauf des gleitenden Mittelwertes als 1-m-Wert über eine Abschnittslänge von je 100 m des MPD-Wertes aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass der vermessene Streckenabschnitt MPD-Werte von 0,72 mm bis 1,47 mm aufweist. Beim Vergleich der Griffigkeitswerte bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist zu erkennen, dass, wie zu erwarten, die Griffigkeitswerte zu den höheren Geschwindigkeiten abfallen. Die Griffigkeitswerte reichen auf dem vermessenen Streckenabschnitt bei den verschiedenen Messgeschwindigkeiten von

- $\mu_{40,min} = 0,595$ bis $\mu_{40,max} = 0,731$,
- $\mu_{60,min} = 0,521$ bis $\mu_{60,max} = 0,684$,
- $\mu_{80,min} = 0,464$ bis $\mu_{80,max} = 0,649$.

In Bild 105 sind die Spannweiten der ermittelten Griffigkeitswerte aufgetragen.

Es handelt sich um insgesamt 4.901 Messwerte (gleitende Mittelwerte über 100 m). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird daher darauf verzichtet, die Messwerte in Tabellenform anzugeben.

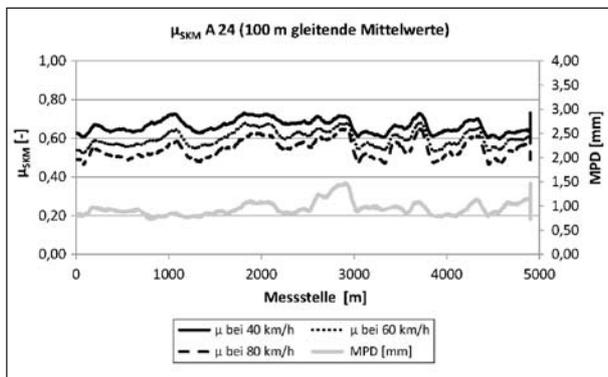


Bild 104: Verlauf des SKM-Griffigkeitswertes bei den Messgeschwindigkeiten 40, 60 und 80 km/h und des MPD-Wertes auf einem 5 km langen Streckenabschnitt auf der Bundesautobahn A 24

In Bild 107 ist der Zusammenhang der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit mit dem MPD-Wert von SKM-Straßenmessungen abgebildet. Bei der Bestimmung der Steigung wurde für jeden 1-m-Wert (gleitende Mittelwerte über 100-m-Abschnitte) wie in Bild 106 (Griffigkeitsmessung am GAT) veranschaulicht vorgegangen.

Zuerst wurden die 4.901 1-m-Werte sowohl für die Geschwindigkeiten 40 und 80 km/h bestimmt. Diese beiden Werte wurden durch eine Gerade verbunden und deren Steigung als Maß für die Geschwindigkeitsabhängigkeit verwendet.

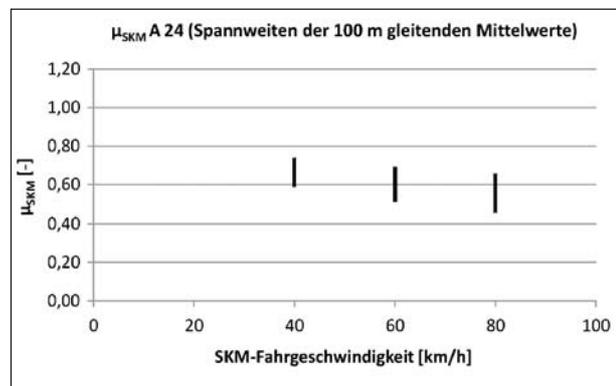


Bild 105: Ermittelte Griffigkeitswerte bei SKM-Straßenmessungen (Bundesautobahn A 24)

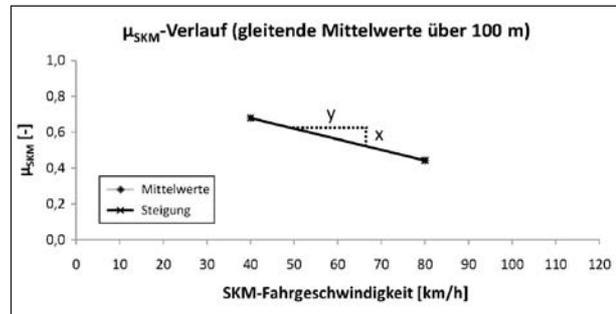


Bild 106: Bestimmung der Steigung des Griffigkeitsverlaufes über der Messgeschwindigkeit

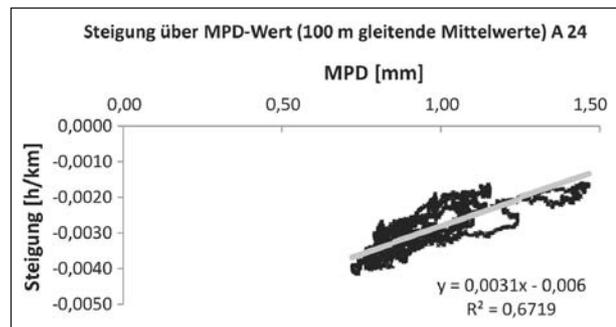


Bild 107: Zusammenhang der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit (Steigung) mit dem MPD-Wert bei Daten aus SKM-Straßenmessungen

Der Verlauf der Regressionsgeraden in Bild 107 bestätigt, ebenso wie die Regressionsgerade in Bild 97, tendenziell den von [SCHULZE, 79] gezeigten Einfluss der Makrotextur auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Griffigkeitswertes.

Mit den hier ausgewerteten und vorgestellten Messergebnissen kann, ebenso wie mit den Griffigkeitsergebnissen vom GAT, eine Korrekturformel (14) aufgestellt werden, welche den Einfluss der Makrotextur auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Griffigkeitswertes berücksichtigt (Vorgehen analog zu Formel (11)).

$$m_v = m + \frac{(v_{\text{ist}} - v_{\text{soll}})}{20 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \cdot (0,120 - 0,062 \frac{1}{\text{mm}} \cdot \text{MPD}) \quad (14)$$

m_v = normierter, auf Sollmessgeschwindigkeit umgerechneter SKM-Griffigkeitswert im 1-m-Abschnitt [-]

m = Messwert (Ablesewert μ_y incl. gerätespezifischem Korrekturfaktor) [-]

v_{ist} = mittlere Messgeschwindigkeit [km/h]

v_{soll} = Soll-Messgeschwindigkeit [km/h]

MPD = mittlere Profiltiefe (Mean Profile Depth) [mm]

Diese Korrekturformel besitzt jedoch keine Allgemeingültigkeit, da die zugrunde liegenden Daten nicht alle Typen (Texturen und Fahrbahnzusammensetzungen) vorkommender Fahrbahnbeläge auf deutschen Bundesautobahnen und Bundesstraßen beinhalten. Um die allgemeine Gültigkeit zu überprüfen, sollten SKM-Griffigkeitsversuche auf den unterschiedlichsten Fahrbahntexturen durchgeführt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die zu vermessenden Fahrbahnen möglichst unterschiedliche Makro- und Mikrotexturausprägungen aufweisen. Das relativ niedrige Bestimmtheitsmaß (R^2) von 0,672 muss bei der Anwendung ebenfalls beachtet werden.

10 Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse verglichen, die am Griffigkeits- und Abriebprüfstand, am Innentrommelprüfstand und mit dem SKM-Messsystem nach [TP Griff-StB (SKM)] auf der Straße ermittelt wurden.

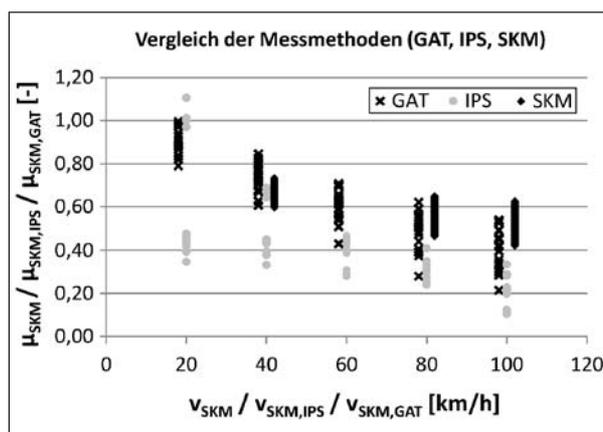


Bild 108: Ermittelte Griffigkeitswerte am GAT, am IPS und mit dem SKM-Messsystem auf der Straße

In Bild 108 sind die ermittelten Griffigkeitswerte der unterschiedlichen Messsysteme (GAT, IPS, SKM) abgebildet. Um die Messergebnisse der unterschiedlichen Messverfahren getrennt erkennen und miteinander vergleichen zu können, wurden die Messpunkte, die am GAT ermittelt wurden, im Diagramm (Geschwindigkeitsachse) leicht nach links und die Messpunkte, die mit einem realen SKM-Messfahrzeug nach [TP Griff-StB (SKM)] ermittelt wurden, leicht nach rechts versetzt eingetragen. Dies soll jedoch nicht bedeuten, dass diese Messungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt wurden, sondern lediglich der Übersichtlichkeit dienen.

Es ist zu erkennen, dass die Griffigkeitsergebnisse vom GAT größtenteils den Bereich der Griffigkeitsergebnisse der SKM-Straßenmessungen abdecken. Die Versuchsergebnisse vom Innentrommelprüfstand zeigen bei Messungen auf dem Asphalt- und Betonbelag deutlich geringere, auf dem Safety Walk jedoch höhere Werte. Daraus ist zu erkennen, dass am Innentrommelprüfstand je nach Fahrbahnbelag sehr unterschiedliche Griffigkeitswerte auftreten können. Weiterhin ist daraus ersichtlich, dass die am GAT und mit dem realen SKM-Messsystem vermessenen Fahrbahnoberflächen nicht repräsentativ für alle vorkommenden Straßenbeläge sind. Dies muss bei den daraus abgeleiteten Erkenntnissen beachtet werden.

Im Folgenden werden die Korrekturformeln verglichen, die aus den Messergebnissen der drei unterschiedlichen Messverfahren entwickelt wurden. Dabei werden nur die Formelteile betrachtet, mit welchen die Terme, die die auf die 20 km/h bezogene Geschwindigkeitsdifferenz enthalten, multipliziert werden (Bild 109 „fett gedruckt“). Die Gültig-

| | |
|--|-----------------------------|
| $m_v = m + \frac{(v_{ist} - v_{soil})}{20 \frac{km}{h}} = 0,05$ (MPD = ---) | [TP Griff-StB, SKM] |
| $m_v = m + \frac{(v_{ist} - v_{soil})}{20 \frac{km}{h}} = 0,0487$ (MPD = 0,51 mm) | Asphalt (IPS) |
| $m_v = m + \frac{(v_{ist} - v_{soil})}{20 \frac{km}{h}} = 0,0711$ (MPD = 0,53 mm) | Beton (IPS) |
| $m_v = m + \frac{(v_{ist} - v_{soil})}{20 \frac{km}{h}} = 0,1795$ (MPD = 0,21 mm) | Safetywalk (IPS) |
| $m_v = m + \frac{(v_{ist} - v_{soil})}{20 \frac{km}{h}} = (0,120 - 0,062 \frac{1}{mm} \cdot MPD)$ (MPD = 0,72 .. 1,47 mm) | SKM-Straßenmessungen (A 24) |
| $m_v = m + \frac{(v_{ist} - v_{soil})}{20 \frac{km}{h}} = (0,164 - 0,052 \frac{1}{mm} \cdot MPD)$ (MPD = 0,33 .. 1,57 mm) | Griffigkeitsmessungen (GAT) |

Bild 109: Vergleich der Korrekturformeln, verglichene Formelteile „fett gedruckt“

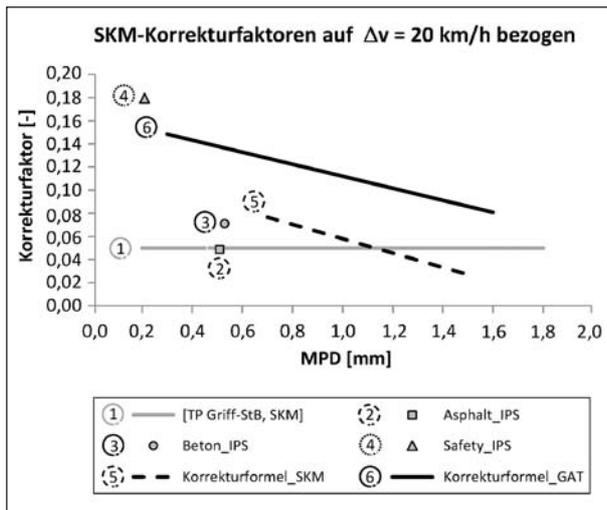


Bild 110: Auf 20 km/h bezogene Korrekturfaktoren

keit der Korrekturformeln ist bisher nur für die bei jeder Formel angegebenen MPD-Werte nachgewiesen.

In Bild 110 ist der Verlauf der Korrekturfaktoren über dem MPD-Wert aufgetragen.

Die Linie 1 zeigt den in den [TP Griff-StB (SKM)] vorgeschriebenen konstanten Wert für die Geschwindigkeitskorrektur des SKM-Griffigkeitswertes. Die Markierungspunkte 2 bis 4 zeigen die am IPS ermittelten konstanten Werte für die Geschwindigkeitskorrektur für den Fahrbahnbelag aus Asphalt, Beton und Safety Walk. Die Linien 5 und 6 zeigen die vom MPD-Wert abhängigen Verläufe, die aus den Messergebnissen der SKM-Straßenversuche

und den am GAT durchgeführten Griffigkeitsversuche ermittelt wurden.

Die Linien 1 und die Markierungspunkte 2 und 3 liegen im Vergleich zu den anderen Verläufen auf einem vergleichbaren Niveau. Der Markierungspunkt des Safety Walk 4 liegt erheblich höher. Dies kann vermutlich auf die viel höhere Mikrorauheit des Fahrbahnbelags zurückgeführt werden. Beim Vergleich der beiden texturabhängigen Kurvenverläufe, denen die SKM-Straßenmessungen bzw. GAT-Messungen zugrunde liegen (Linie 5 und 6), kann eine vergleichbare Steigung beobachtet werden. Der Verlauf der Linie 6 ist jedoch im Vergleich zur Linie 5 deutlich nach oben verschoben. Dies könnte auf den Materialeinfluss der Kunstharzproben (hoher Adhäsionsreibranteil) zurückgeführt werden. Bei der Anwendung der zugehörigen Korrekturformeln würde der Geschwindigkeitseinfluss mit der am GAT ermittelten Korrekturformel deutlich stärker korrigiert werden, d. h., die Fahrbahnmakrotextur würde sich stärker auf die Geschwindigkeitskorrektur auswirken.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurde der Einfluss der Fahrbahngrobtexur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren untersucht. Im Speziellen wurde hierbei der Einfluss der Makrotextur auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit des SKM-Griffigkeitswertes genauer betrachtet. Diese Untersuchungen wurden durchgeführt, um den SKM-Griffigkeitswert bei Geschwindigkeitsabweichungen während der Messungen genauer als bisher auf die Soll-Messgeschwindigkeit korrigieren zu können. Weiterhin sollte der Einfluss der Fahrbahngrobtexur auf die Temperaturkorrektur (Wassertemperatur, Fahrbahntemperatur) untersucht werden.

Zu Projektbeginn wurde der am Institut vorhandene Abriebprüfstand (APS) zum Griffigkeits- und Abriebprüfstand (GAT) erweitert. Mit dem GAT war und ist es somit nun möglich, Griffigkeitsversuche auf Fahrbahnbohrkernen, welche zu Prüfzwecken aus bestehenden Fahrbahndecken gezogen werden, durchzuführen. Hierzu muss lediglich die obere Schicht (ca. 60 mm) des Bohrkerns vom Rest abgetrennt und in den Prüfstand eingespannt werden. Als Gummiprüfkörper können Gummigleitkörper oder Gummirädchen verwendet werden.

Da die Griffigkeit einer nassen Fahrbahn von der Fahrbahntextur und möglicherweise vom Fahrbahnmaterial abhängt, wurde innerhalb dieses Forschungsprojektes ein Abdruckverfahren entwickelt. Mit diesem Verfahren können Fahrbahnproben hergestellt werden, die unterschiedliche Texturen aufweisen, aber aus demselben Material bestehen. Damit ist es nun möglich, den Einfluss der Fahrbahntextur unabhängig vom Materialeinfluss betrachten zu können. Die hergestellten Texturen stammen hierbei von Bohrkernen aus bestehenden Fahrbahndeckschichten.

Das entwickelte Abdruckverfahren wurde während der Projektbearbeitung zusätzlich in der Weise erweitert, dass Fahrbahnproben mit künstlichen, gleichmäßigen Texturen (Kugeloberflächen) hergestellt werden können. Die Herstellung weiterer künstlicher Oberflächenstrukturen ist für die Zukunft ohne größeren Aufwand ebenfalls denkbar.

Mit den hergestellten Fahrbahnabdrücken, die aus Kunstharz, mit dem Füllstoff Korund, bestehen und reale Fahrbahntexturen aufweisen, wurden anschließend Griffigkeitsversuche mit einem SKM-Gummigleitkörper am Griffigkeits- und Abriebprüfstand durchgeführt. Die Versuchsparameter (Gleitgeschwindigkeit und Anpressdruck) wurden hierbei so eingestellt, dass sie möglichst den SKM-Bedingungen auf der Straße entsprechen. Aus den Untersuchungsergebnissen ist ersichtlich, dass sich das Abfallen der Griffigkeit zu höheren Geschwindigkeiten mit steigender Ausprägung der Makrotextur weniger stark äußert. Es konnte jedoch beobachtet werden, dass alle untersuchten Fahrbahnproben sehr hohe Griffigkeitswerte bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten aufweisen.

Da die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit nach [SCHULZE, 79] von der Kombination aus Makro- und Mikrotextur der Fahrbahn abhängt, konnte mit den hier vorhandenen und untersuchten Fahrbahnproben lediglich eine vorläufige Formel zur Geschwindigkeitsabhängigkeit des SKM-Griffigkeitswertes angegeben werden. Um eine endgültige Korrekturformel ermitteln zu können, hätten auch Fahrbahnproben mit größeren Unterschieden in der Mikrotextur untersucht werden müssen, was aber den Versuchsrahmen überstiegen hätte.

Über einen eventuellen Einfluss der Makrotextur auf die Temperaturabhängigkeit des Griffigkeitswertes kann mit den hier durchgeführten Untersuchungen keine Aussage getroffen werden, da am Griffig-

keits- und Abriebprüfstand Temperatureffekte aufgetreten sind, die bisher nicht abschließend untersucht werden konnten.

Um die am GAT ermittelten Ergebnisse zu verifizieren, wurden SKM-Versuche mit einem SKM-Messreifen im Innentrommelprüfstand (IPS) auf unterschiedlichen Fahrbahnen durchgeführt und ausgewertet. Diese Messungen wurden auf einem Asphalt, einem Betonbelag und auf Safety-Walk-Belag durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen, dass der Asphalt und der Betonbelag ähnliche Geschwindigkeitsabhängigkeiten aufweisen. Dies lässt sich vermutlich auf die Ähnlichkeit der Makro- und Mikrotextur der beiden Fahrbahnen zurückführen. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Safety-Walk-Belags ist deutlich ausgeprägter, was durch die hohe Oberflächenschärfe und die sehr schwach ausgeprägte Makrotextur zu erklären ist. Die Messungen auf dem untersuchten Asphaltbelag bestätigten die bisherige Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur, wie sie in den [TP Griff-StB (SKM)] vorgeschrieben ist. Die Messergebnisse auf dem untersuchten Betonbelag weichen hiervon schwach, die auf dem Safety-Walk-Belag stark ab. Die Abweichungen auf dem Betonbelag können vermutlich durch mögliche Materialeinflüsse der Fahrbahnbeläge erklärt werden.

Weiterhin wurden Messdaten von einer SKM-Straßenmessung (Bundesautobahn A 24) hinsichtlich des Makrotextureinflusses auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit analysiert. Diese Ergebnisse zeigen, wie die Ergebnisse am Griffigkeit- und Abriebprüfstand bzw. am Innentrommelprüfstand, den Trend, dass mit steigender Ausprägung der Makrotextur die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Griffigkeit abnimmt. Die ermittelten Messergebnisse sind jedoch nicht repräsentativ für alle in Deutschland verbauten Fahrbahnbefestigungen, da die Messungen am IPS nur auf drei unterschiedlichen Fahrbahnbelägen und mit dem SKM-Messsystem auf einem 5 km langen Streckenabschnitt durchgeführt wurden.

Wie bereits erwähnt, konnte innerhalb dieses Forschungsprojektes nur eine vorläufige, sehr stark eingeschränkte Formel für die Geschwindigkeitskorrektur ermittelt werden. Um den Einfluss der Makro- und Mikrotextur bei der Geschwindigkeitskorrektur der SKM-Griffigkeitswerte in Zukunft berücksichtigen zu können, sollten in einem Folgeprojekt Griffigkeitsversuche auf Fahrbahntexturen, die unterschiedliche Makro- und Mikrotexturen aufwei-

sen, durchgeführt werden. Hierzu wäre es sinnvoll, zu Beginn Griffigkeitsversuche auf den in diesem Forschungsprojekt entwickelten künstlichen Fahrbahnbelägen (Kugeloberflächen und andere) am GAT durchzuführen, da bei diesen Proben die Makrotextur sowie die Mikrotextur in weiten Bereichen wie gewünscht eingestellt werden können. Weiterhin sollte der Einfluss des Fahrbahnmaterials genauer betrachtet werden. Durch diese Versuche könnte ein genaueres Verständnis des Textureinflusses erlangt werden. Nach der Untersuchung der künstlichen Fahrbahntexturen sollten Griffigkeitsversuche mit realen Fahrbahntexturen durchgeführt und ausgewertet werden.

Durch Versuche am Innentrommelprüfstand (wenn möglich auch auf künstlichen Fahrbahntexturen aus unterschiedlichen Materialien) könnten dann abschließend die Griffigkeitsergebnisse vom GAT (Gummigleitkörper) mit Messungen mit einem unter Schräglauf frei rollenden SKM-Reifen validiert werden.

Literatur

- [ANTONOW, 09] ANTONOW, M.: Inbetriebnahme und Optimierung eines Gummiabriebprüfstandes, Diplomarbeit 09-F-0017, Institut für Fahrzeugtechnik und Mobile Arbeitsmaschinen, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2009
- [BACHMANN, 96] BACHMANN, T.: Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1996
- [DIN EN 206-1]: Beton, Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, DIN EN 206-1, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., März 2009
- [DIN 1045-2]: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., März 2009
- [DIN EN 13036-1]: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens; Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., März 2010
- [DIN EN 13036-3]: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 3: Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten; Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., März 2009
- [DIN EN 13036-4]: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen – Der Pendeltest; Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Dezember 2009
- [DIN EN ISO 13473-1]: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe (ISO 13473-1:1997); Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI; Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., Juli 2004
- [DIN ISO 13473-2]: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen (ISO 13473-2:2002); Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI; DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., März 2009
- [DIN 18315]: VOB – Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (ATV) – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Verkehrswegebauarbeiten – Oberschichten ohne Bindemittel, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN – Deutsches Institut für Normung e. V., April 2010
- [DELANNE, 93] DELANNE, Y.: Modélisation de la relation adhérence/texture en fonction de la vitesse, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Nr. 185, 1993
- [EICHHORN, 94] EICHHORN, U.: Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn – Einfluss und Erkennung. Dissertation TH Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 222, Düsseldorf, VDI-Verlag 1994

- [TL Asphalt-StB, 07] FGSV: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigung, Köln, 2007
- [TL Beton-StB, 07] FGSV: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Köln, 2007
- [TL Pflaster-StB, 06] FGSV: Technische Lieferbedingungen für Bauprodukte zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen, Köln, 2006
- [TP Griff-StB (SKM)] FGSV: Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), Köln 2007
- [TP Griff-StB (SRT)] FGSV: Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren SRT, Köln 2004
- [FISCHLEIN, 99] FISCHLEIN, H.: Untersuchung des Fahrbahnoberflächeneinflusses auf das Kraftschlussverhalten von Pkw-Reifen, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1999, veröffentlicht in VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 12, Nr. 414
- [GEIER, 72] GEIER, W.: Der Einfluss geometrischer Reibflächen-Rauhigkeitsformen auf das trockenen und nasse Reibverhalten von Gummi, Automobilindustrie; I: 2/72, S. 41 ff., II: 4/72, S. 39 ff.
- [GENGENBACH, 68] GENGENBACH, W.: Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn, ATZ 70 (1968) 3 (I), S. 83-89; 8 (II), S. 288-293; 9 (III), S. 310-316
- [GENGENBACH, 68/2] GENGENBACH, W.: Der Einfluss des Fahrbahnbelags, der Geschwindigkeit und der Profiltiefe von Reifen auf den Kraftschluss bei Nässe. Automobil-Industrie 4/70, S. 69 ff.
- [GRIMMIG, 10] GRIMMIG, F.: Umbau des Gummibetriebprüfstandes zum Griffigkeitsprüfstand für nasse Fahrbahnbeläge, Diplomarbeit 10-F-0039, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010
- [HORNE, 83] HORNE, W. B., BUHLMANN, F.: A Method for Rating the Skid Resistance and Micro-/Macrotecture Characteristics of Wet Pavements, American Society for Testing and Materials, 1983, pp. 191-218
- [IWS Messtechnik] IWS Messtechnik GmbH <http://www.iwsmesstechnik.de>; abgerufen am: 07.03.2011
- [KIRSTE, 80] KIRSTE, T.: Untersuchung über den Einfluss eines Schmierfilms auf die Fahrbahngriffigkeit, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren, FKFS-Bericht Nr. 7/1980
- [KUMMER, 64] KUMMER, H. W.: Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn, Stuttgart: ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift), 66. Jahrgang, Heft 9, September 1964
- [KUMMER, 66] KUMMER, H. W.: Unified theorie of rubber and tire friction, Pennsylvania State University, Engineering Research Bulletin B-94, 1966
- [KUMMER, 67] KUMMER, H. W., MEYER, W. E.: Verbesserte Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn, Ergebnisse einer neuen Reibungstheorie, ATZ 69/8 S. 245 ff., 1967
- [LEU, 78] LEU, M.-C., HENRY, J.-J.: Prediction of skid resistance as a function of speed from pavement texture measurements, Transportation Research Record, 666, pp. 7-13
- [PERSSON, 05] PERSSON, B. N. J., TARTAGLIANO, U., ALBOHR, O., TOSATTI, E.: Rubber friction on wet and dry surfaces: the sealing effect, American Physical Society, Phys. Rev. B. 71, 035428, 2005
- [SCHULZE/DAMES, 75] SCHULZE, K. H., DAMES, J.: Griffigkeitsmessungen bei hohen Geschwindigkeiten, Straßenbau und Straßenbautechnik, Heft 189, 1975
- [SCHULZE, 79] SCHULZE, K. H.: Griffigkeit und Rauheit, Handbuch des Straßenbaus, Bd. I. Hrsg. WEHNER; SCHULZE; SIEDEK, Springer-Verlag, 1979
- [STUDENROTH, 10] Datenblatt zu Rugotest 1 <http://www.studenroth.com/de/lehren/vergleichsnormale.php>, abgerufen am 21.09.2010
- [TAB_METALL, 08] FISCHER, U., HEINZLER, M. et al.: Tabellenbuch Metall, Haan-Gruiten, Verlag Europa Lehrmittel, 44. Auflage, 2008

[VELSKE, 09] VELSKE, S., MENTLEIN, H., EYMANN, P.: Straßenbau/Straßenbautechnik, Köln, Werner Verlag, 3. Auflage, 2009

[ZTV Asphalt-StB, 07] FGSV: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsbefestigungen aus Asphalt, Köln, 2007

[ZTV Beton-StB, 07] FGSV: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Köln, 2007

[ZTV Pflaster-StB, 06] FGSV: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Herstellung von Pflasterdecken, Plattenbelägen und Einfassungen, Köln, 2006

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2001

S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenerhaltung
€ 19,50

S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany,
v. d. Elshout, Sym € 10,50

2002

S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Konsolidationsverfahren -
Teil 1: Vergleichende Betrachtung von Konsolidationsverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund
Teil 2: Erfahrungsberichte über ausgeführte Straßenbauprojekte auf wenig tragfähigem Untergrund unter Verwendung von Konsolidationsverfahren
Koch € 17,50

S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 16,50

2003

S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Aufgeständerte Gründungspolster
Rogner, Stelter € 14,00

S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung der ZTV-M 02
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50

S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundesfernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 25./26. September 2000 in Saarbrücken € 13,00

S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saarbrücken € 13,50

2004

S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System –
€ 19,50

S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues
Golkowski € 13,50

S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2002 in Saarbrücken € 13,50

S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 17,50

S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

2005

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

2006

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00 -

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses "Straßenrecht" der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden
€ 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSüB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offener Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenerporigen Asphalten (OPA)
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. -
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00 -

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. -
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Canzler, Winkler € 16,50 -

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Ripke

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung,
Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 20./21. September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenerporigen Asphalten - Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenheitsauswerteverfahren "Bewertetes Längsprofil" – Weiterentwicklung der Längsebenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr 2" – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe "Leiser Straßenverkehr 2" € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.