

Technische Universität München
Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung

Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften von texturierten Verkehrsflächen aus Beton

Patrik Wenzl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für **Bauingenieur- und Vermessungswesen** der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor- Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Heinz

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. P. Schießl
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher, Ruhr- Universität Bochum

Die Dissertation wurde am 29.08.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 22.02.2008 angenommen.

für Kate

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität München.

Diese Zeit am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung gab mir Gelegenheit mich fachlich aber auch persönlich zu entwickeln. Für diese Möglichkeit möchte ich meinem 'Doktor-Vater', Herrn Prof. Schießl, sowie allen Kollegen und Kolleginnen, Diplomanden und Hiwis, die mich während dieser Zeit erlebt haben, aufrichtig danken.

Ganz besonderen Dank gilt meinem langjährigem (Zimmer-) Kollegen Dirk, der mit seinem Sachverstand und seiner konstruktiven Kritik viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, hat große Teile der Arbeit über die Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 08.170 'Beständigkeit unterschiedlicher Texturgeometrien von Straßenbetonoberflächen unter Berücksichtigung der Betonzusammensetzung' und 08.180 'Messung der Texturveränderung auf bestehenden Fahrbahnoberflächen aus Beton mit berührungslosen Oberflächen-Messgeräten und Kalibrierung im Labor' finanziert.

In diesem Zusammenhang möchte ich mich ganz herzlich bei den Mitarbeitern der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und im Besonderen bei Frau Nina Sliwa für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken.

Zudem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Heinz für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher für die Übernahme des Koreferates.

Meine geliebte Kate, meine Familie und meine Freunde haben mir während dieser Zeit unendlich viel Kraft durch ihre Geduld und ihr Verständnis gegeben. Danke für alles!!

Augsburg, im Frühjahr 2008

Patrik Wenzl

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 08.170/2002/LGB bzw. 08.185/2005/LRB durchgeführten Forschungsarbeiten zugrunde.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Aufgabenstellung	2
2 Oberflächeneigenschaften von Verkehrsflächen aus Beton	3
2.1 Herstellung texturierter Verkehrsflächen aus Beton	3
2.1.1 Herstellvorgang	3
2.1.2 Der Oberflächenmörtel	4
2.1.3 Texturierung einer Verkehrsfläche aus Beton	6
2.2 Die Textur – Charakteristik der Oberflächengestalt	6
2.3 Einfluss der Textur auf die Gebrauchseigenschaften der Fahrbahnoberfläche	8
2.3.1 Allgemeines	8
2.3.2 Lärmemission	8
2.3.3 Griffigkeit	11
2.4 Veränderung der Gebrauchseigenschaften durch Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt	13
2.4.1 Allgemeines	13
2.4.2 Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt	13
2.4.3 Veränderung der Gebrauchseigenschaften	15
2.5 Messen und Bewerten von Oberflächeneigenschaften	17
2.5.1 Allgemeines	17
2.5.2 Messung der primären Oberflächeneigenschaften	17
2.5.3 Messung und Bewertung von sekundären Oberflächeneigenschaften	18
3 Versuchs- und Messeinrichtungen	22
3.1 Allgemeines	22
3.2 Bestimmung der Dicke des Oberflächenmörtels	22
3.3 Messungen der Oberflächen mit dem Doppeltriangulationssensor	23
3.3.1 Durchführung der Messung	23
3.3.2 Auswertung der Messdaten	24
3.3.3 Zusammenhang zwischen primären und sekundären Oberflächenkenngrößen	29
3.4 Simulation der Beanspruchungen von Fahrbahnoberflächen im Labor	31
3.4.1 Allgemeines	31
3.4.2 Der kombinierte Laborbeanspruchungszyklus	32
3.4.3 Prüfanlage Wehner/Schulze	34
4 Einfluss der Texturgeometrie auf die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften	36
4.1 Allgemeines	36
4.2 Untersuchungen an einer Praxisstrecke	36
4.2.1 Beschreibung der Praxisstrecke (BAB A44)	36
4.2.2 An der Praxisstrecke durchgeführte Untersuchungen	37
4.2.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an der Praxisstrecke	46
4.3 Untersuchungen im Labor	46
4.3.1 Umfang der Untersuchungen im Labor	46
4.3.2 Beständigkeit der Textur in Abhängigkeit der Texturgeometrie - Labor	48
4.3.3 Zusammenfassung der Untersuchungen im Labor	53

5	Einfluss der Betontechnologie auf die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften	55
5.1	Allgemeines	55
5.2	Untersuchungen an Praxisstrecken	55
5.2.1	Untersuchungen an einem Streckenabschnitt der BAB A92	55
5.2.2	Untersuchungen an einem Streckenabschnitt der BAB A4	60
5.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Praxisstrecken	64
5.3	Untersuchungen im Labor	64
5.3.1	Einflüsse auf die Entstehung des Oberflächenmörtels	64
5.3.2	Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Texturbeständigkeit	67
5.3.3	Zusammenfassung der Laborversuche	73
6	Abschätzung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus	75
6.1	Allgemeines	75
6.2	Konzeption der Untersuchungen	75
6.3	Umfang und Durchführung der Untersuchungen	76
6.3.1	Praxisstrecke - Wetterdaten und Verkehrsbelastung	76
6.3.2	Praxisstrecke - Bestimmung der Oberflächeneigenschaften und deren zeitliche Veränderung	80
6.3.3	Anpassung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus	85
6.4	Zusammenfassung	90
7	Zusammenfassung	92
7.1	Allgemeines	92
7.2	Beständigkeit der Texturgeometrie	92
7.3	Einfluss der Betontechnologie auf die Texturbeständigkeit	93
7.4	Abschätzung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus	94
8	Literaturverzeichnis	96
ANHANG A:	zu Kapitel 2	103
ANHANG B:	zu Kapitel 3	109
ANHANG C:	zu Kapitel 4	115
ANHANG D:	zu Kapitel 5	126
ANHANG E:	zu Kapitel 6	140

Kurzfassung

Fahrbahndecken aus Beton müssen während der gesamten Nutzungszeit neben einer ausreichenden Tragfähigkeit vor allem dauerhaft gute Gebrauchseigenschaften ihrer Oberfläche aufweisen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Einflüsse auf die Beständigkeit der Texturgeometrie einer Betonfahrbahndecke untersucht. Hierzu wurde die Auswertemethodik der Messdaten, die im Labor mit dem Doppeltriangulationssensor berührungslos erfasst werden, hinsichtlich der Charakterisierung der Makrotextur angepasst. Zudem wurde die Wirkung des im Labor für die Versuche verwendeten kombinierten Laborbeanspruchungszyklus untersucht.

Bei den im Labor und auf Praxisstrecken durchgeführten Untersuchungen wurden neben dem Einfluss der Texturgeometrie selbst auch der Einfluss der Betonzusammensetzung und der Eigenschaften des frischen Betons bei der Herstellung betrachtet. Es zeigte sich, dass Texturgeometrien mit schwach ausgeprägter Makrotextur, wie z. B. der Jutetuchlängsstrich, für Fahrbahndecken, die hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind, wegen einer eher geringen Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften nicht geeignet sind. Im Zusammenhang mit dem Einfluss der Betontechnologie wurden Einflüsse auf die Entstehung und auf die Eigenschaften des entstandenen Oberflächenmörtels untersucht. Untersuchungen im Labor und in der Praxis zeigten, dass bei den üblich in der Praxis verwendeten Einbauverfahren die Einbaukonsistenz einen Einfluss auf die Eigenschaften des sich einstellenden Oberflächenmörtels hat. Sich daraus ergebende Unterschiede im Gebrauchsverhalten konnten bis jetzt vor allem im ersten Zeitraum nach Verkehrsfreigabe festgestellt werden.

Abstract

As well as sufficient load bearing capacity during service life, concrete pavement must also possess a surface with good performance properties which are durable. The present investigations focus on factors which affect the durability of the surface texture of concrete pavement. A special evaluation procedure was developed which enables the characterization of macro texture from data obtained in contact-free measurements with a double triangulation sensor. The effect of the combined laboratory test cycle - a method developed for the present investigations - on pavement surface properties was also considered.

The effect of texture geometry on performance properties was investigated in the laboratory and in the field at pavement sections of German highways. In addition, the effect of concrete composition and the properties of fresh concrete during pavement production were considered. It was found that texture geometries possessing a weak macro texture, e.g. longitudinal application of jute sacking, are not sufficiently durable and thus unsuitable for pavement exposed to high traffic loads. The formation and properties of the surface mortar layer were investigated with regard to concrete technology. Laboratory and field investigations show that concrete consistency affects the properties of the surface mortar of concrete placed using conventional pavement construction methods. Corresponding changes in performance properties were observed in the time period following opening of the pavement for traffic.

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Allgemeines

Fahrbahndecken aus Beton zeichnen sich vor allem in stark beanspruchten Bereichen des Verkehrsnetzes durch eine hohe Lebensdauer aus. Dabei müssen während der Nutzungszeit neben einer ausreichenden Tragfähigkeit vor allem dauerhaft gute Gebrauchseigenschaften der Oberfläche gewährleistet sein.

Eine dauerhaft gute Tragfähigkeit der Fahrbahndecke aus Beton lässt sich durch eine ausreichende Dimensionierung der Querschnittsdicke unter Berücksichtigung der Verkehrslasten sowie der Verwendung einer geeigneten Betonzusammensetzung erreichen.

Die Gebrauchseigenschaften der Fahrbahnoberfläche werden von der eingebrachten geometrischen Oberflächengestalt, der so genannten Textur bestimmt. Diese ist die primäre Eigenschaft der Fahrbahnoberfläche aus welcher sich die Gebrauchseigenschaften, die so genannten sekundären Eigenschaften, wie die Griffbarkeit, das Reifen/Fahrbahngeräusch (Lärmemission), sowie der Wasserabfluss und die Lichtreflexion ergeben (vgl. Bild 1). [1]

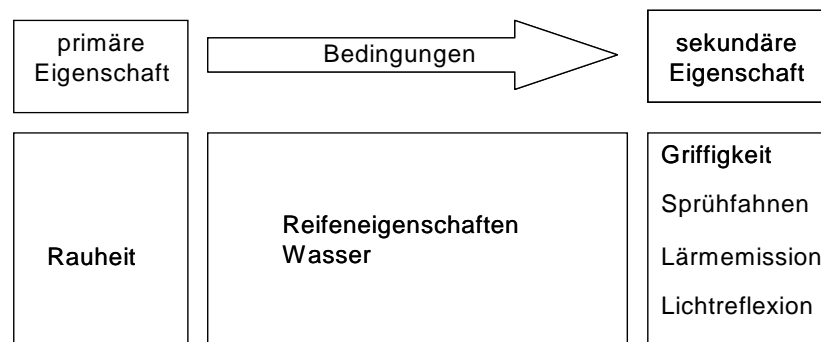


Bild 1: Zusammenhang zwischen den primären und den sekundären Oberflächeneigenschaften unter den beeinflussenden Randbedingungen nach [1]

Zu den wesentlichen Gebrauchseigenschaften der Oberfläche zählen die Griffbarkeit und das Lärmemissionsverhalten. Die Griffbarkeit ist zur Gewährleistung eines sicheren Verkehrsablaufs notwendig, der in kritischen Situationen, im Besonderen bei Nässe, ohne Störungen ablaufen soll. Das Lärmemissionsverhalten der Fahrbahnoberfläche im Kontakt mit dem Fahrzeugreifen hat durch die stetige Zunahme des Verkehrs und durch die Reduzierung der Antriebsgeräusche der Fahrzeuge an Bedeutung gewonnen. [2], [3], [4]

Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt führen über die Nutzungszeit zu einer Veränderung der Fahrbahnoberfläche und der sich aus ihr ergebenden Gebrauchseigenschaften. Insgesamt darf ein Verlust der ursprünglich eingebrachten Textur im Laufe der Nutzungsdauer nicht unbedingt einem Verlust der Gebrauchseigenschaften gleichgesetzt werden, da nach dem Abtrag des Oberflächenmörtels und der darin eingebrachten Textur die darunter liegenden Gesteinskörnungen freigelegt werden können. Diese leisten dann durch ihre Eigenrauheit den Beitrag für eine

ausreichende Griffigkeit bzw. gewährleisten durch ihre Anordnung an der Oberfläche ein gutes Lärmverhalten der Fahrbahndecke.

1.2 Aufgabenstellung

Die Oberflächeneigenschaften von Verkehrsflächen aus Beton werden während der Lebensdauer von den Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt beeinflusst bzw. verändert. Während der Lebensdauer müssen dabei trotzdem die Mindestanforderungen der relevanten sekundären Oberflächeneigenschaften wie Griffigkeit und Lärmemissionsverhalten eingehalten werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass jede Fahrbahnoberfläche ein unterschiedliches Ausgangsniveau der Oberflächeneigenschaften aufweist. Zudem können die Mindestanforderungen (S_{Emin}) während der Lebensdauer zeitweise unterschritten werden, vgl. Bild 2.

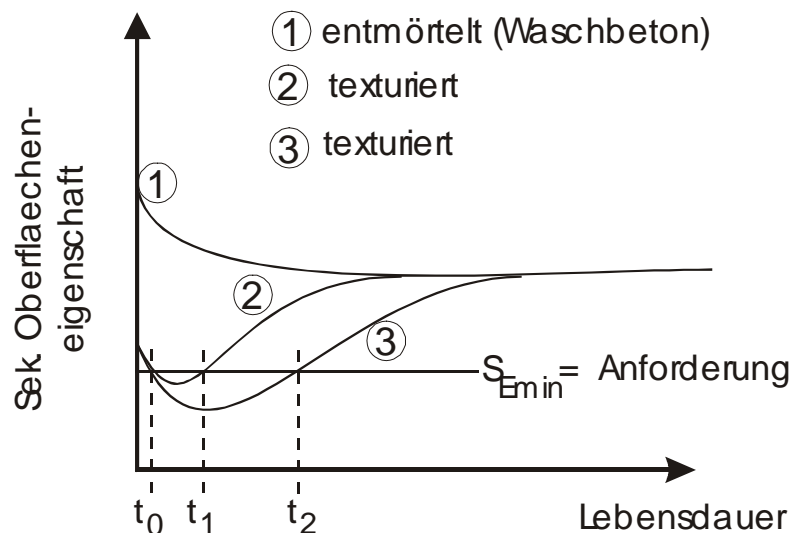


Bild 2: Schematischer Verlauf der sekundären Oberflächeneigenschaften (S_E) unterschiedlicher Oberflächenstrukturen während der Lebensdauer einer Betonfahrbahndecke

Die erwähnten Unterschreitungen der Mindestanforderungen treten in den im Bild 2 dargestellten Verläufen 2 und 3 nur in der Übergangsphase auf, bei welcher der Oberflächenmörtel, der keine Textur mehr aufweist, vollständig entfernt wird und sich somit eine entmörtelte Oberfläche einstellt. Die Übergangsphase kann infolge verschiedener Einflüsse, wie z. B. der Verkehrsbelastung oder der Qualität der texturierten Oberfläche unterschiedlich lange andauern (t_0 bis t_1 bzw. t_0 bis t_2).

Ziel der Arbeit war es zu klären, auf welche Parameter bei der Herstellung einer Betonfahrbahndecke, bei der Wahl der Betonzusammensetzung sowie der Form der eingebrachten Textur geachtet werden muss, um die Gebrauchseigenschaften einer texturierten Betonoberfläche dauerhaft zu erhalten.

2 Oberflächeneigenschaften von Verkehrsflächen aus Beton

2.1 Herstellung texturierter Verkehrsflächen aus Beton

2.1.1 Herstellvorgang

Die großtechnische Herstellung von Betonfahrbahndecken und insbesondere deren Verdichtung hat sich im Laufe der Jahrzehnte von einem schienengeführten Einbauzug mit einer Oberflächenverdichtung zu einem Gleitschalungsfertiger mit Innenrüttlern und Pressbohle in Kombination mit einer Glättbohle und einem Längsglätter entwickelt, vgl. Bild A 1 im Anhang A. [5], [6]

Das Hauptaugenmerk wurde beim Betonstraßenbau mit schienengeführten Einbauzügen auf die Herstellung einer Fahrbahndecke mit großer Ebenheit gelegt, die einen hohen Fahrkomfort für den Verkehrsteilnehmer gewährleisten sollte. Außerdem wurde das Ziel verfolgt mit den bei den Einbauzügen verwendeten Außenrüttlern eine gleichmäßige Verdichtung des Betonquerschnittes sicherzustellen, um keine große Streuung der Festigkeitseigenschaften über den Querschnitt zu erhalten. [5], [7]

Heutzutage sind neben einer ausreichenden Ebenheit und gleichmäßiger Festigkeit vor allem dauerhafte Gebrauchseigenschaften der Fahrbahnoberfläche gefordert. Für letzteres ist eine Textur notwendig, die in Kombination mit dem Oberflächenmörtel dauerhaft diese Anforderungen erfüllt. Die Entstehung des Oberflächenmörtels erfolgt bei den modernen Gleitschalungsfertigern im sog. Verdichtungsraum, zwischen Schottwand und Stirnwand, in welchem sich die Flaschenrüttler befinden (Bild 3).

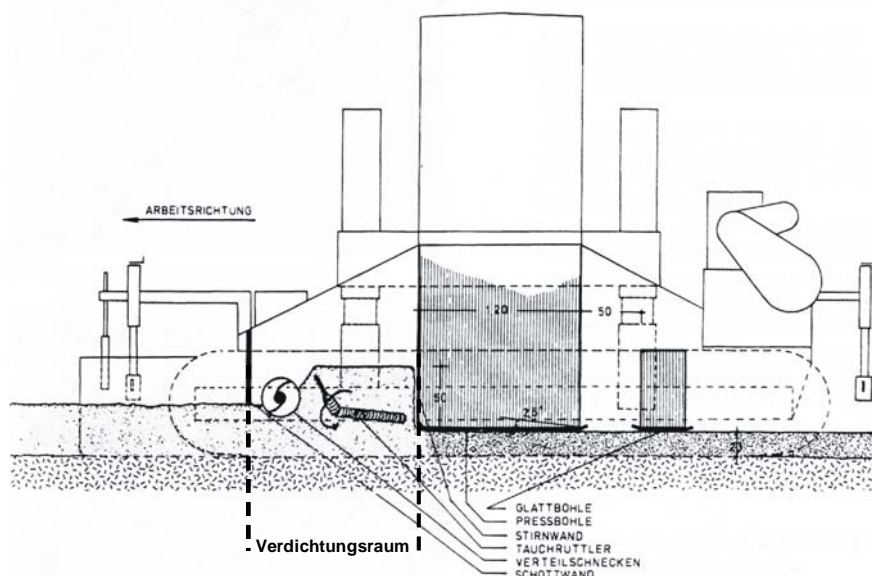


Bild 3: Systemskizze eines Gleitschalungsfertigers [6]

Der Materialstand im Verdichtungsraum wird durch das vorne quer zur Fahrtrichtung angebrachte Vorderwandschild gesteuert, wobei der Füllstand im Verdichtungsraum ein höheres Niveau als

die Fahrbahnoberfläche aufweist. Durch den Vortrieb des Fertigers findet in diesem Raum eine Walzenbewegung des Betons statt, welche dafür sorgt, dass immer frischer Beton vor der Pressbohle liegt. Gleichzeitig wird der verdichtete Beton unter die Pressbohle und an die seitlichen Schalungen gepresst. Die Länge der Pressbohle von ca. 100 - 120 cm verhindert, dass sich der Beton am Ende der Pressbohle wellt, da sich der hydrostatische Druck, der im Verdichtungsraum durch die Füllhöhe des verflüssigten Betons vorliegt, abbauen kann. Die Betonfahrbahndecke hat nach Verlassen der Pressbohle die endgültige Dicke und Zusammensetzung der Mörtelschicht erhalten, wobei die anschließende Querglätthohle einen optimalen Oberflächenschluss und der Längsglätter eine ausreichend gute Längsebenheit gewährleisten sollen. [6]

2.1.2 Der Oberflächenmörtel

Der Oberflächenmörtel, der sich nach der Pressbohle des Gleitschalungsfertigers ergeben hat, ist für den weiteren Herstellprozess einer Betonstraßen von besonderer Bedeutung, da dieser im frischen Zustand eine gute Texturierbarkeit aufweisen, sowie im festen Zustand eine ausreichende Dauerhaftigkeit der Textur und der sich daraus ergebenden Gebrauchseigenschaften der Fahrbahndecke gewährleisten soll. Eine gute Texturierbarkeit des Oberflächenmörtels zeichnet sich dadurch aus, dass die Textur mit dem jeweiligen Texturierungswerkzeug präzise eingebracht werden kann und bis zum Erstarren die eingebrachte Form beibehält. Neben einer guten Texturierbarkeit sind für die Dauerhaftigkeit der Gebrauchseigenschaften im festen Zustand aber auch die Dicke und die Zusammensetzung des Oberflächenmörtels zum Zeitpunkt der Texturierung von entscheidender Bedeutung. So weist die Mörtelschicht, die sich nach dem Verdichten und somit vor dem Texturieren einstellt, je nach Betonzusammensetzung (Mörtelgehalt des Betonvolumens), der Konsistenz und der Einbauweise eine bestimmte Mächtigkeit (Dicke) und Zusammensetzung (Wasser-, Mehlkorn-, Sand- und Luftporengehalt) auf. Bei optimal auf den Herstellprozess abgestimmter Konsistenz des Betons stellt sich nach [8] eine Mörtelschichtdicke von 0,5 - 1,0 mm ein. Die oberen Zonen die sich nach der Verdichtung und Texturierung im Betonquerschnitt ergeben sind in Bild 4 dargestellt. [9]

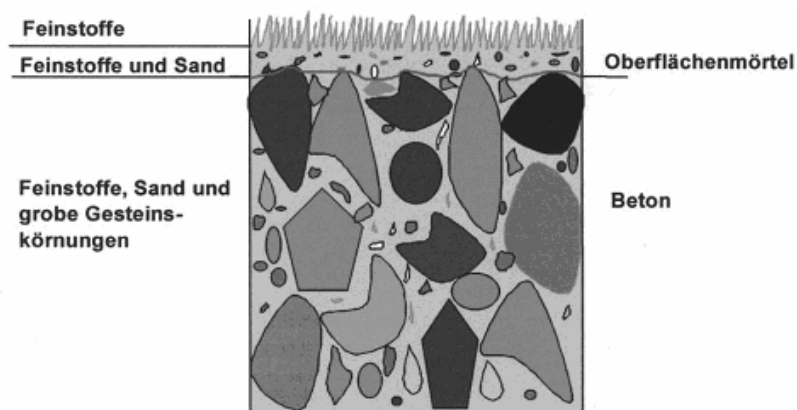


Bild 4: Aufbau und Bezeichnung der oberen Zonen einer Betonfahrbahndecke nach der Herstellung aus [8], [9]

Die geforderte gute Texturierbarkeit des Oberflächenmörtels darf aber nur als ein Kriterium für einen guten Oberflächenmörtel betrachtet werden. Zusätzlich ist die Zusammensetzung des Oberflächenmörtels für das spätere Griffigkeitsverhalten von entscheidender Bedeutung. Der Sand wird durch die Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt vom umgebenden Zementstein befreit und somit dessen Eigenrauheit aktiviert. Im weiteren Verlauf der Lebensdauer wird auch dieser Bereich des Oberflächenmörtels (Feinstoffe und Sand im Bild 4) abgetragen, wodurch es zu einem zunehmenden Freilegen der groben Gesteinskörnungen kommt. Vor allem nach dem Verbot der Spikebereifung, die über den Winter die Fahrbahnoberfläche genügend aufgeraut bzw. abgetragen hatte, muss heutzutage in Hinblick auf die Oberflächeneigenschaften mehr auf einen gut zusammengesetzten und texturierbaren Oberflächenmörtel mit einer günstigen Dicke geachtet werden. [8], [9], [10]

Bisher wurden kaum Erkenntnisse veröffentlicht, die Zusammenhänge zwischen der Zusammensetzung des Frischbetons und der Entstehung des Oberflächenmörtels bei der Herstellung von Betonfahrbahndecken mit Gleitschalungsfertigern beschreiben. Moss [6] gibt Empfehlungen, die sich aus der Arbeit mit dem verwendeten Gleitschalungsfertigertyp (Bild 3) ergeben haben. So weist er darauf hin, dass der Sand eine stetige Sieblinie und eine gut aufeinander abgestimmte Kornfolge besitzen muss. Des Weiteren ergibt sich das für eine gute Verarbeitbarkeit notwendige Mörtelvolumen aus dem Verhältnis von Mörtelvolumen zu Grobkornvolumen. Er gibt hierfür ein bereits in der Praxis bewährtes Verhältnis von ca. 46 Vol.-% Grobkorn größer 8 mm zu 52 Vol.-% Mörtel (Größtkorn < 2,0 mm) an. Dies entspricht im Bereich zwischen 2,0–8,0 mm einer Ausfallkörnung und wird damit begründet, dass vor allem ein hoher Anteil der Fraktion 4/8 mm sich negativ auf die Grünstandfestigkeit auswirkt.

In verschiedenen Forschungsarbeiten [9], [11], [12], [13], [14] wurde der Einfluss der Zusammensetzung des Oberflächenmörtels selbst auf die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften untersucht. Dabei konnte unter anderem festgestellt werden, dass die Mörtelschichtdicke selbst auf untersuchten Streckenabschnitten zwar sehr großen Schwankungen unterworfen war, wobei die Kennwerte der Zusammensetzung der jeweiligen Oberflächenmörtel weit weniger streuten [9], [14]. Zudem hatte sich ein direkter Zusammenhang zwischen einem erhöhten Wassergehalt des Oberflächenmörtels und einer daraus folgenden größeren Mörtelschichtdicke nach [14] nicht bestätigt. Dies deutet auf eine große Sensibilität des Entstehungsprozesses der Mörtelschicht auf Schwankungen der Konsistenz des Frischbetons und auf Verzögerungen im Bauablauf hin. Andere Untersuchungen in [11] zeigten, dass das Zusammenwirken vom Oberflächenmörtel und der darin eingebetteten Sand- und Gesteinskörner einen wesentlichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften, vor allem auf die Griffigkeit, hat. Insgesamt ist bei der Zusammensetzung des Oberflächenmörtels darauf zu achten, dass der Festigkeitsunterschied zwischen Zementsteinmatrix und den darin eingebetteten Sandkörnern nicht zu hoch ist. So konnte gezeigt werden, dass eine gut texturierbare und sehr abnutzefeste Mörtelmatrix eines hochfesten Betons hinsichtlich der Griffigkeitseigenschaften nicht günstig zu bewerten ist, da der feste Zementstein die Eigenrauheit der Gesteinskörner auch infolge einer simulierten Verkehrsbeanspruchung nicht freigibt. Im Gegensatz dazu besteht die Gefahr, dass bei einer im Vergleich

zum Sandkorn zu weichen Zementsteinmatrix das Sandkorn nicht in der Matrix gehalten wird und damit die für die Griffigkeit wichtige Feinrauheit des Sandkornes verloren geht.

2.1.3 Texturierung einer Verkehrsfläche aus Beton

Die Textur wird üblicherweise unmittelbar nach dem Einbau, Verdichten und Glätten entweder durch Ziehen oder Schleppen von geeigneten Hilfsmitteln in den Oberflächenmörtel des frischen Betons eingeprägt oder durch Entfernen des Oberflächenmörtels (Waschbeton) erzeugt. Zusätzlich zu den beiden Möglichkeiten der Herstellung einer Textur - Strukturieren bzw. Entfernen des frischen Oberflächenmörtels - kann durch Fräsen, Schneiden von Rillen usw. die Oberfläche des erhärteten Betons texturiert werden. Grundsätzlich wird dabei in gerichtete (anisotrope) und ungerichtete (isotrope) Texturen unterschieden. Hierbei weisen gerichtete Texturen in verschiedene Richtungen unterschiedliche Eigenschaften auf (Betrachtung quer bzw. entlang einer Längsrille). Ungerichtete Texturen, z.B. Waschbeton oder offenporige Beläge haben hingegen in verschiedene Richtungen gleiche Eigenschaften.

Das Einprägen der Textur in den frischen Oberflächenmörtel kann mit einem in Längsrichtung nachgezogenem Kunstrasen oder Jutetuch erfolgen. Wobei sich die mit einem Jutetuch eingebrachte Textur als wenig dauerhaft erwiesen hat [15]. Weitere Möglichkeiten zur Texturierung des Oberflächenmörtels sind die Verwendung eines Piassava- oder Stahl-Besens sowie die Kombination eines Jutetuchs oder Kunstrasens mit einem Kamm (zur Erzeugung zusätzlicher Riefen/Makrorauheit). Die erzielbare Textur wird dabei aus betontechnologischer Sicht vor allem von der Konsistenz und der Dicke des Oberflächenmörtels beeinflusst. Das Entfernen des Oberflächenmörtels zur Erzeugung einer Waschbetonoberfläche wurde wegen der erwarteten dauerhaft guten Oberflächeneigenschaften Anfang des Jahres 2006 in Deutschland mit dem ARS Nr. 5/2006 [16] als lärmindernde Bauweise anerkannt und seit dem in lärm betroffenen Bereichen eingesetzt. Mit dem ARS Nr. 14/2006 [17] wurde im Anschluss den ausschreibenden Stellen sowie den ausführenden Firmen grundlegende Hinweise für die Herstellung einer Waschbetonoberfläche zur Verfügung gestellt. Das Herstellen basiert dabei auf dem Auftragen eines Kontaktverzögerers auf den frischen Oberflächenmörtel, welcher das Erstarren des Mörtels im oberflächennahen Bereich verhindert und somit ein nachträgliches Ausbürsten des Mörtels ermöglicht. [8]

2.2 Die Textur – Charakteristik der Oberflächengestalt

Im Straßenbau wird die Textur mit frequenzanalytischen Methoden charakterisiert, (Bild 5). Die Zerlegung des Texturprofils erfolgt dabei mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT), die es ermöglicht jeder in der Textur vorkommenden Wellenlänge (λ) eine Amplitude (A) zuzuordnen.

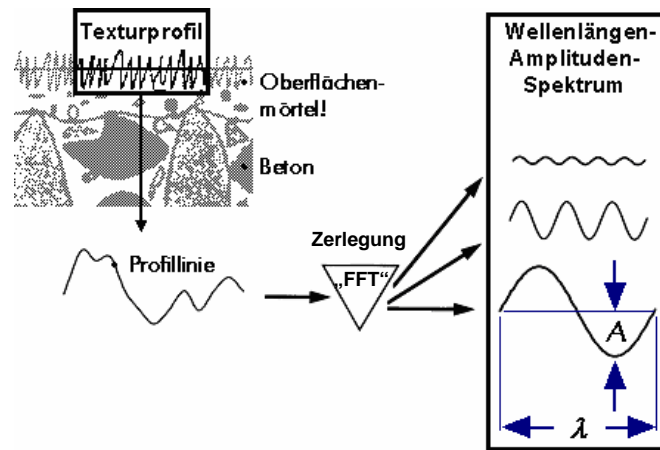


Bild 5: Die in den Oberflächenmörtel eingebrachte Textur kann – im (zweidimensionalen) Profil betrachtet - mittels der Fast-Fourier-Transformation (FFT) zerlegt und über ihr Wellenlängen-Amplitudenspektrum beschrieben werden, nach [18]

Das so erhaltene Wellenlängen-Amplitudenspektrum ermöglicht die Definition einzelner Texturbereiche in Abhängigkeit der jeweiligen Wellenlängen sowie deren Einfluss auf die Griffigkeits- bzw. Lärmeigenschaften. Das gesamte Textur-Spektrum ist bis zu einer oberen Grenzwellenlänge von 500 mm definiert, längere Wellen sind als Unebenheit definiert. Innerhalb des Textur-Spektrums wird unterschieden in die Bereiche der Mikro-, Makro- und Megatextur, die jeweils durch die Grenzwellenlängen von 0,5 mm, 50 mm und 500 mm nach oben begrenzt werden, vgl. Bild 6. [8], [19]

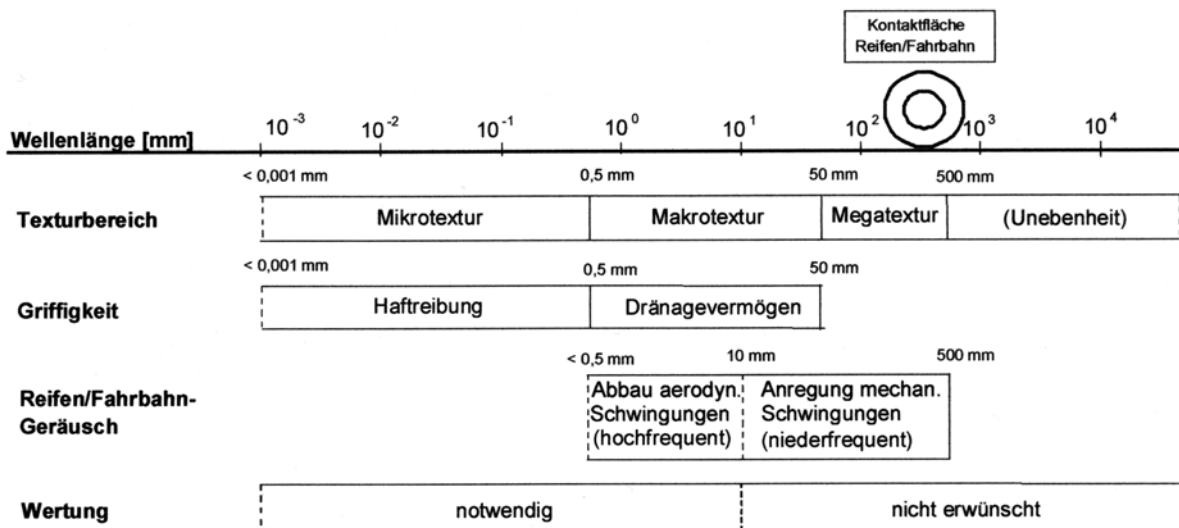


Bild 6: Die Textur wird nach Wellenlängen (λ) in die Bereiche Mikro-, Makro- und Megatextur eingeteilt [8]

Die Mikrotextrur schließt den kleinsten Wellenlängenbereich bis 0,5 mm ein, und umfasst hauptsächlich die Eigenrauheit der verwendeten Gesteinskörner und des Zementsteins. Diese ist bei nassen Fahrbahnverhältnissen für den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn maßgebend, da die Mikrotextrur die feinsten Spitzen stellt, die notwendig sind, um den letzten dünnen Wasserfilm zu durchbrechen und quasi trockene Berührungspunkte des Reifens mit den Profilsitzen herzustellen.

Die Makrotextrur umfasst Wellenlängen von 0,5 bis 50 mm. Mit diesem Bereich werden die in den Oberflächenmörtel eingebrachten Texturgeometrien erfasst, wobei sich hier nach Krieger und Sulten [20], [21] Texturgeometrien bis zu einer Wellenlänge von etwa 10 mm und einer höheren Amplitude günstig auf die Griffigkeit und Lärmemission auswirken. Darüber soll hingegen die vertikale Ausprägung der Wellen für eine geringe Lärmemission möglichst klein sein. Oberhalb einer Wellenlänge von 50 mm bis zu einer Wellenlänge von 500 mm ist die Megatextrur definiert. Im nächst höheren Wellenlängenbereich beginnt die Unebenheit [8]. Beide Texturbereiche sind zum Beispiel hinsichtlich eines guten Fahrkomforts nicht erwünscht.

2.3 Einfluss der Textur auf die Gebrauchseigenschaften der Fahrbahnoberfläche

2.3.1 Allgemeines

Wie bereits im Kapitel 1.1 und Kapitel 2.2 angesprochen, ergeben sich aus der Oberflächengestalt einer Fahrbahnoberfläche deren Gebrauchseigenschaften. Die wesentlichen Gebrauchseigenschaften sind dabei die durch den Reifen-Fahrbahnkontakt entstehende Lärmemission sowie das im kritischen, nassen Fahrbahnzustand vorhandene Griffigkeitsniveau. Auf diese beiden Gebrauchseigenschaften wird im Zusammenhang mit der Textur näher eingegangen.

2.3.2 Lärmemission

Die Lärmemission des Straßenverkehrs lässt sich hauptsächlich auf zwei Faktoren zurückführen, auf das Antriebsgeräusch der Fahrzeuge und auf das Reifen-Fahrbahngeräusch. Ab Geschwindigkeiten von etwa 50 km/h dominieren bei einem Pkw nicht mehr die Antriebsgeräusche, sondern die Rollgeräusche. Die Antriebsgeräusche der Fahrzeuge selbst konnten zudem durch technische Änderungen deutlich reduziert werden. [22]

Der kausale Zusammenhang bei der Entstehung von Schallemissionen durch das Abrollen eines Reifens auf einer (Fahrbahn-) Oberfläche wurde in den 1970 Jahren systematisch untersucht. In den darauf folgenden 80er Jahren wurde deshalb den akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen, auch in Hinblick auf eine noch ausreichende Griffigkeit, vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt. Seit dieser Zeit wurden verschiedenste Untersuchungen zu den Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahngeräusches durchgeführt (Bild 7), die sowohl ein Minderungspotential bei den Fahrzeugreifen als auch bei der gewählten Struktur der Fahrbahnoberfläche untersucht haben. [4], [21], [23], [24], [25]



Bild 7: Wechselwirkungen zwischen den Reifen und Fahrbahneigenschaften [25]

Bei Betrachtung des Reifen-Fahrweggeräuschs sind an einem festen Ort in bestimmter Entfernung drei Komponenten zu berücksichtigen, die Schallanregung, die Schallabstrahlung und die Schallausbreitung. Die Schallanregung und die Schallabstrahlung finden vor allem im Kontaktbereich des Reifens mit der Fahrbahnoberfläche statt. Die Schallausbreitung bezieht sich auf die Wegstrecke zwischen der Schallquelle und dem Empfänger. Alle drei Komponenten werden auch durch die akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche beeinflusst. [26]

Entsprechend Bild 7 verursachen die einzelnen Texturbereiche (Mega-, Makro- und Mikrotextur) verschiedene Arten von Reifen-Fahrweggeräuschen. Hier ergeben sich vor allem im Bereich der Mikro- und Makrotextur die häufigsten Abhängigkeiten bei den Entstehungsmechanismen, nämlich Aufschlag- und Ausschnappeffekte, Rillenresonanzen, Air Pumping (Komprimierung und Dekomprimierung von Luft), Reibschwingungen und Seitenwandschwingungen. Wobei hier wiederum eine Unterscheidung in eine Schwingungsanregung der Reifendecke (Aufschlag- und Ausschnappeffekte, Reibschwingungen und Seitenwandschwingungen) und in eine aerodynamische Schallerzeugung (Air Pumping) durchgeführt werden kann. [26]

Die mechanische Schwingungsanregung der Reifendecke durch die Textur kann vereinfacht durch das Auftreffen der Profilklotzchen des Reifens auf die Texturspitzen beschrieben werden. Die Reifendecke wird entsprechend der Textur deformiert, bei der anschließenden Rückverformung strahlt der Reifen Luftschall ab, wobei das erzeugte Geräusch umso größer wird, je rauer die Oberfläche ist. Bei diesem Vorgang entstehen zum größten Teil Schwingungen im niederfrequenten Bereich, die unter 1000 Hz liegen (Dröhnen).

Das Air Pumping bezeichnet die aerodynamische Schallanregung durch Luftbewegungen in der Kontaktfläche Reifen/Fahrbahn. Da Luft ein kompressibles Medium ist, wird diese in den Hohlräumen, die zwischen den Profilklotzchen des Reifens und der Fahrbahn entstehen, bei fehlender Entlüftungsmöglichkeit durch die Fahrbahnoberfläche, komprimiert. Bewegt sich der Reifen weiter, werden diese Hohlräume frei und die eingeschlossene komprimierte Luft wird entspannt. Für die Geräuschentwicklung (> 1000 Hz) ist die räumliche Trennung zwischen

Luft einlauf (Bereich an welchem die Luft eingesaugt wird) und Luftauslauf (Bereich, in dem sich die Luft entspannt) notwendig. [25]

Die Schallabstrahlung sowie die Schallausbreitung sind von den akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche abhängig, d.h. von der Eigenschaft der Fahrbahn, Schall zu reflektieren oder zu absorbieren. Die Schallabstrahlung selbst wird zusätzlich durch einen Schalltrichter, der sich zwischen der gekrümmten Lauffläche des Reifens und der Fahrbahnoberfläche bildet, und den elastischen Eigenschaften der Fahrbahn beeinflusst. [26]

Die Zusammenhänge der Entstehung des Reifen-Fahrbahngeräusches durch das Zusammenwirken von Reifen und Oberflächentextur sind wie zuvor gezeigt sehr komplex. Im Folgenden sind Texturparameter beschrieben, die zur Reduzierung der oben beschriebenen Reifen-Fahrbahngeräusche beitragen (Bild 8).

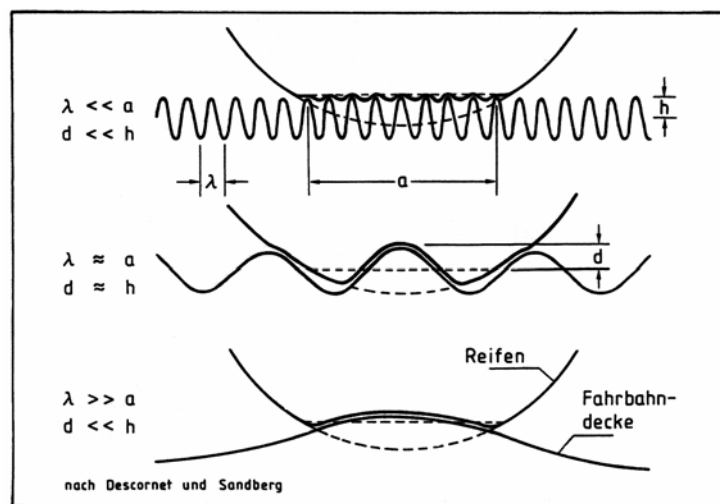


Bild 8: In Abhängigkeit der Geometrie der Fahrbahnoberfläche entstehen unterschiedliche Reifen-Fahrbahngeräusche [27]

Im Bereich der Mikrotextrur ($\lambda < 0,5 \text{ mm}$) soll eine möglichst große Rauheit (Bild 8 oben) angestrebt werden, um ein hochfrequentes Reifen-Fahrbahngeräusch, welches bei sehr glatten/polierten Oberflächen durch Adhäsion zwischen Reifen und Fahrbahn entsteht, zu vermeiden. Im Wellenlängenbereich von $\lambda = 0,5 \text{ mm}$ bis 10 mm wirken sich große Amplituden günstig auf das Reifen-Fahrbahngeräusch aus, da das Auftreten des Air Pumping Effektes durch bessere Entlüftungseigenschaften vermieden wird. Niederfrequente Reifen-Fahrbahngeräusche (Dröhnen), die auf eine Schwingungsanregung der Reifendecke zurückzuführen sind, werden vor allem durch eine Reduzierung der Amplitude im Wellenlängenbereich $\lambda = 10 \text{ mm}$ bis 500 mm vermindert. Allgemein formuliert ist nach derzeitigem Kenntnisstand eine Oberflächenstruktur in der Form eines 'Plateaus mit Schluchten' zur Reduzierung des Reifen-Fahrbahngeräusches zielführend. [21], [27], [28]

2.3.3 Griffigkeit

Die Griffigkeit ist ein Maßstab für die Reibung, die einen Kraftschluss zwischen Reifen- und Fahrbahnoberfläche bewirkt. Das Kraftschlussverhalten des Reifens wird dabei maßgeblich von den Haftungsparametern zwischen dem Gummi des Reifens und der Fahrbahnoberfläche bestimmt. Bei Betrachtung eines gleitenden Gummielements eines Reifens teilt sich die dort auftretende Reibkraft auf einer rauen Unterlage in eine Adhäsions- und eine Hysterese-Komponente auf, vgl. Bild 9. Die Adhäsions-Reibung ergibt sich durch physikalische Bindungen, die zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche im Molekularbereich entstehen. Unter der Hysterese-Reibung wird die dynamische Deformation des Gummis verstanden, die beim Gleiten auf der Fahrbahnoberfläche durch dessen geometrische Rauheit stattfindet. Beide Komponenten sind geschwindigkeitsabhängig. [29]

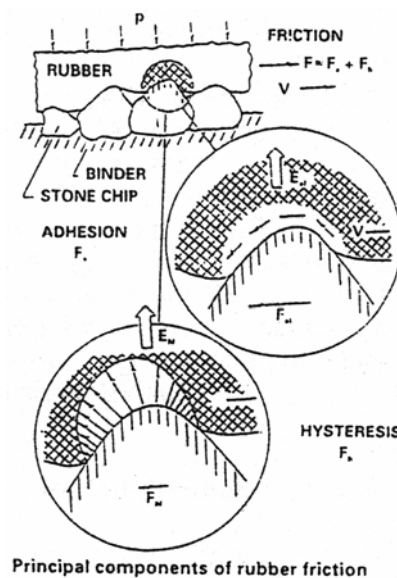


Bild 9: Schematische Darstellung der Adhäsions- bzw. Hysterese-Reibung [29]

Der hier relevante Reibungsvorgang wird neben den zuvor beschriebenen Vorgängen zwischen dem Reifengummi und der Fahrbahnoberfläche stark von der zwischen Reifen und Fahrbahn vorhandenen Zwischenschicht, wie zum Beispiel Schmutz, Wasser, Schnee und Eis beeinflusst. Neben der im Winter auftretenden Schnee- und Eisglätte ist der nasse Fahrbahnzustand für die Griffigkeit einer Fahrbahnoberfläche am ungünstigsten, da die zwischen Reifen- und Fahrbahnoberfläche befindliche Wasserschicht die Reibung zwischen beiden Reibungspartnern reduziert oder sogar aufheben (Aquaplaning) kann. Aus diesem Grund wird das Reibungsverhalten und somit das vorhandene Griffigkeitsniveau von Fahrbahnoberflächen stets bei angefeuchteter Oberfläche bestimmt. [30], [31]

Bei Reibungsvorgängen zwischen Reifen und (nasser) Fahrbahn sind eine ausreichende Mikro- und Makrorauheit der Textur von entscheidender Bedeutung (vgl. Kapitel 2.2). Im Zusammenhang mit der Griffigkeit muss bei einem Regenereignis durch eine ausreichende Makrorauheit die Drainage des Oberflächenwassers gewährleistet werden. Dies verhindert das Entstehen einer

Wasserschicht zwischen Reifen und Fahrbahn, welche im Extremfall zu einem Aufschwimmen des Reifens (Aquaplaning) führt. Die Mikrotextur ist für den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn maßgebend, da diese die Feinrauheit mit feinsten Spitzen stellt, die notwendig sind, um den letzten dünnen Wasserfilm zu durchbrechen und quasi trockene Berührungspunkte des Reifens mit den Profilsitzen der Mikrotextur herzustellen. [8]

Bild 10 zeigt den geschwindigkeitsabhängigen Einfluss der Textur auf die Griffigkeit, hier den Gleitbeiwert am blockierten Rad, gemessen mit dem Stuttgarter Reibungsmesser (SRM). Grundsätzlich ist die Griffigkeitsbeiwert bei höheren Geschwindigkeiten geringer.

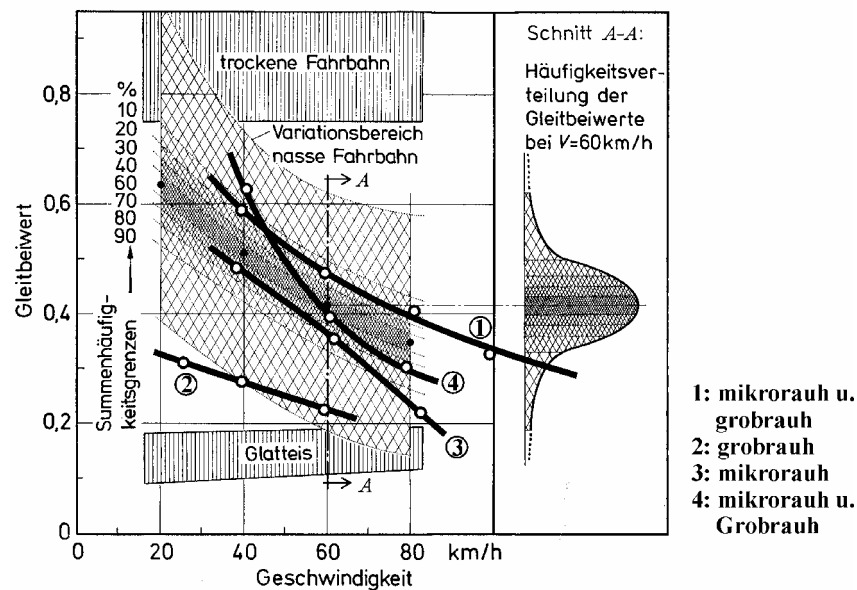


Bild 10: Ergebnisse von Griffigkeitsmessungen nach dem Verfahren mit dem blockierten Schlepprad (SRM) auf mikro- und makro- (grob-) rauhen, nassen Oberflächen, [32]

Die Kurven 1 und 2 gehören zu Oberflächen, die beide eine ausreichende Makrorauheit aufweisen wobei die Oberfläche der Kurve 1 zusätzlich eine ausreichende Mikrorauheit besitzt. Betrachtet man die Kurven 3 und 4 so weisen die zugehörigen Oberflächenstrukturen eine ausgeprägte Mikrorauheit auf, wobei der Unterschied zwischen beiden in einer schwach ausgeprägten Makrorauheit der Oberfläche der Kurve 4 besteht. Günstigere Griffigkeitseigenschaften bei hohen Geschwindigkeiten und Nässe zeigen somit Oberflächen, die sowohl eine ausreichende Mikro- als auch Makrorauheit aufweisen. [32]

2.4 Veränderung der Gebrauchseigenschaften durch Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt

2.4.1 Allgemeines

Fahrbahndecken aus Beton stellen ein horizontales Außenbauteil dar, bei welchem naturgemäß die Oberfläche durch die Einwirkungen aus Verkehr und in frei bewitterten Bereichen aus der Umwelt beansprucht und dadurch verändert wird. Die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften wird von der Intensität der einzelnen Beanspruchungen über den Lebenszyklus sowie von der Qualität der Oberfläche, die diesen entgegensteht, bestimmt. Letzteres beinhaltet zunächst die in den Oberflächenmörtel eingebrachte Textur und deren Qualität, die von der Zusammensetzung (Sandgehalt) und den Eigenschaften des Zementsteins selbst bestimmt wird. Im Laufe der Zeit findet ein Abtrag dieses obersten Bereichs statt, deshalb muss die darunter liegende grobe Gesteinskörnung einen hohen Polierwiderstand aufweisen, um die Anforderungen hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften, vor allem der Griffbarkeit, weiterhin zu gewährleisten.

2.4.2 Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt

Die Fahrbahnoberfläche wird durch mechanische (v.a. rollende) Einwirkung, durch Frost-Tau-Wechsel bei gleichzeitiger Tausalzeinwirkung und durch lösenden Angriff des Regenwassers beansprucht. Dabei stellen die Überrollungen der Fahrzeugreifen eine quasi stetige Beanspruchung (mit hoher Frequenz) dar, die von den unregelmäßig wiederkehrenden Umwelt-ereignissen Frost und Regen überlagert werden.

Der mechanische Angriff

Die mechanische Beanspruchung durch den Verkehr stellt nach dem Verbot der Spikebereifung eine polierende und somit griffigkeitsmindernde Verschleißbeanspruchung dar. Diese findet vornehmlich durch das Abrollen der Fahrzeugreifen sowie durch den Antriebs- und Bremsschlupf und ggf. durch vertikale Schwingungen statt. Die verschleißende Beanspruchung beim Abrollvorgang ergibt sich durch die nacheinander auftreffenden Profilklotzchen. Die Beanspruchung wird verstärkt durch eine größere Anzahl an Überrollungen, bei höheren Achslasten bzw. höherem Reifendruck, bei einer härteren Gummimischung der Fahrzeugreifen, bei höheren Geschwindigkeiten und größerer Unebenheit der Fahrbahnoberfläche. [29], [33], [34]

Der Frost-Tausalz-Angriff

Im Winter findet neben dem oben beschriebenen mechanischen Angriff im oberflächennahen Bereich der Fahrbahndecke ein Frostangriff statt. Im Bereich der Verkehrswege tritt durch den Einsatz von Taumitteln, wie zum Beispiel Natriumchlorid (NaCl), vor allem der Frost-Tausalz-Angriff auf, der zu einer Verstärkung des Frostangriffs auf die Oberfläche führen kann. Dabei können bei einem durchfeuchteten Beton äußere sichtbare und innere (Gefüge-) Schäden auftreten. Äußere sichtbare Oberflächenschäden sind Abwitterungen, d.h. das Ablösen von Bestand-

teilen des Feinmörtels an der Oberfläche. Die innere Schädigung ist eine Gefügezerstörung, die äußerlich in Form von Rissbildungen sichtbar werden kann. Die Menge der Abwitterung und der Grad der inneren Gefügezerstörung korrelieren nicht miteinander. Neben der Anwesenheit von Wasser und Taumittel sind für das Entstehen der Schäden die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel von Bedeutung, wobei eine Zunahme der Schäden bei hoher Porensättigung auftritt. Die Porensättigung wird durch mehrmals hintereinander stattfindendes Gefrieren und Auftauen erhöht, da das Wasser beim Auftauen wegen des höheren Dampfdruckes aus den kleineren Poren in die größeren Poren diffundiert und somit der Beton beim Auftauen weiteres Wasser von außen aufnimmt. [35], [36], [37].

Für eine Fahrbahnoberfläche in der Praxis ist somit für den Schädigungsfortschritt entscheidend, welches Feuchteangebot bei der jeweiligen Temperatur vorliegt. Das Feuchteangebot selbst ist dabei nicht klar definiert, denn viele Frost-Tau-Wechsel finden auch während einer Trockenphase statt.

Der lösende Angriff

Nach Locher [38] wird unter dem Begriff des lösenden Angriffs auf eine Betonoberfläche das Entstehen von leicht wasserlöslichen Verbindungen verstanden, wie sie durch Säuren oder austauschfähige Salze verursacht werden. Bei einer Betonfahrbahndecke sind dies Regenereignisse, die zu einer Kalkauflösung an der Oberfläche führen. Dabei finden nach Untersuchungen von Bühlmann [39] durch den auftreffenden Regen drei simultan ablaufende Reaktionen statt. Dies ist die Verwitterung durch eine Säure, die Kohlensäureverwitterung und die Hydrolyse. Die Reaktionen werden dabei durch den pH-Wert und den CO_2 -Partialdruck beeinflusst, vgl. Bild 11.

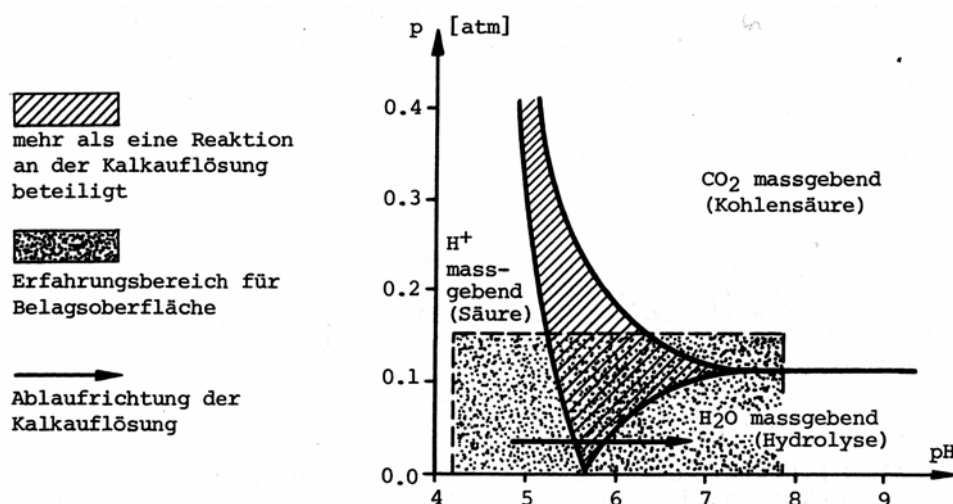


Bild 11: Einflussbereiche der einzelnen Reaktionen auf die Kalkauflösung in Abhängigkeit des pH-Wertes und des Partialdruckes [39]

Die Verwitterung durch eine Säure findet durch das unmittelbar auftreffende Regenwasser statt. Das Regenwasser löst auf dem Weg durch die Atmosphäre dorthin gelangte Stoffe (z.B. CO_2 ,

SO₂, usw.) und bildet dabei Säuren bzw. Basen wodurch sich der pH-Wert ergibt. In Deutschland liegt dieser nach Untersuchungen durch das Umweltbundesamt [40] zwischen 4,8 und 4,9, wobei das Regenwasser eine geringe Pufferkapazität aufweist. Das auf die Oberfläche gelangte Regenwasser löst in Folge Kalk und wird neutralisiert.

Sobald der pH-Wert über 6,5 angestiegen ist, wird die Verwitterung durch eine Säure durch die Kohlensäureverwitterung abgelöst. Denn durch die Autoabgase steigt der CO₂-Partialdruck unmittelbar über der Fahrbahnoberfläche an, erhöht dabei den CO₂-Gehalt im Oberflächenwasser und ein kalkauflösender Prozess setzt ein.

Wird der kritische Partialdruck nicht überschritten, kommt es zur Hydrolyse. Dabei löst das salzarme Regenwasser Kalk an der Oberfläche der Fahrbahndecke auf. [39]

Die Schädigung einer Betonoberfläche durch lösenden Angriff kann durch eine Abtragstiefe je Zeit, z.B. mm/a, quantifiziert werden. Dabei ist ein wichtiger Faktor ob es während des Angriffs zu einem Abtrag der angelösten Schicht kommt. Untersuchungen von [41], [42], [43] haben gezeigt, dass sich infolge des Korrosionsvorganges eine Schutzschicht bildet, die durch eine verminderte Diffusion die Korrosion stark hemmt. Bei einem Abtrag der vorhandenen Schutzschicht können selbst schwach angreifende Lösungen zu einem schnellen Abtrag des Betons führen. Diese Form des Betonabtrages findet in der Praxis auf einer Fahrbahnoberfläche statt, da dort während eines Regenereignisses ein mechanischer Angriff durch den Verkehr erfolgt.

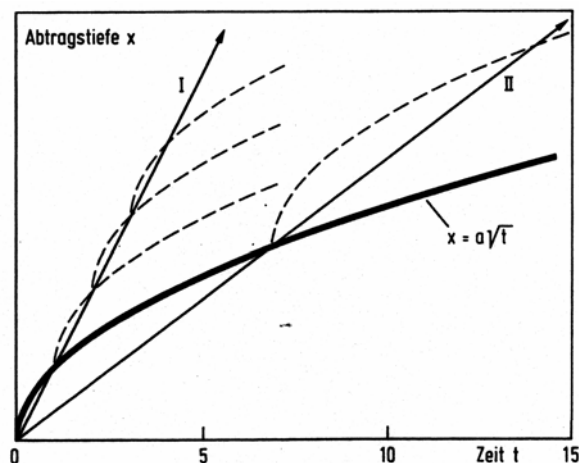


Bild 12: Schematische Darstellung der Abtragstiefe einer Betonoberfläche über die Einwirkzeit: Ohne mechanischem Entfernen der Schutzschicht folgt der Abtrag dem \sqrt{t} -Gesetz; mit mechanischem Abtrag der Schutzschicht folgt der Abtrag den Geraden I (häufiger Abtrag) bzw. II (seltener Abtrag) [43]

2.4.3 Veränderung der Gebrauchseigenschaften

Die Griffigkeit und das Lärmverhalten stellen über die Nutzungszeit keine konstante Größe dar, denn die Fahrbahnoberfläche wird wie zuvor dargestellt durch die Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt beansprucht und dadurch verändert.

Die Griffigkeit nimmt vor allem wegen der mechanischen Beanspruchung aus dem Verkehr über den Nutzungszeitraum ab, wobei die Höhe und der Zeitraum des Griffigkeitsverlustes von verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel der Verkehrsbelastung und den Materialeigenschaften (z.B. verwendete Gesteinskörnungen), bestimmt wird.

Betrachtet man relativ kurze Zeiträume (z.B. ein Kalenderjahr), werden jahreszeitlich bedingten Schwankung der Griffigkeit sichtbar. In Bild 13 ist beispielhaft der Griffigkeitsverlauf einer in England untersuchten Erprobungsstrecke dargestellt. Die Griffigkeit wurde hier mit dem SCRIM-Messfahrzeug (Beschreibung Kapitel 2.5) erfasst.

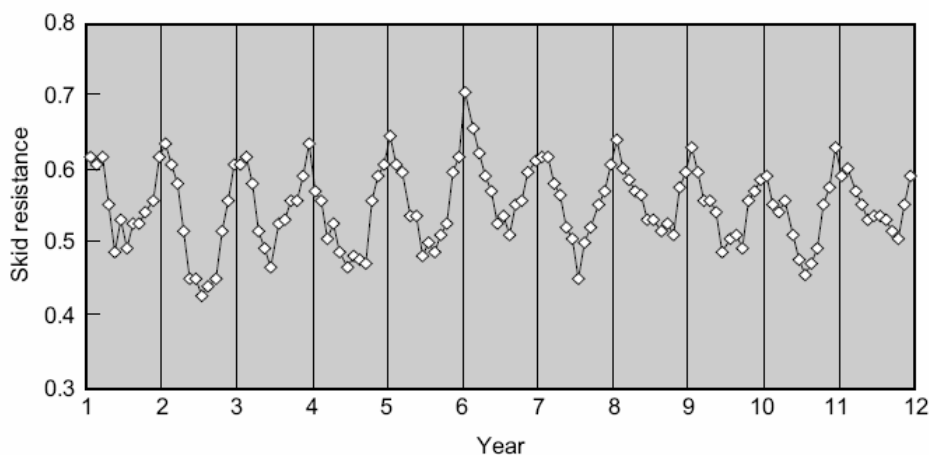


Bild 13: Verlauf der Griffigkeitseigenschaften einer Fahrbahnoberfläche über einen Messzeitraum von 12 Jahren nach [44]

Der Griffigkeitsanstieg im Herbst und Winter wird hierbei auf die überwiegend feuchten Witterungsbedingungen zurückgeführt, die zusammen mit dem auf der Straße vorhandenen Abrieb zu einer rauerer Oberfläche führen. Der Verlust der Griffigkeit über die Sommermonate wird mit der polierenden Eigenschaft des trockenen Abriebs begründet. [44]

Untersuchungen von Vogler [45] bezüglich des petrographischen Einflusses auf das Griffigkeitsverhalten von Straßen bestätigen den Einfluss der Feuchtigkeit auf das Polierverhalten von Gesteinskörnungen und somit die in Bild 13 dargestellten Schwankungen.

Die Entwicklung der Geräuschemission von Straßen wurde bisher vor allem hinsichtlich der Parameter, wie zum Beispiel der Verkehrstärkenzunahme oder der Entwicklung der mittleren PKW-Geschwindigkeiten untersucht. Die Geräuschemission von Autobahnen verzeichnete dabei zwischen 1975 und 2002 eine Zunahme von ungefähr 2 dB(A). Dies erfolgte trotz der Reduktion der Antriebsgeräusche und der bis dahin stattgefundenen Entwicklung lärmarmen Beläge. Als Ursachen für die Zunahme werden dabei das erhöhte Verkehrsaufkommen sowie die fehlende Entwicklung leiserer Reifen angesehen. [22]

Insgesamt darf ein Verlust der ursprünglich eingebrachten Textur im Laufe der Nutzungsdauer durch die Beanspruchungen aus Verkehr und Umwelt nicht unbedingt einem Verlust der Gebrauchseigenschaften gleichgesetzt werden, da nach dem Abtrag des Oberflächenmörtels und

der darin eingebrachten Textur die darunter liegenden Gesteinskörnungen freigelegt werden können. Diese leisten dann im optimalen Fall durch ihre Eigenrauheit und bei einer hohen Polierresistenz den Beitrag für eine dauerhaft ausreichende Griffigkeit und gewährleisten durch ihre Anordnung an der Oberfläche ein gutes Lärmverhalten der Fahrbahndecke.

2.5 Messen und Bewerten von Oberflächeneigenschaften

2.5.1 Allgemeines

Oberflächeneigenschaften einer Fahrbahndecke sind, wie in Bild 1 im Kapitel 1.1 dargestellt, in sog. primäre und in sekundäre Eigenschaften eingeteilt. Kenngrößen, die die primäre Eigenschaft einer Fahrbahnoberfläche und somit deren Textur beschreiben sollen, erfordern eine messtechnische (Linien- oder Flächen-) Aufnahme der Oberfläche und müssen aus dem Profilverlauf abgeleitet werden. Sekundäre Oberflächeneigenschaften ergeben sich bekanntermaßen aus den primären, und stellen somit integrale Kenngrößen einer Oberfläche dar. Mit den Kenngrößen der sekundären Oberflächeneigenschaften werden die Griffigkeits- und Lärmeigenschaften von Fahrbahnoberflächen direkt bewertet.

2.5.2 Messung der primären Oberflächeneigenschaften

Wegen der in Bild 6 gezeigten unterschiedlichen Auswirkungen der feinrauen und grobrauen Profilanteile (primären Eigenschaften) einer Textur auf die Griffigkeit und das Reifen/Fahrbahn-Geräusch (sekundären Eigenschaften) müssen aus dem Profilverlauf abgeleitete Kenngrößen nicht nur die Amplituden der Texturwellen, sondern auch den Abstand der Texturspitzen berücksichtigen. Zudem müssen diese Kenngrößen wegen ihrer unterschiedlichen Bedeutung für die sekundären Eigenschaften Aussagen für den Mikrotexturbereich sowie für den Makrotexturbereich getrennt beinhalten.

Die Entwicklung von Geräten zur Erfassung der primären Eigenschaften von Straßenoberflächen erfolgte in Deutschland bereits 1938 und wurde, um ein möglichst exaktes Abbild der Fahrbahnoberfläche und deren Rauheit zu erhalten, ständig verfeinert [46], [47]. Dies wiederum erforderte eine Auswertemethodik, die die exakt aufgenommene Gestalt der Oberfläche einerseits genau charakterisiert und andererseits die gewonnenen Kennwerte in Verbindung mit den sekundären Oberflächeneigenschaften wie der Griffigkeit bringt. In den 1950er Jahren wurde daraufhin begonnen, die geometrische Gestalt von Straßenoberflächen (primäre Eigenschaft) mit aus dem Maschinenbau bekannten Definitionen und Begriffen zu beschreiben, oder darauf aufbauend Kennwerte aus den einzelnen Profilschnitten, sog. Rauigkeitskurven zu ermitteln. [48], [49]

Die Erfassung der geometrischen Gestalt der Oberfläche erfolgt heutzutage mit berührungslosen Messverfahren, die zum Beispiel auf dem Prinzip der Triangulationsmessung (Laser), oder einer photooptischen Erfassung (Streifenlichtmessverfahren) der Oberfläche beruhen. Die jeweiligen Messgeräte besitzen je nach Messeinrichtung (z. B. Laserpunktgröße) oder Auflösung der Kamera eine laterale Auflösung im Bereich einiger hundertstel Millimeter und eine vertikale Auflösung

von weniger als einem Mikrometer (tausendstel Millimeter) [11], [25], [50]. Die Erfassung der Oberflächen ist als Profilschnitt (zweidimensional) aber auch flächenhaft (dreidimensional) möglich. Die Auswertung der Profildaten kann durch Bestimmung einer einfachen mittleren Profiltiefe (MPD) [51], aber auch mit frequenzanalytischen Methoden, sowie durch Analyse der Materialanteilkurve nach Abbott [52] erfolgen.

Die zuvor erwähnten sehr fein auflösenden optischen Messeinrichtungen befinden sich derzeit noch überwiegend im Laboreinsatz, weswegen die Messung von Praxisoberflächen noch hauptsächlich an Ausbaustücken im Labor stattfindet. Um aber dennoch in situ eine Aussage über die primäre Oberflächeneigenschaften der Makrotextur (Drainagevermögen) treffen zu können, stellt das in der DIN EN 13036 [53] genormte Verfahren, welches mit dem Sandflächenverfahren nach Kaufmann [54] vergleichbar ist, eine schnelle und einfache Möglichkeit dar, die mittlere Oberflächentexturtiefe zu erfassen. Dabei wird eine strukturierte Oberfläche mit einem definierten Volumen eines Prüfmediums aufgefüllt (Beschreibung im Anhang B). Zu beachten ist, dass eine große mittlere Oberflächentexturtiefe nicht zwingend mit einer hohen Griffigkeit gleichzusetzen, da keinesfalls der unterschiedliche Schärfegrad einer Oberfläche -also die Mikrotextur- berücksichtigt wird. Außerdem handelt es sich um einen über die gesamte Fläche integrierten Kennwert, d.h., dass unter Umständen zwei ungleiche Oberflächen, eine mit vielen kleinen schmalen Rillen, die andere mit einer großen breiten Rille, die gleiche mittlere Oberflächentexturtiefe aufweisen können [31]. Aufgrund der umfangreichen Erfahrungen bei dem Einsatz dieser Prüfmethodik zur Beschreibung der Gestalt einer Oberfläche im Bereich der Makrotextur, gibt es Anhaltswerte im Zusammenhang mit der Griffigkeit und dem Lärmverhalten einer Oberfläche. So sollte die mittlere Oberflächentexturtiefe hinsichtlich der Griffigkeit mindestens 0,4 mm betragen, und für ein günstiges Lärmverhalten im Bereich zwischen 0,4 mm und 0,8 mm liegen (gilt für PKW). [8], [20], [55]

2.5.3 Messung und Bewertung von sekundären Oberflächeneigenschaften

2.5.3.1 Lärmmessungen

Das menschliche Gehör nimmt Schwingungen, die von einer Quelle als periodische Luftdruckveränderungen ausgehen (= Schall), im Bereich zwischen 16 und 20.000 Hz wahr. Zu einer Lärmbelastung kommt es, wenn die subjektive Einschätzung des Schalls als unerwünscht und störend empfunden wird und nicht abgestellt werden kann. Die subjektiv empfundene Stärke des Schalls wird als Lautstärkepegel (L_N) angegeben und entspricht dem dekadischen Logarithmus der Schallstärke ($\lg I$). Zur Bewertung der Schallstärke wird zumeist das Verhältnis zweier Lautstärkepegel, angegeben in Bel, verwendet. Gebräuchlich ist die Angabe dieses Verhältniswertes in Dezibel (dB), also Bel/10. Das Gehör reagiert aber nicht auf alle hörbaren Frequenzbereiche mit der gleichen Empfindlichkeit, weswegen es zu einer frequenzabhängigen Bewertung (A-Bewertungskurve) kommt. [56]

Ergebnisse von Lärmmessungen im Bereich des Straßenwesens sollen primär Aufschluss über die Beeinflussung des menschlichen Wohlbefindens durch den Straßenverkehrslärm geben. Für die Messung der Lärmemissionen im Bereich der Straße, die infolge des Reifen/Fahrbahnkontaktes

entstehen, kommen grundsätzlich das Fernfeld- und Nahfeldmessverfahren zum Einsatz. Die einzelnen Verfahren sind in der GEstro-92 [57] bzw. in der DIN EN ISO 11819-1 [58] beschrieben und festgelegt.

Die kontrollierte und statistische Vorbeifahrtmethode zählen zu den Fernfeldmessverfahren. Beide beruhen auf dem gleichen Messprinzip (vgl. Anhang B) mit dem Unterschied, dass bei der kontrollierten Vorbeifahrtmethode eine begrenzte Anzahl an Pkws auf einer gesperrten bzw. bedingt unter Verkehr liegenden Straße gemessen wird. Dies schafft eindeutig definierte Randbedingungen gegenüber der statistischen Vorbeifahrtmethode und erlaubt somit z.B. den Vergleich des Lärmverhaltens unterschiedlicher Fahrbahnoberflächen oder den Vergleich verschiedener Reifen. Die statistische Vorbeifahrtmethode erfasst die realen Bedingungen durch die Gesamtheit der an der Messstelle vorbeifahrenden Fahrzeuge (Lkw, Pkw). Diese Methode ist maßgebend für die Einstufung der Geräuschemission von Fahrbahnoberflächen. Insgesamt wird mit den Fernfeldmessungen die Schallausbreitung und somit die Lärmimmission für einen definierten Ort bestimmt [57]. Berücksichtigt werden muss, dass in Deutschland bei der Bewertung der Vorbeifahrtpegel entsprechend der GEstro-92 [57] der LKW-Anteil nicht mit einbezogen wird.

Die direkte Messung der Schallanregung durch den Reifen/Fahrbahnkontakt kann durch die Messung mit sog. Schallmessanhängern (vgl. Anhang B) erfolgen. Diese Methode besitzt den Vorteil, die Homogenität einer Strecke über eine längere Distanz zu erfassen, wobei dies im Vergleich zu den nur punktuell an einem Fahrbahnabschnitt stattfindenden Fernfeldmessungen mit einer höheren Messunsicherheit erfolgt. [59], [60], [61]

Bei beiden genannten Verfahren wird neben dem Vorbeifahrtpegel auch die Geschwindigkeit der vorbeifahrenden Fahrzeuge bzw. des Schallmessanhängers erfasst. Damit ergibt sich eine funktionale Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Schallemission, die eine eindeutige Zunahme der Vorbeifahrtpegel mit der Zunahme der Geschwindigkeit ergibt. Im Bereich unter ca. 50 km/h ist der Hauptanteil der Schallemission auf die Antriebsgeräusche zurückzuführen, darüber gewinnt das Rollgeräusch immer mehr an Bedeutung [62]. Das gemessene Rollgeräusch, das durch den Reifen/Fahrbahnkontakt entsteht, unterliegt einer Vielzahl von Einflüssen. So sind die Messungen des Vorbeifahrtpegels von Fahrzeugen wie jede physikalische Messung mit Messunsicherheiten behaftet. Ullrich [60] gibt als Messtoleranz für die Ermittlung des mittleren Pkw-Vorbeifahrtpegels mit der Fernfeldmessung $\pm 1,4$ dB(A) an. Des Weiteren weist Kamplade [63] darauf hin, dass allein durch die Vielzahl an Reifen, die über ein und dieselbe Oberfläche gefahren sind, eine Streuung um die mittlere Pegeldifferenz von ± 3 dB(A) auftreten kann. Aus diesem Grund ist es erforderlich, definierte Randbedingungen (Messreifen, Geschwindigkeit, Temperatur, usw.) zu schaffen, um das Lärmverhalten unterschiedlicher Oberflächenarten bewerten zu können.

2.5.3.2 Griffigkeitsmessungen

Die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche ist neben dem Lärmverhalten die wichtigste sekundäre Eigenschaft einer Fahrbahnoberfläche. Schon seit ca. 1920 wurde in Deutschland zur Verbesserung der Fahrsicherheit intensiv an Verfahren zur Messung und Bewertung der Griffigkeits-

eigenschaften von Fahrbahnoberflächen geforscht. Verschiedene Geräte zur Bestimmung eines Gleitbeiwertes wurden dabei entwickelt bzw. deren Relevanz zur Bestimmung der Griffigkeit überprüft. [46], [47], [49], [64]

Für die Erfassung der Griffigkeitseigenschaften von Fahrbahnoberflächen wurden stationäre und instationäre (= fahrende) Messsysteme entwickelt. Die wesentliche Forderung an ein Griffigkeitsmessverfahren ist das Bereitstellen einer Kenngröße, die eine relativ gute Aussagefähigkeit hinsichtlich der Zielgröße Verkehrssicherheit bei Nässe liefert. [63]

Das am weitesten verbreitete stationäre Gerät zur Abschätzung der Griffigkeit ist der sog. Skid Resistance Tester (SRT; SRT-Pendel) (vgl. Anhang B). Das Gerät wurde in den 1950 Jahren von dem britischen Road Research Laboratory entwickelt und ist ein tragbares Handmessgerät, das im Labor und in situ eingesetzt werden kann. In Deutschland wurde das Gerät 1972 in Kombination mit dem weiterentwickelten Ausflussmesser nach Moore mit dem Erscheinen der 'Arbeitsanweisung für kombinierte Griffigkeits- und Rauheitsmessung mit dem Pendelgerät und dem Ausflussmesser' offiziell eingeführt [65] und entsprechend der TP Griff-StB (SRT) [66] eingesetzt. Mit dem Pendelgerät lassen sich die Griffigkeitseigenschaften einer Oberfläche vor allem für kleine Geschwindigkeiten abschätzen. Hierbei erfasst das Pendelgerät bei seinen Messungen im Wesentlichen die Wirkung der Mikrorauheit einer Oberfläche, wobei die Makrorauheit und somit das Drainagevermögen mit dem Ausflussmesser nach Moore abgeschätzt wird. Aus Vergleichsmessungen zwischen dem stationären Pendelgerät und dem im folgenden beschriebenen instationären Stuttgarter Reibungsmesser (SRM) konnte eine gute Korrelation bei einer Messgeschwindigkeit des SRM von 40 km/h erzielt werden. [32]

Instationär arbeitende Messsysteme erweisen sich als vorteilhaft gegenüber den rein stationär arbeitenden Messverfahren durch eine kontinuierliche Erfassung des Oberflächenzustandes eines Streckenabschnittes. Außerdem ist die Messmethodik trotz des größeren Aufwandes (Messfahrzeug mit messtechnischen Anbauten) insgesamt leistungsfähiger, da große Bereiche des Straßennetzes hinsichtlich des Oberflächenzustandes erfasst werden können. Die jeweiligen Verfahren weisen alle eine Apparatur mit einem Messreifen auf, der in verschiedener Art und Weise in einen kennzeichnenden Reibungszustand versetzt wird. Das erste in Deutschland vorwiegend zu Forschungszwecken in größerem Rahmen angewandte Messgerät ist der Stuttgarter Reibungsmesser (SRM; Beschreibung im Anhang B). Ein erstes Versuchsgerät wurde 1952 entwickelt [67] und seit dem technisch ständig verbessert. Die Messeinrichtung beruht auf dem Prinzip des blockierten Schlepprades, welches die Notfallbremsung eines PKWs unter definierten Randbedingungen simuliert. Der Blockiervorgang des Messreifens wird in Abständen über eine bestimmte Messlänge (ca. 20 bzw. 40 m) durchgeführt und erfolgt somit punktuell, was die Messleistung und die Aussagekraft über den tatsächlichen Oberflächenzustand letztlich einschränkt. Anfang der 1980er Jahre erfolgten aus diesem Grund erste Messungen [68] mit einem in Großbritannien entwickelten kontinuierlich messenden Messfahrzeug, der sog. SCRIM (Sideway force Coefficient Routine Investigation Machine; Beschreibung im Anhang B). In Deutschland wird heute das SKM (Seiten-Kraft-Messgerät) verwendet, das auf den gleichen Funktionsprinzipien wie die SCRIM basiert. Bei dem SKM läuft ein am Messfahrzeug befestigtes Rad schräg zur Fahrtrichtung, was zu einem seitlichen Schlupf des Messrades führt. Die Kraft, die

das Messrad in Fahrtrichtung zurückdrängen will, und die Geschwindigkeit des Messfahrzeuges werden dabei kontinuierlich erfasst. [69], [70],[71]

Das SKM hat sich in Deutschland seit den ersten Messungen im Jahre 1980 bis zum heutigen Zeitpunkt wegen der hohen Messleistung durch die kontinuierliche Messwertaufnahme als Messgerät zur Bewertung der Straßengriffigkeit gegenüber dem SRM durchgesetzt. So wurde das SKM für die Durchführung der Messungen im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) der Bundesfernstraßen Anfang der 1990 Jahre ausgewählt und ist seit dem hierfür im Einsatz [72], [73]. Mittels der ZEB werden neben den Griffigkeitseigenschaften der Fahrbahnoberflächen auch Ebenheitsmessungen und visuelle Beobachtungen durchgeführt. In dem hierfür entwickelten Notensystem von 1,0 (sehr gut) bis 5,0 (sehr schlecht) wurden die Noten 1,5, 3,5, und 4,5 als Ziel-, Warn- und Schwellenwert definiert [74]. Basierend auf dieser Grundlage wurden Grenzwerte für die Griffigkeitseigenschaften in der im Jahr 2001 eingeführten ZTV Beton-StB 01 [75], [76] festgelegt. So muss eine ausreichende Griffigkeit sowohl zum Zeitpunkt der Abnahme als auch am Ende der Verjährungsfrist nachgewiesen werden. Wird der festgelegte Grenzwert unterschritten, sind griffigkeitsverbessernde Maßnahmen zu ergreifen, wie z.B. Sandstrahlen, (rau) Schleifen, Rillenschneiden usw.

3 Versuchs- und Messeinrichtungen

3.1 Allgemeines

Die im Folgenden kurz beschriebenen Versuchs- und Messeinrichtungen wurden neben den üblichen am Beton (z.B. Konsistenz-, Festigkeitsprüfung) oder an den Oberflächen (z.B. mittlere Oberflächentexturtiefe, SRT-Pendel) durchgeführten Prüfungen im Rahmen der eigenen Untersuchungen eingesetzt.

3.2 Bestimmung der Dicke des Oberflächenmörtels

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, entsteht beim Einbau des Betons durch die Einwirkung der Verdichtung an der Oberfläche eine Mörtelschicht, die neben einer bestimmten Zusammensetzung auch eine bestimmte Dicke aufweist. Die Mörtelschicht kann durch die Dicke und die Zusammensetzung eindeutig charakterisiert werden. Die Dicke der frischen Mörtelschicht wurde von Dames und Sulten [9] erstmals im Zusammenhang mit dem Betonstraßenbau bestimmt. In Anlehnung an diese Vorgehensweise wurde in den hier durchgeführten Untersuchungen wie folgt verfahren.

Nach dem Verdichtungsvorgang wird mittels eines abgerundetem Stahllineals der entstandene Oberflächenmörtel entfernt, indem die abgerundete Kante über die groben Gesteinsköpfe des definitionsgemäß nach [8] und [9] unterhalb des Oberflächenmörtels liegenden Betons gleitet und diesen entfernt. Anhand der Mörtelmasse, der freigelegten Fläche und der Mörtelrohichte lässt sich eine Mörtelschichtdicke berechnen. Diese stellt am untersuchten Bereich einen integralen Kennwert dar und wird über folgenden Zusammenhang ermittelt:

$$h = \frac{m}{l \cdot b \cdot \rho} \quad \text{Gleichung 1}$$

- h: Dicke der Mörtelschicht in [mm]
- m: Masse des Oberflächenmörtels von dem abgezogenen Bereich in [g]
- l: Länge des abgezogenen Bereichs in [mm]
- b: Breite des abgezogenen Bereichs in [mm]
- ρ : Rohdichte des frischen, abgezogenen Oberflächenmörtels in [g/mm³]

Separate Untersuchungen zeigten, dass die am Frischbeton bestimmte rechnerische Mörtelschichtdicke der des Festbetons entspricht, vgl. Bild 14.

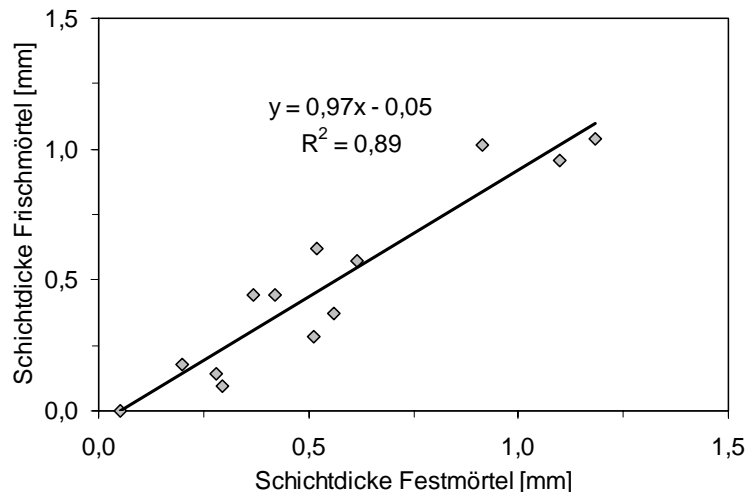


Bild 14: Zusammenhang zwischen der am Frischbeton und der am Festbeton bestimmten rechnerischen Mörtelschichtdicke

Zu den Prüfzeitpunkten des Frischbetons wurden zusätzlich Parallelproben hergestellt, die im Anschluss erhitzen konnten. Aus diesen Proben wurden in ausreichender Anzahl (ca. 8 – 12) Zylinder ($\varnothing = 50$ mm) entnommen. Anschließend wurde der Oberflächenmörtel der Zylinder mittels einer Präzisionsschleifmaschine (Genauigkeit des vertikalen Hubs = $1,0 \mu\text{m}$) soweit abgetragen bis der Kopf eines groben Gesteinskorns sichtbar wurde. Wie in Bild 14 zu erkennen, zeigen die Ergebnisse insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der an frischen und der an erhärteten Parallelproben bestimmten rechnerischen Mörtelschichtdicken.

3.3 Messungen der Oberflächen mit dem Doppeltriangulationssensor

3.3.1 Durchführung der Messung

Für die Untersuchungen im Zusammenhang mit der Textur und deren Veränderungen durch Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt wurden neben der Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe sowie der Bestimmung der Griffigkeitseigenschaften mit dem SRT-Pendel auch berührungslose Messungen mit einem Doppeltriangulationssensor durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise ist im Anhang B enthalten.

Die Oberfläche der Probekörper wird von dem Messgerät in Flächenmitte abgetastet. Das dortige Messfeld besteht aus 512 Messlinien, die jeweils aus 2048 Messpunkten bestehen. Mit einem minimal möglichen Messpunktabstand von $30 \mu\text{m}$ wird dabei eine Fläche von $15,36 \times 61,44 \text{ mm}^2$ erfasst. Um die hohe Genauigkeit auch bei einem Aus- und erneutem Einbau der Probe zu gewährleisten, wird die Probe definiert positioniert. Zur Fixierung der Probekörper wurde eine Grundplatte auf den x-y-Tisch fest montiert, auf dem zwei zylindrische Zapfen angeschraubt sind. In die Probekörper selbst werden Führungshülsen eingebracht. Die quantitative Untersuchung der Genauigkeit bei einem Aus- und Wiedereinbau eines Probekörpers, ergab eine Abweichung der ermittelten Texturkennwerte von weniger als 1 %. [11]

3.3.2 Auswertung der Messdaten

Bei der Auswertung der Texturmessungen mit dem Doppeltriangulationssensor wurden die jeweiligen Wellenlängenbereiche der Mikro- und Makrotextur (bis $\lambda = 10$ mm), wegen ihrer unterschiedlichen Bedeutung für das Gebrauchsverhalten der Fahrbahnoberfläche, getrennt untersucht. Für die Analyse wurden grundsätzlich zwei Verfahren verwendet, die Analyse des Wellenlängen-Amplituden-Spektrums sowie die der Materialanteilkurve. Die Eignung beider Verfahren für die Durchführung von Dauerhaftigkeitsbetrachtungen der Textur wurde bereits in [11] nachgewiesen..

Analyse des Wellenlängen-Amplituden-Spektrums

Die für die Griffigkeit und das Lärmverhalten einer Fahrbahndecke relevanten Bereiche der Mikro- und Makrotextur können mit den sog. Mikro- bzw. Makrokennamplitudenwerten beschrieben werden. Diese Kenngrößen ergeben sich allgemein durch Bestimmung der Regressionsgerade des Wellenlängen-Amplituden-Spektrums des jeweiligen Texturbereichs. Mittels dieser erfolgt die Bestimmung einer Amplitudenhöhe, die zu einer Wellenlänge zugehörig ist. Zu der Bezugswellenlänge $\lambda = 0,5$ mm ergibt sich ein Wert der Kennamplitude 'A_{μ0,5}' und zu der Bezugswellenlänge $\lambda = 5$ mm ein Wert der Kennamplitude 'A_{M5,0}' (detaillierte Beschreibung der Ermittlung der Kennwerte im Anhang B). Eine Abnahme des jeweiligen Kennwertes weist auf einen Höhenverlust der Amplituden des jeweiligen Wellenlängenbereiches hin. Im Bereich der Mikrotextur deutet die Abnahme des Mikrokennamplitudenwerts A_{μ0,5} auf ein Polieren oder dessen Zunahme auf ein Aufrauen hin. Die ermittelten Kennwerte der Mikro- und Makrotextur erlauben zudem eine Einordnung der texturierten Oberflächen hinsichtlich der vorliegenden Texturart, da jede Textur (Jutetuch-, Besen-, Kunstrasenlängsstrich usw.) in ihrem unbelasteten Zustand, ein bestimmtes Verhältnis von Mikro- zu Makrotextur aufweist (Bild 15). [11]

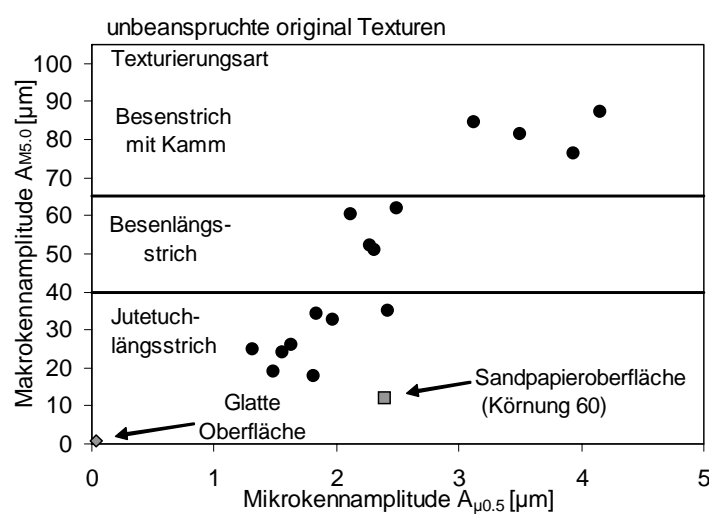


Bild 15: Diagramm zum Einordnen der Texturart mit Hilfe der Mikro- und Makrotexturkennwerte [11]

Diese Einteilung ist im Zusammenhang mit der labortechnischen Untersuchung von texturierten Oberflächen notwendig, da sich die Herstellung von Texturen in der Praxis nicht unmittelbar in das Labor übertragen lässt. Betrachtet man beispielsweise die Herstellung eines Jutetuchlängsstrichs in der Praxis mit der im Labor, so ist es wegen den Probekörperabmessungen kaum möglich, den Einfluss der Schleplänge des Jutetuches zu erfassen. Mit Hilfe von Bild 15 kann im Labor neben einem qualitativen auch ein quantitativer Nachweis der Praxisnähe der eingebrachten Texturierung erfolgen. [11]

Analyse der Materialanteilkurve

Für eine detaillierte Betrachtung der Makrotextur eignet sich vor allem die Bestimmung von Oberflächenkennwerten, die aus der Materialanteilkurve abgeleitet werden. Die Materialanteilkurve beschreibt die Materialverteilung eines Rauheitsprofils über dessen Höhe. Dabei wird der Flächenanteil einer Profillinie über Schnittebenen, die in konstanten Abständen über die Höhe z gelegt werden, als Summenlinie dargestellt, wobei von oben nach unten aufsummiert wird (vgl. Bild 16). [52]

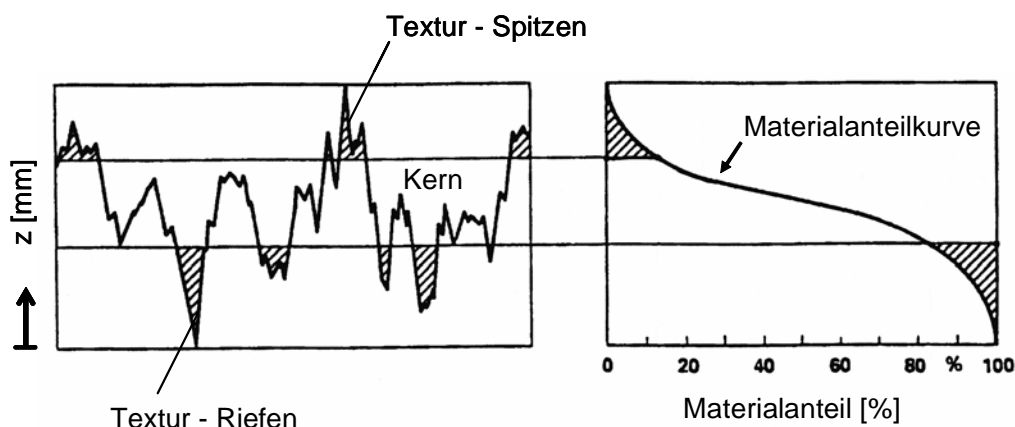


Bild 16: links: Profilschnitt mit den jeweiligen Profilbereichen
rechts: Materialanteilkurve, nach [52]

Der Verlauf dieser Materialanteilkurve ist charakteristisch für jedes Profil. Sie ist zudem für mechanisch hoch beanspruchte Flächen von Bedeutung, da Informationen sowohl über die Rautiefe als auch über die Profilform enthalten sind, d.h. Texturprofile etwa gleicher mittlerer Oberflächentexturtiefe, aber mit unterschiedlichem Profilverlauf können unterschieden werden (vgl. Bild 17). Zudem erweist sich ein Oberflächenprofil umso widerstandsfähiger gegenüber einer mechanischen Beanspruchung, desto geringer die Höhe des Kernbereiches ist. [77], [78]

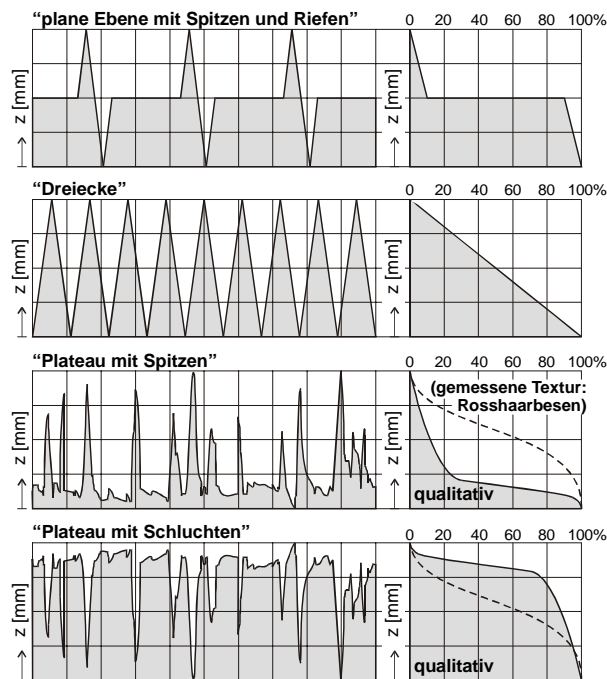


Bild 17: Materialanteilkurven für unterschiedliche Profile mit gleicher Texturtiefe [77]

Die jeweiligen Profilverläufe in Bild 17 besitzen alle die gleiche Rautiefe zudem sind die beiden unteren jeweils das Spiegelbild des anderen Profilverlaufs. Eine alleinige, wie zuvor dargestellte, frequenzanalytische Auswertung der beiden unteren Profilverläufe, würde für beide Profilverläufe die gleichen Kennwerte ergeben. Diese beruht auf der Methodik der Frequenzanalyse selbst, da bei der Berechnung des Wellenlängen-Amplituden-Spektrums sinusförmige Wellen und deren zugehörige Amplituden im Profilverlauf ermittelt werden. Diese erfolgt unabhängig davon, ob die jeweilige Wellenlänge oberhalb oder unterhalb ihres Verlaufs Material aufweist.

Aus der Materialanteilkurve können entsprechend der DIN EN ISO 13565 Teil 2 [78] Kennwerte abgeleitet werden, wobei die Methodik auf den Erkenntnissen beruht, die mit der Materialanteilkurve im Maschinenbau von Bodschiwna [77] gewonnen wurden. Die Auswertung selbst sollte nur für ‘S’-förmige Materialanteilkurven mit einem Wendepunkt angewendet werden und definiert einen Spitzen-, Kern-, und Riefenbereich einer Oberfläche und deren jeweiligen Materialanteil. Eine Beschreibung der Auswertemethodik ist im Anhang B enthalten.

Für den Bereich der Makrotextur einer Fahrbahnoberfläche kann durch Verwendung von Kennwerten aus der Materialanteilkurve neben der Information, wie sich die Profilhöhe ändert, auch abgeleitet werden, in welchen Profilhöhen diese Veränderung stattfindet. Bei der Verwendung der normativen Vorgehensweise zeigte sich jedoch, dass sich diese nur bedingt für eine Beschreibung der funktionsrelevanten Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen eignet. Denn im Bereich der Profilschulden und der Profiltiefen, die für das Gebrauchsverhalten einer Fahrbahndecke (Lärmemission, Griffbarkeit) besonders wichtig sind, werden bei der normativen Auswertung die Höhen definiert reduziert (vgl. Bild A 11 im Anhang B).

Zur Verdeutlichung ist in Tabelle 1 eine Auswertung der Texturdaten einer Oberfläche mit Jutetuchlängsstrich und einer Waschbetonoberfläche mit der in DIN EN ISO 13565 Teil 2 [78] beschriebenen Auswertemethodik dargestellt. Zu beachten ist, dass die Auswertung von

3-dimensionalen Profildaten, wie dies hier durchgeführt wurde, noch nicht verbindlich genormt ist und deshalb nur in Anlehnung an die DIN EN ISO 13565 Teil 2 [78] erfolgen kann. Eine generelle Definition von Oberflächenparametern für 3-dimensionale Profildaten ist aber in Planung. Zusätzlich ist in der Spalte 6 noch die maximale Höhendifferenz zwischen dem tiefsten und dem höchsten gemessenen Punkt angegeben.

Tabelle 1: Oberflächenparameter aus der Materialanteilkurve in Anlehnung an DIN EN ISO 13565 Teil 2 [78]

Oberflächentextur	Höhe der Profilspitzen	Höhe des Kerns	Höhe der Profiliriefen	Gesamthöhe des Profils	maximale Höhe
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6
Waschbeton 0/8	0,47	0,67	0,15	1,29	1,82
Jutetuch	0,26	0,10	0,13	0,49	0,82

Ein Vergleich der Summe der einzelnen Teilhöhen (Spalte 5) mit der maximalen Höhen (Spalte 6) zeigt, dass bei beiden Oberflächen die aus der Materialanteilkurve ermittelten Werte in der Summe um bis zu 40 % unter der maximalen Höhe liegen. D.h. gut ein Drittel der Höheninformation ist vor allem durch die Reduktion der Spitzenhöhe und der Riefentiefe ‘verloren gegangen’. Diese Ungenauigkeit kann bei der Untersuchung von Fahrbahnoberflächen hinsichtlich deren Gebrauchseigenschaften nicht erwünscht sein, da gerade die Informationen über die Höhen der einzelnen Texturbereiche Aufschluss über die Funktionseigenschaften der Textur geben. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine ähnliche und vereinfachte Auswertemethodik vorgestellt, mit der die Einteilung der Materialanteilkurve in die drei Bereiche (Spitze, Kern, Riefe) anhand signifikanter und aussagekräftiger geometrischer Werte durchgeführt wird.

Die Materialanteilkurve weist in ihrem Verlauf einen Krümmungswechsel auf. Dies ist im Kurvenverlauf der Punkt mit dem größten Materialzuwachs pro Höhenschritt. Er teilt den Verlauf der Materialanteilkurve und somit auch den Profilverlauf in zwei Bereiche, den Bereich mit überwiegender Anteil an Spitzen bzw. Riefen (vgl. Bild 18).

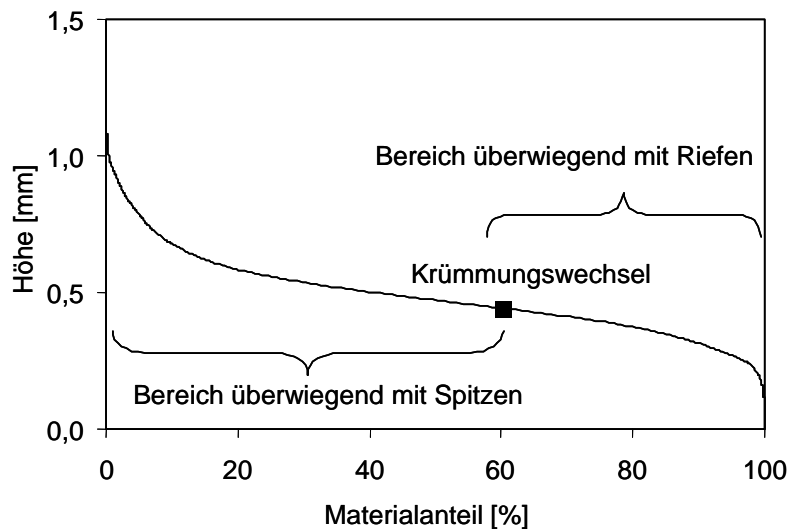


Bild 18: Graphische Darstellung der Einteilung des Verlaufs einer Materialanteilkurve in einen Bereich mit überwiegend Spitzen und überwiegend Riefen

Diese Einteilung ist aber noch nicht ausreichend, um ein Texturprofil anhand der Materialanteilkurve genau genug zu beschreiben. Ähnliche Texturen wie zum Beispiel Jutetuchlängsstrich oder Kunstrasenlängsstrich sind wegen der vergleichbaren Verteilung der Spitzen und Riefen nicht deutlich genug zu differenzieren. Aus diesem Grund muss der Spitzen- und der Riefenbereich nochmals separat betrachtet werden. Die Konstruktion zweier Geraden (Punkt des Krümmungswechsels bis zum höchsten bzw. tiefsten Profilpunkt) sowie die Bestimmung der beiden maximalen Abstände zwischen den Geraden und des Profilverlaufs, liefern zwei weitere signifikante Punkte. Diese beiden Punkte kennzeichnen den Übergang vom Kern zum Spitzen- bzw. Riefenbereich, (vgl. Bild 19).

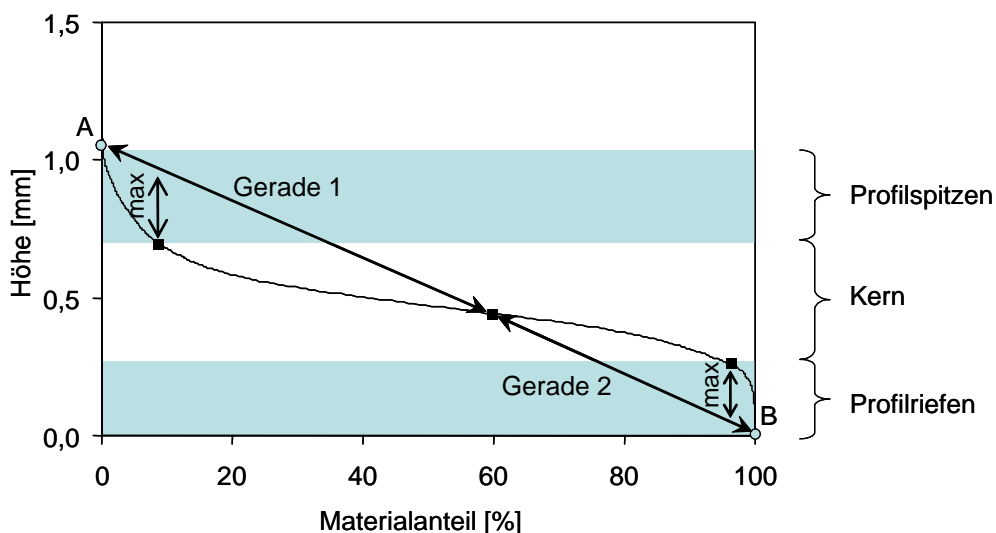


Bild 19: Graphische Darstellung der Definition von Kenngrößen eines Texturprofils mit der Materialanteilkurve

Das Profil kann nun unterteilt werden in einen Bereich

- der Profilspitzen
- des Kerns
- der Profiltriefen.

Diese drei Bereiche weisen jeder für sich eine bestimmte Höhe auf, wobei die Summe aus allen drei Teilhöhen wiederum die Gesamthöhe ergibt. Die Auswertung der Materialanteilkurven, die zuvor mit der normierten Vorgehensweise charakterisiert wurden (Tabelle 1), ergibt mit der beschriebenen vereinfachten Auswertemethodik die in Tabelle 2 dargestellten Kennwerte.

Tabelle 2: Kennwerte der Materialanteilkurven, die mit dem vereinfachten Verfahren bestimmt wurden

Oberflächentextur	Höhe der Profilspitzen	Höhe des Kerns	Höhe der Profiltriefen	Gesamthöhe des Profils	maximale Höhe
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6
Waschbeton 0/8	0,74	0,73	0,35	1,82	1,82
Jutetuch	0,21	0,30	0,31	0,82	0,82

Anhand der Werte in den Spalten 5 und 6 der Tabelle 2 ist deutlich zu erkennen, dass die Gesamthöhe des Profils mit der maximalen Höhe identisch ist. Somit konnte gezeigt werden, dass mit der vereinfachten Auswertemethodik das gesamte Profil erfasst und ausgewertet wird.

3.3.3 Zusammenhang zwischen primären und sekundären Oberflächenkenngrößen

Im Folgenden werden von unbeanspruchten Oberflächen die zuvor eingeführten primären Kenngrößen der Mikro- und Makrotextur jeweils den sekundären Kenngrößen vergleichend gegenübergestellt. Bei den primären Kenngrößen eignet sich zur Beschreibung der Mikrotextur der sich aus dem Wellenlängen-Amplituden-Spektrum abgeleitete Mikrokennamplitudenwert $A_{\mu 0,5}$. Für den Bereich der Makrotextur werden die Ergebnisse der vereinfachten Auswertemethodik der Materialanteilkurve verwendet. Bei den sekundären Kenngrößen gilt der Messwert des SRT-Pendels (vgl. Kapitel 2.5.3.2) als Kennwert der Mikrotextur. Die sekundäre Kenngröße der Makrotextur ist hier die mittlere Oberflächentexturtiefe. Streng genommen handelt es sich bei der mittleren Oberflächentexturtiefe ebenfalls um eine primäre Kenngröße, jedoch sind wegen der langjährigen Verwendung Zusammenhänge zwischen der mittleren Oberflächentexturtiefe und dem Lärm- und Griffigkeitsverhalten bekannt.

In Bild 20 ist von jeder untersuchten Oberfläche der Messwert des SRT-Pendels dem jeweiligen Mikrokennamplitudenwert gegenübergestellt. Die untersuchten Oberflächen wiesen zum Zeitpunkt der Untersuchungen den ursprünglichen unbeanspruchten Zustand der Texturgeometrie auf. Neben den drei verschiedenen Texturgeometrien Jutetuchlängsstrich, Jutetuchlängsstrich mit

Kamm und Besenlängsstrich wurden eine Sandpapieroberfläche sowie eine glatte Oberfläche in die Untersuchungen mit einbezogen.

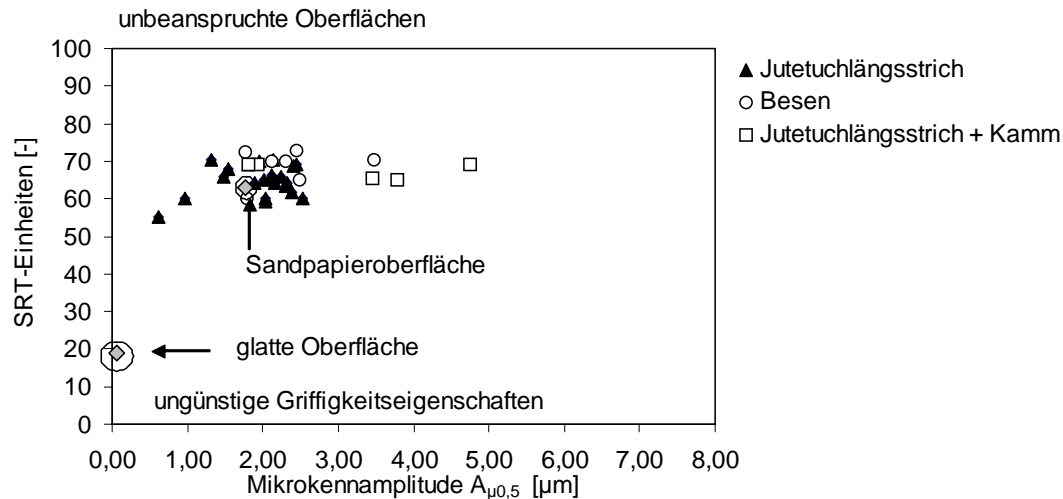


Bild 20: Gegenüberstellung Mikrokennamplitudewerte und dem Messwert des SRT-Pendels

Anhand der Ergebnisse zeigte sich, dass mit dem Mikrokennamplitudenwert $A_{\mu,0,5}$ und dem Messwert des SRT-Pendels zwischen Oberflächen mit und ohne Feinrauheit unterschieden werden kann. Jedoch kann zwischen der berührungslos gemessenen Feinrauheit und der sich mit dem SRT-Pendel gemessenen Griffigkeitseigenschaften, die sich entsprechend der Messmethodik überwiegend aus der Feinrauheit ergibt, kein eindeutiger Zusammenhang abgeleitet werden.

Als Gründe hierfür sind neben der unterschiedlichen Messgenauigkeit beider Verfahren, was sich zum Beispiel auch in dem engeren Wertebereich der SRT-Werte im Vergleich zu den Werten der Mikrokennamplituden $A_{\mu,0,5}$ zeigt, in der Aktivierbarkeit der Feinrauheit gesehen werden. D.h. die Feinrauheit, die sich z.B. in tiefen Texturrillen befindet, kann zwar mit einem berührungslosen Messgerät erfasst werden steht aber für die Griffigkeit nicht unmittelbar zur Verfügung. Dies ist beispielsweise bei den Oberflächen mit einem Jutetuchlängsstrich mit Kamm erkennbar, welche einen großen Wert der Mikrokennamplitude aufweisen, der zu keinem bedeutenden Griffigkeitszuwachs bei der Messung mit dem SRT-Pendel führt. Zwar wird der Messwert des SRT-Pendels auch von der Makrorauigkeit einer Oberfläche beeinflusst, jedoch konnte kein Zusammenhang der Kennwerte (Profilspitzen, Kern, Profilliefen), die aus der Materialanteilkurve abgeleitet wurden, mit den Messergebnissen des SRT-Pendels festgestellt werden.

Mit der zuvor vorgestellten Methodik für die Bestimmung von Kennwerten aus der Materialanteilkurve ist nicht nur eine getrennte Analyse der verschiedenen Texturbereiche möglich, sondern die sich aus der Materialanteilkurve ergebende Gesamthöhe korreliert mit der mittleren Oberflächentexturtiefe nach DIN EN 13036 Teil 2 [78], vgl. Bild 21.

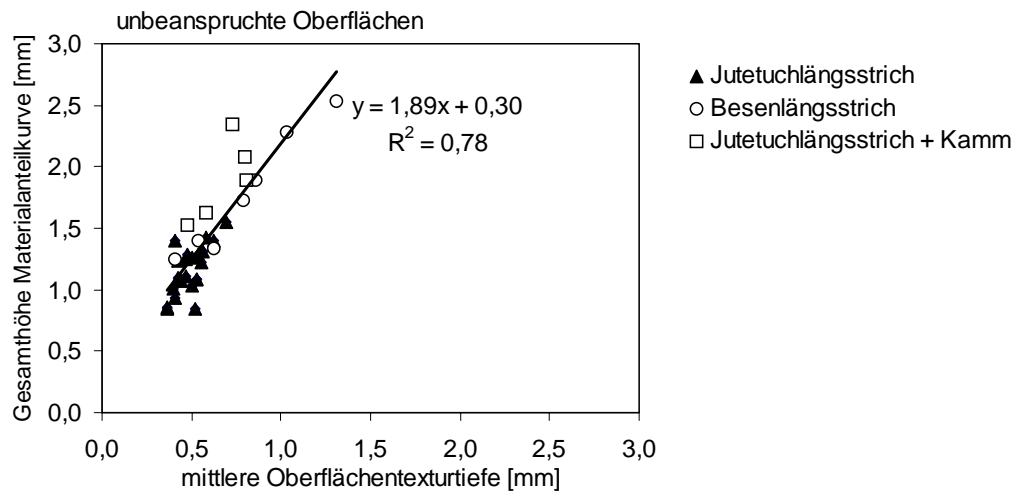


Bild 21: Korrelation der Gesamthöhe der Materialanteilkurve und der mittleren Oberflächentexturtiefe nach DIN EN 13036 Teil 2 [78]

Gut zu erkennen ist, dass sich der Zusammenhang für stark wie auch für weniger stark ausgeprägte Texturen ergibt. Insgesamt sind die Gesamthöhen, die sich aus der Materialanteilkurve ergeben fast doppelt so groß wie die mittlere Oberflächentexturtiefe. Dies beruht auf der unterschiedlichen Messgenauigkeit der beiden Messverfahren. Mit einer lateralen Auflösung von $30\ \mu\text{m}$ und einer vertikalen Auflösung von $0,3\ \mu\text{m}$ erfasst der Doppeltriangulationssensor andere Tiefenbereiche als das mit den Glaskugeln ($180\ \mu\text{m} \leq \varnothing \leq 250\ \mu\text{m}$) bei Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe möglich ist.

3.4 Simulation der Beanspruchungen von Fahrbahnoberflächen im Labor

3.4.1 Allgemeines

Fahrbahnoberflächen werden, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, durch Einwirkungen aus dem Verkehr und der Umwelt beansprucht und verändert. Die Veränderungen führen im Extremfall zu einem Verlust der wesentlichen Gebrauchseigenschaft, wie z.B. der Griffbarkeit, welche dann zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit unter hohen Kostenaufwendungen wieder hergestellt werden muss.

In Laborversuchen wurde schon früh versucht, verschiedene Einflüsse, welche die Griffbarkeit vor allem bei nassen Fahrbahnverhältnissen beeinflussen, zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Versuchseinrichtungen konzipiert, die die Beanspruchungen, welchen die Fahrbahnoberfläche in der Praxis unterworfen ist, möglichst praxisnah aber auch zeitraffend simulieren. Zwischen 1960 und 1970 wurden aufgrund der Spikereifen Problematik¹, die sich in einer starken Spurrillenbildung infolge der sehr hohen Verschleißbeanspruchung vor allem bei Asphaltdecken zeigte, verschiedenste Prüfmethode und -apparaturen zur Optimierung der Mischgutzusammensetzung entwickelt und angewendet. Die weitere Forschungstätigkeit hinsichtlich neuer Laborprüfmethode widmete sich nach 1974 überwiegend der polierenden Beanspruchung. Dabei

¹ Spikebereifung wurde zum 1. Januar 1975 auf deutschen Autobahnen verboten

wurden die verschiedensten Einflüsse auf die Polierbarkeit und somit die Ursachen eines Griffigkeitsverlustes untersucht. [33], [34], [79], [80]

Aufrauende Effekte durch den Einfluss der Witterung wurden zu diesem Zeitpunkt bereits ansatzweise durch die Beaufschlagung von Betonoberflächen mit Salzsäure betrachtet, wobei die Entwicklung eines Prüfverfahrens, das die Umwelteinwirkungen (Regen und Frost-Tausalz-Angriff) berücksichtigt, erst in den letzten Jahren stattgefunden hatte.

3.4.2 Der kombinierte Laborbeanspruchungszyklus

Für Untersuchungen zu verschiedenen Einflüssen auf die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton wurde von Schießl et al. [11] ein realitätsnaher und zeittraffender kombinierter Laborbeanspruchungszyklus verwendet, der eine Abfolge aus mechanischem, Frost-Tausalz und lösendem Angriff beinhaltet, vgl. Bild 22.

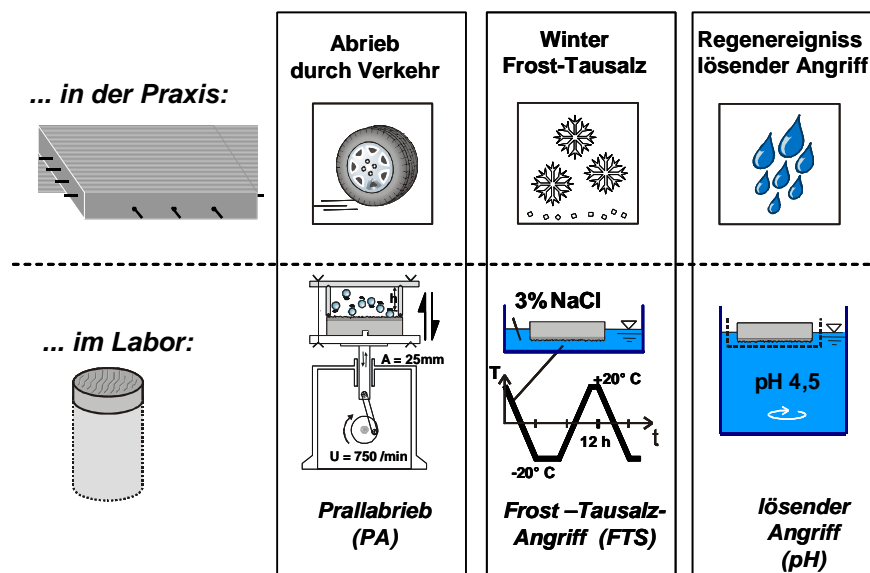


Bild 22: oben: schematische Darstellung der Einzelbeanspruchungen in der Praxis
unten: schematische Darstellung der Einzelbeanspruchungen, zur Simulation der Praxisbeanspruchungen im Labor [11]

Simulation des mechanischen Angriffs

Die mechanische Beanspruchung durch den Verkehr stellt eine polierende und somit überwiegend griffigkeitsmindernde Form der Beanspruchung dar. Zusätzlich erfolgt durch die nacheinander auftreffenden Profilklotzchen auch eine schlagende Verschleißbeanspruchung. Diese Form der Beanspruchung ist auch bei der Entstehung des Reifen/Fahrbahngeräusches als ein Mechanismus bekannt. [29], [33], [34], [81]

Diese Form der Beanspruchung kann im Labor mit dem sog. Prallabtriebgerät simuliert werden, das im Jahr 1977 an der TU München für Untersuchungen zum Verschleißwiderstand von Oberflächen bei Benutzung von Spikebereifung entwickelt und eingesetzt wurde und zwischenzeitlich auch Eingang in die Normung gefunden hat. In diesen früheren Untersuchungen wurde mit diesem Verfahren zudem der Polierwiderstand von grober Gesteinskörnung von Fahrbahndecken aus Beton und Asphalt untersucht. Hierzu wurde nach dem Freilegen der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche durch Verwendung von Stahlkugeln, diese durch Einsatz von Gummikugeln poliert. [33], [82]

Für die Simulation der mechanischen Beanspruchung des Verkehrs im Zusammenhang mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus wird der Versuchsaufbau in folgender Art verwendet. In der Prallkammer befinden sich Gummikugeln aus Polyurethan (Shore Härte $A = 80^\circ \pm 5^\circ$; $d = 30 \text{ mm}$), die durch eine Schüttelbewegung auf die Oberfläche prallen. Die Prallhöhe entspricht etwa $3 \cdot d = 90 \text{ mm}$, die Schüttelfrequenz 750 min^{-1} und die Versuchsdauer beträgt pro Einzelbeanspruchung 5 Minuten. Die Dauer der Einzelbeanspruchung wurde auf 5 Minuten begrenzt, um ein unzulässiges Aufwärmen der Kugeln zu vermeiden. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaues befindet sich im Anhang B.

Simulation des Frost-Tausalz-Angriffs

Der Frost-Tausalz-Angriff (FTS) kann unter Laborbedingungen sehr realitätsnah und mit hoher Reproduzierbarkeit mit dem sog. CDF-Test (CDF: Capillary Suction of Deicing Chemicals and Freeze-Thaw) simuliert werden, der z.B. in der DIN EN 12390 Teil 9 [83] oder dem Merkblatt vom BAW [84] beschrieben ist. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsablaufes befindet sich im Anhang C. Für die Simulation des Frost-Tausalz-Angriffs (FTS) im Zusammenhang mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus werden die Proben 6 Frost-Tau-Zyklen ausgesetzt, während die Oberflächen in die Tausalzlösung (3 %ige NaCl-Lösung) eingetaucht sind. Auf ein kapillares Saugen vor der Prüfung und die damit verbundene höhere Porensättigung wird verzichtet, um die Beanspruchung zu verringern. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaues befindet sich im Anhang B.

Simulation des lösenden Angriffs

Die Simulation des lösenden Angriffs im Labor erfolgt während des Laborbeanspruchungszyklus mit einem konstanten lösenden Angriff bei einem pH-Wert von 4,5 auf die (eingetauchte) Betonoberfläche für die Dauer von 1 Stunde bei 20°C . Das Prüfmedium, eine gepufferte Essigsäure, wird hierbei ständig umgewälzt. Der Versuchsablauf wurde von Dorner und Hilbig [85] entwickelt. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchseinrichtung ist im Anhang C enthalten.

Ablauf des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Die Dauer der Einzelbeanspruchungen wurde unter Berücksichtigung von aus der Praxis bekannten Texturveränderungen festgelegt. Dabei erfolgt im Standardzyklus der lösende Angriff

für eine Stunde, der folgende Prallabrieb (PA) für 3 x 5 min, 6 Zyklen des Frost-Tausalz-Angriffs (FTS) sowie weitere 5 min Prallabrieb (PAII). Somit ist jeder mechanischen Beanspruchung eine Umweltbeanspruchung vorgeschaltet (vgl. Bild 23).

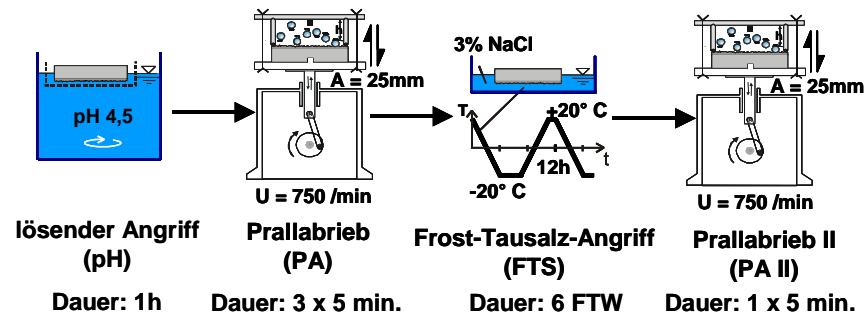


Bild 23: Abfolge der Einzelbeanspruchungen des Laborbeanspruchungszyklus [11]

Die einzelnen Messungen zur Bestimmung der primären und sekundären Oberflächeneigenschaften werden jeweils vor bzw. nach der jeweiligen Beanspruchung durchgeführt. Hieraus ergibt sich ein 'zeitlicher' Verlauf der Änderungen der Oberflächenparameter. [11]

3.4.3 Prüfanlage Wehner/Schulze

In den 1960 Jahren wurde von Prof. Dr. B. Wehner und Dr. K.-H. Schulze ein Labor-Griffigkeitsmessgerät entwickelt, mit dem die mechanische Verkehrseinwirkung auf Fahrbahnoberflächen simuliert und die Veränderung der Griffigkeit gemessen werden kann [34], [86]. Mit dieser Prüfapparatur wurden dann erste orientierende Untersuchungen von Walz und Bonzel [80], [87] bezüglich des Einflusses der Betonzusammensetzung und der Oberflächengestalt von Betonfahrbahndecken auf deren Abnutzbarkeit und Griffigkeit durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse konnten erste Anhaltspunkte der Parameter geben, welche die Dauerhaftigkeit von Oberflächeneigenschaften beeinflussen. Dabei zeigte sich auch, dass neben der rein polierenden Beanspruchung auch die Umweltbeanspruchungen (aufrauende) Auswirkungen auf die Oberflächeneigenschaften haben.

Huschek konnte in seinen Untersuchungen [88], [89] bezüglich der Übertragbarkeit der Messungen im Labor mit denen auf einer Praxisstrecke einen Zusammenhang für Fahrbahndecken aus Asphalt herleiten und bestätigen. Die Untersuchungen ergaben einen Zusammenhang zwischen dem in der Praxis auf Asphaltbelag gemessenen Griffigkeitswert mit dem SKM (μSKM) mit dem Messwert, der mit der Prüfanlage (μPWS) ermittelt wird. So können Oberflächen, die im Labor einen μPWS -Wert $> 0,400$ aufweisen, als ausreichend griffig bezeichnet werden.

Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde der Mess- und Prüfzyklus den Ergebnissen der Untersuchungen bezüglich der Eignung unterschiedlicher Geräte zur

Prognose von Griffigkeitskennwerten [90] angepasst. Der wesentliche Unterschied zu dem bisherigen an der TU Berlin entwickelten Prüfablauf ist vor allem die Verlängerung der Dauer der Polierbeanspruchung von 60 Minuten (90.000 Überrollungen) auf 180 Minuten (270.000 Überrollungen).

4 Einfluss der Texturgeometrie auf die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften

4.1 Allgemeines

Die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften von Verkehrsflächen aus Beton umfassten zuerst den Einfluss der Texturgeometrie selbst, da diese maßgeblich das Gebrauchsverhalten einer Fahrbahnoberfläche beeinflusst.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Beständigkeit verschiedener Texturgeometrien gegenüber den Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt anhand von Untersuchungen an einer Praxisstrecke sowie von Laborversuchen beurteilt. Anhand der Erprobungsstrecke wurden zwei unterschiedliche Texturgeometrien untersucht. Die Untersuchungen im Labor knüpften an die Erkenntnisse der betrachteten Praxisstrecke an. Dabei wurde das Verhalten im Labor simulierter Texturgeometrien während des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus betrachtet.

4.2 Untersuchungen an einer Praxisstrecke

4.2.1 Beschreibung der Praxisstrecke (BAB A44)

Im Rahmen der Erneuerung des Hauptfahrstreifens und des Standstreifens der BAB A44 bei Soest/NRW wurde auf einem Autobahnabschnitt eine Erprobungsstrecke von rd. 2 km Länge von km 109,142 bis km 111,157 (Fahrtrichtung Dortmund) errichtet. Die Erprobungsstrecke wurde mit einem Gleitschalungsfertiger in einschichtiger Bauweise über eine Breite von 7,00 m im März 1999 eingebaut und im April 1999 dem Verkehr übergeben [91].

Die Ausführung der Erprobungsstrecke umfasste die Verwendung unterschiedlich fester Betone, nämlich zweier normalfester Betone A44_B35 und A44_B45 sowie eines hochfesten Betons A44_B65, die im Rahmen des Forschungsvorhabens 'Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von hochfestem Straßenbeton Teile I+II' [92] hinsichtlich der Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht wurden (vgl. hierzu Anhang C). Zudem wurden hier die jeweiligen Betonoberflächen mit einem Jutetuchlängsstrich, einem Jutetuchlängsstrich plus Kamm, einem Besenlängsstrich, einem Besenlängsstrich plus Kamm und einem Stahlbesenquerstrich versehen, um deren Potential für eine Minderung des Reifenrollgeräusches und deren Einfluss auf die Griffigkeitseigenschaften zu untersuchen. Bilder von der Herstellung der jeweiligen Texturen und von dem Aufbau der Erprobungsstrecke befinden sich im Anhang C.

4.2.2 An der Praxisstrecke durchgeführte Untersuchungen

4.2.2.1 Frischbetoneigenschaften [91], [92]

Während der Herstellung wurden neben den Frischbetoneigenschaften wie der Konsistenz und dem Luftporengehalt des Frischbetons auch die Eigenschaften des Oberflächenmörtels (rechnerische Mörtelschichtdicke, Wassergehalt) der jeweiligen Betone untersucht (Ergebnisse vgl. Anhang C). Hierbei zeigte sich, dass die Konsistenz des Frischbetons einen Einfluss auf die Entstehung des Oberflächenmörtels und somit einen direkten Einfluss auf die sich einstellende Mörtelschichtdicke besitzt. Der hochfeste Straßenbeton wies insgesamt eine sehr steife Konsistenz ($v = 1,40$) auf, was zu einer Dicke der Mörtelschicht von 0,50 mm führte. Im Gegensatz dazu hatte der normalfeste Straßenbeton B45 ein Verdichtungsmaß von 1,26 und eine rechnerische Mörtelschichtdicke von 0,74 mm. Die steife Konsistenz des hochfesten Straßenbetons führte in diesem Fall nicht nur zu einer dünneren Mörtelschicht, sondern erforderte auch bei der Texturierung ein Beschweren des Jutetuchs zum Erzielen der gewünschten Struktur im frischen Oberflächenmörtel (vgl. Bild 24). [91], [92]

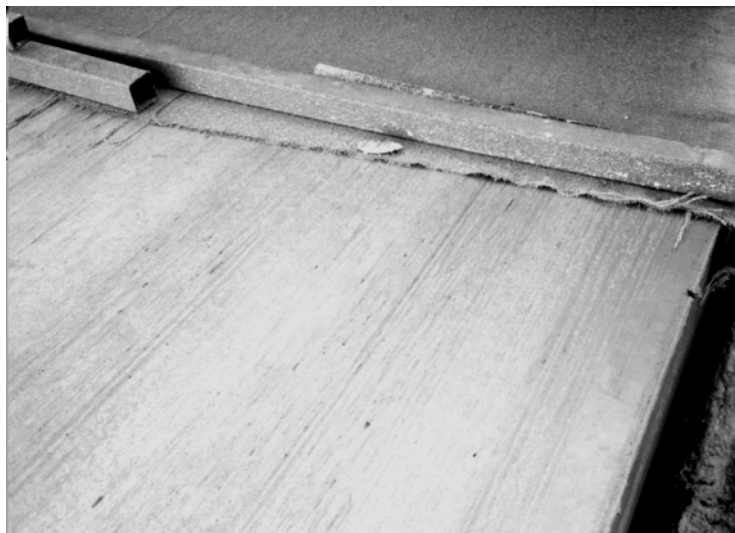


Bild 24: Beim Texturieren der Oberfläche des hochfesten Straßenbeton A44_B65 musste das nachgeschleppte Jutetuch beschwert werden [92]

4.2.2.2 Beständigkeit der Textur in Abhängigkeit der Texturgeometrie - Praxis

Für die Untersuchungen der Beständigkeit verschiedener in der Praxis eingesetzter Texturen in Abhängigkeit der Texturgeometrie gegenüber den Einwirkungen aus dem Verkehr, wurden 1999, dem Jahr der Verkehrsfreigabe, und im Sommer 2004 nach ca. fünfjähriger Liegezeit Bohrkern aus den verschiedenen Versuchsfeldern der Autobahn entnommen. Die Entnahmestellen befanden sich in den drei Abschnitten, in welchen jeweils eine andere Betonfestigkeit (A44_B35, A44_B45, A44_B65) verwendet wurde, und dort jeweils im Bereich des Jutetuch- und Besenlängsstrichs. Dadurch konnte neben dem Einfluss der Texturgeometrie auch der Einfluss unterschiedlicher Betonfestigkeiten (A44_B35, A44_B45, A44_B65) auf die Dauerhaftigkeit der

beiden Texturen untersucht werden. Die Bohrkernoberflächen, die 1999 zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe entnommen worden sind, stammten aus dem Standstreifen. Im Jahr 2004 wurden Bohrkernoberflächen aus der rechten Rollspur des 1. Fahrstreifens (Messbereich der SKM), sowie nach Möglichkeit auf dem vom Verkehr wenig beanspruchten Standstreifen (Jutetuchlängsstrich) bzw. in der Mitte der Rollspur des ersten Fahrstreifens (Besenlängsstrich) entnommen. Fotos der untersuchten Oberflächen befinden sich im Anhang C.

Vor der Entnahme erfolgte eine zeitnahe Messung der jeweiligen Oberflächeneigenschaften mit dem SKM. An den entnommenen Bohrkernoberflächen wurden im Labor die Texturgeometrie mit dem Doppeltriangulationssensor gemessen sowie Messungen der mittleren Oberflächentexturtiefe und der Griffigkeitseigenschaften mit dem SRT-Pendel durchgeführt. Aus dem Versuchsfeld mit dem Beton A44_B45 wurden im Jahr 2004 zusätzlich aus dem Bereich der Rollspur des ersten Fahrstreifens und aus dem Standstreifen Probekörper für Untersuchungen mit der Prüfanlage Wehner/Schulze entnommen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Bohrkernoberflächen mit einem Besenlängsstrich aus dem Streckenabschnitt, der aus dem Beton A44_B65 hergestellt worden war, konnten wegen großer Inhomogenitäten der Oberfläche nicht verwendet werden.

Analyse der Makrotextur

In Bild 25 ist die Veränderung der Texturgeometrie in der Makrotextur mit den aus der Materialanteilkurve bestimmten primären Kenngrößen dargestellt (vgl. Kapitel 3.3.2). Dabei sind die Höhen der Profilspitzen, des Kerns, der Profiltriefen sowie die Summe aus den drei Bereichen als Gesamthöhe getrennt für die Entnahmestellen dargestellt (vor Verkehr, Rollspur des 1. Fahrstreifens und Standstreifen bzw. dem Bereich zwischen den Rollspuren des 1. Fahrstreifens). Die dargestellten Kennwerte sind jeweils Mittelwerte aus drei Probekörpern.

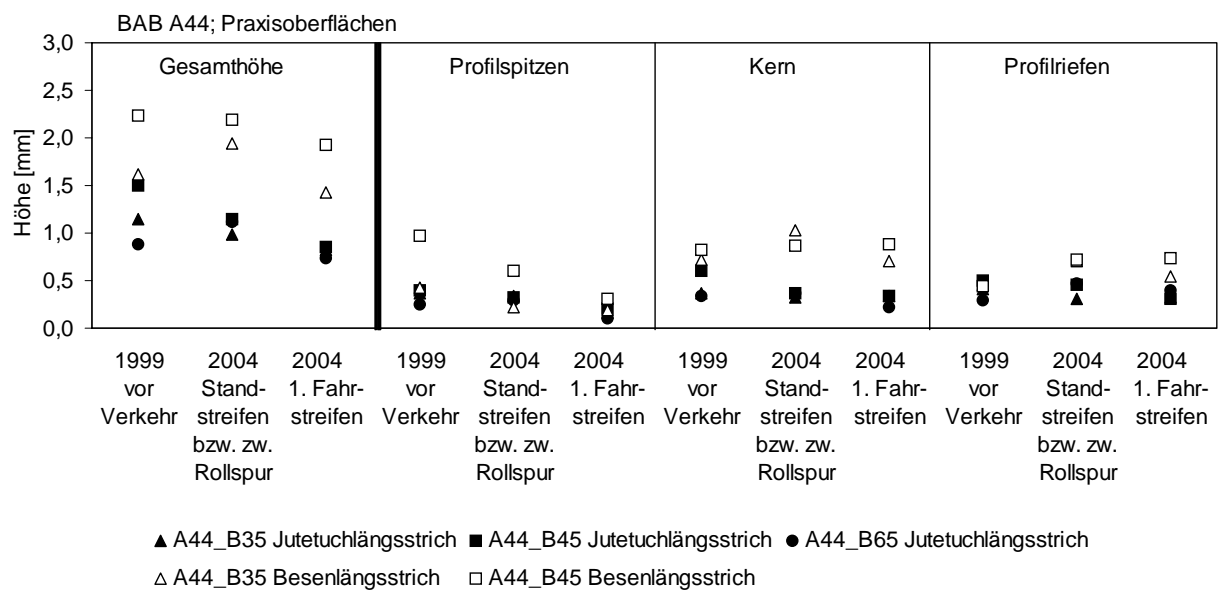


Bild 25: Kennwerte der Materialanteilkurve für die jeweiligen Texturen der Probekörper aus der BAB A44

Die in Bild 25 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die jeweiligen Texturgeometrien anhand der ermittelten Kennwerte unterschieden werden können. So weist der Besenlängsstrich der verschiedenen Betongüten in der Gesamthöhe sowie in den anderen Profildbereichen in der Regel größere Höhen als der Jutetuchlängsstrich auf. Nur der Besenlängsstrich des A44_B35 zeigte im Bereich der Spitzen geringe Höhen, dafür aber einen ausgeprägten Kernbereich.

Ein Vergleich der Gesamthöhe aller untersuchten Texturen vor Verkehr (1999) mit denjenigen, die 5 Jahre nach Verkehrsfreigabe aus der Rollspur des ersten Fahrstreifens entnommen wurden, zeigte bei allen Texturen einen Rückgang der Gesamthöhe. Dies kann bei beiden Texturen hauptsächlich auf einen Rückgang der Profilspitzenhöhe zurückgeführt werden. Die Gegenüberstellung der im Jahr 2004 aus dem Standstreifen bzw. aus der Rollspur des ersten Fahrstreifens entnommenen Bohrkernoberflächen ergibt einen deutlichen Einfluss der mechanischen Beanspruchung der Fahrzeugreifen in der Rollspur auf den zuvor beschriebenen Rückgang der Kennwerte. Einen Einfluss der Betonfestigkeit auf die Veränderungen infolge der Verkehrsbeanspruchung war beim Jutetuchlängsstrich nicht erkennbar. Beim Besenlängsstrich erfolgte dagegen zum Beispiel ein etwas größerer Rückgang der Gesamthöhe des A44_B35 im Vergleich zum A44_B45.

Die im Labor gemessenen mittleren Oberflächentexturtiefen der jeweiligen Texturen sind in Bild 26 enthalten. Die dargestellten Messwerte sind jeweils Mittelwerte aus drei Probekörpern.

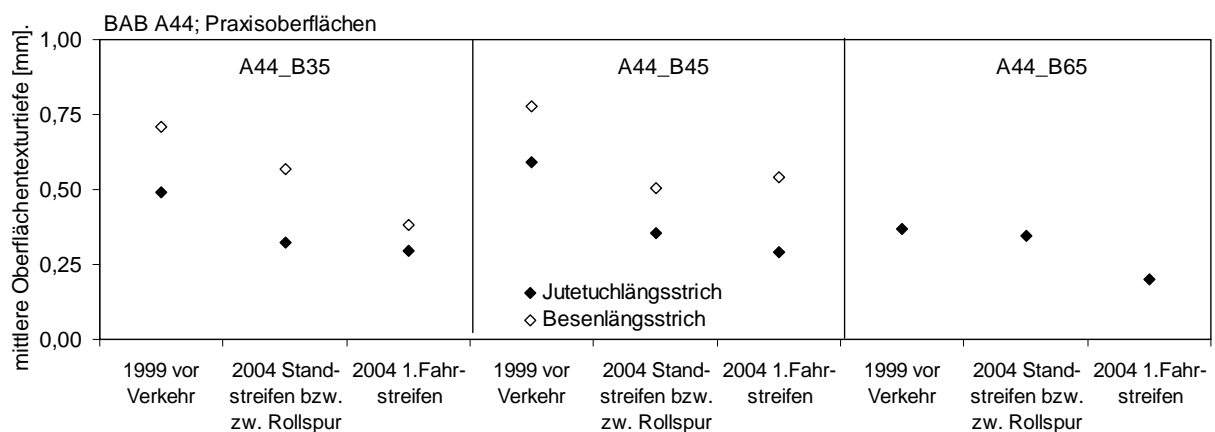


Bild 26: Mittlere Oberflächentexturtiefen der jeweiligen Texturen der Probekörper aus der BAB A44

Insgesamt konnte wie zuvor bei den Werten, die aus der Materialanteilkurve (Bild 25) abgeleitet worden waren, der Unterschied zwischen einem Besenlängsstrichs mit einer großen mittleren Oberflächentexturtiefe und eines Jutetuchlängsstrichs mit einer geringen Oberflächentexturtiefe festgestellt werden.

Bei allen Texturen konnte ein deutlicher Rückgang der mittleren Oberflächentexturtiefe innerhalb der rund 5-jährigen Liegezeit festgestellt werden. Interessant hierbei ist, dass beim Jutetuchlängs-

strich der Betone A44_35 sowie A44_B45 der Rückgang der mittleren Oberflächentexturtiefe durch Bewitterung sowie mechanischer Beanspruchung stattgefunden hatte. Der schon von Beginn an schwach ausgeprägte Jutetuchlängsstrich im Bereich des A44_B65 (vgl. Kapitel 4.2.1) wies bei diesen Untersuchungen nur einen Rückgang der mittleren Oberflächentexturtiefe im hoch beanspruchten Bereich der Rollspur des ersten Fahrstreifens auf. Die mittlere Oberflächentexturtiefe war in hier etwas niedriger als bei dem Jutetuchlängsstrich der beiden anderen Betone. Im Zusammenhang mit der Betonfestigkeit zeigte sich bei Betrachtung des Jutetuchlängsstrichs, dass die mittlere Oberflächentexturtiefe der untersuchten Texturen im Bereich der Rollspur des ersten Fahrstreifens nach 5-jähriger Beanspruchung auf etwa dem gleichen Niveau lag. Dies zeigt, dass grundsätzlich nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine erhöhte Betonfestigkeit zu einer hohen Texturbeständigkeit führt.

Analyse der Mikrotextur

Im Bild 27 sind die Kennwerte der Mikrotextur enthalten, die aus dem Wellenlängen-Amplitudenspektrum abgeleitet wurden. Die dargestellten Kennwerte sind Mittelwerte aus jeweils drei Probekörpern.

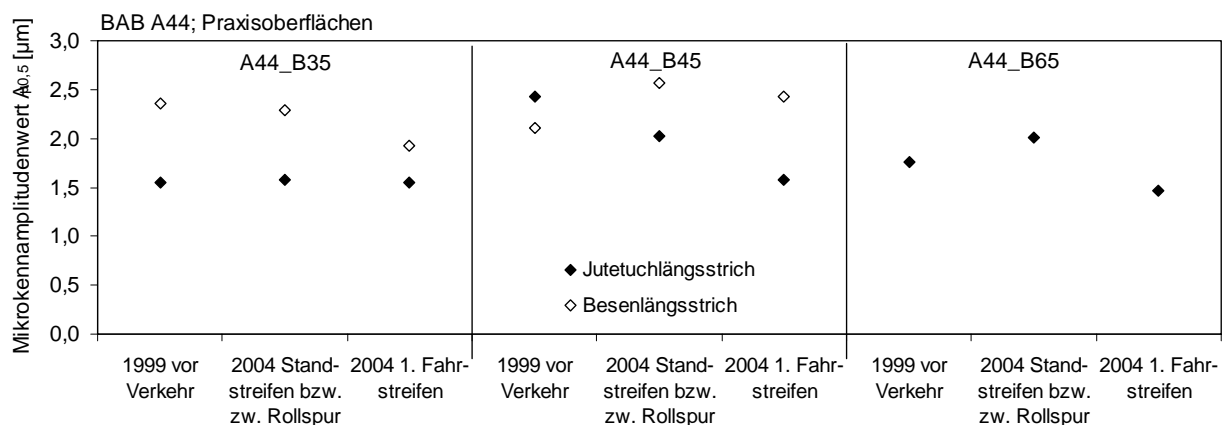


Bild 27: Mikrokennamplitudenwerte der jeweiligen Texturen der Probekörper aus der BAB A44

Die Mikrokennamplitudenwerte des Jutetuchlängsstrichs im Beton A44_B35 und Beton A44_B65 weisen im Ausgangszustand ein vergleichbares Niveau auf. Der Jutetuchlängsstrich des A44_B45 wies hierbei einen deutlich höheren Mikrokennamplitudenwert auf, was vor allem auf eine erhöhte Porosität im Oberflächenmörtel zurückgeführt werden kann (Bild 28).

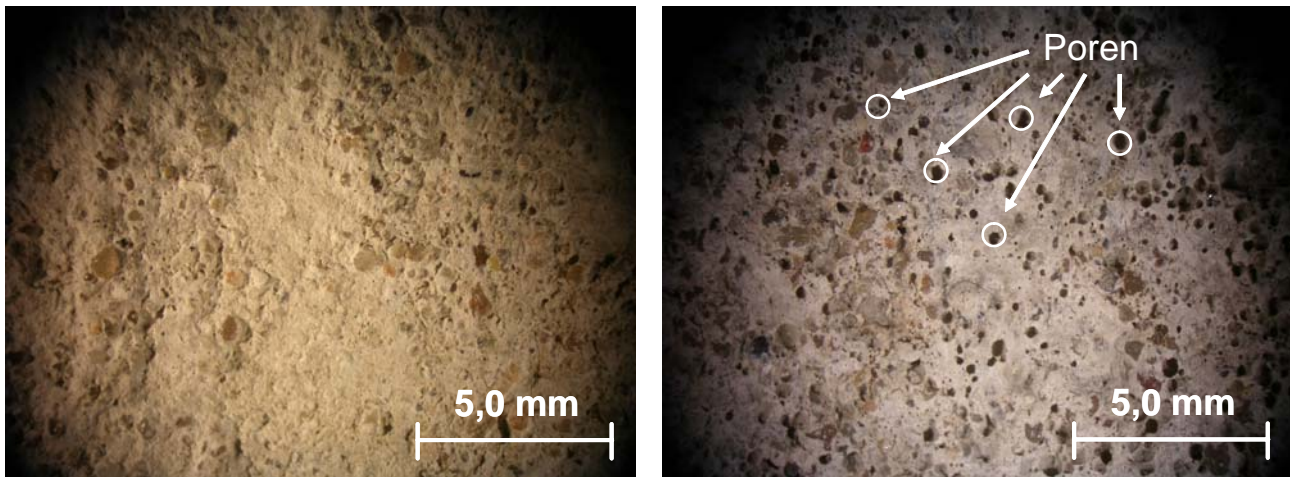


Bild 28: Mikroskopaufnahmen von unbeanspruchten Bohrkernoberflächen aus der BAB A44
links: Jutetuchlängsstrich A44_B35
rechts: Jutetuchlängsstrich A44_B45 mit beispielhaft markierten Poren

Die insgesamt höhere Feinrauheit des Besenlängsstrichs ergibt sich aus der Texturierung selbst. Die Borsten des Besens dringen beim Texturierungsvorgang tiefer in den Oberflächenmörtel ein, befördern dabei vermehrt Anteile des verwendeten Sandes an die Oberfläche und erhöhen somit insgesamt die an der Oberfläche vorhandene Feinrauheit.

Während der 5-jährigen Liegezeit zeigte die Entwicklung der Mikrokennamplituden im Bereich der Rollspur tendenziell einen Rückgang. Nachdem im mechanisch unbeanspruchten Bereich des Standstreifens nach 5-jährigen Liegezeit - bis auf den zuvor schon angesprochenen Jutetuchlängsstrich des A44_B45 - tendenziell zu einer Zunahme des Mikrokennamplitudenwerts gekommen war, bestätigt dies auch die Beobachtungen von Bühlmann [39], dass eine Reduktion der Feinrauheit durch die mechanische Beanspruchung erfolgt, und die Bewitterung eher eine Aufrauung bewirkt.

Neben den Messungen der Griffigkeitseigenschaften, die von der BAST in der rechten Rollspur des 1. Fahrstreifens mit dem SKM durchgeführt worden waren (vgl. Bild 31 in folgendem Kapitel 4.2.1), wurden an den Ausbaustücken im Labor mit dem SRT-Pendel die Griffigkeitseigenschaften der vom Verkehr belasteten Bereiche und unbelasteten Bereiche bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 29 dargestellt. Die dargestellten Messwerte sind Mittelwerte aus jeweils drei Probekörpern.

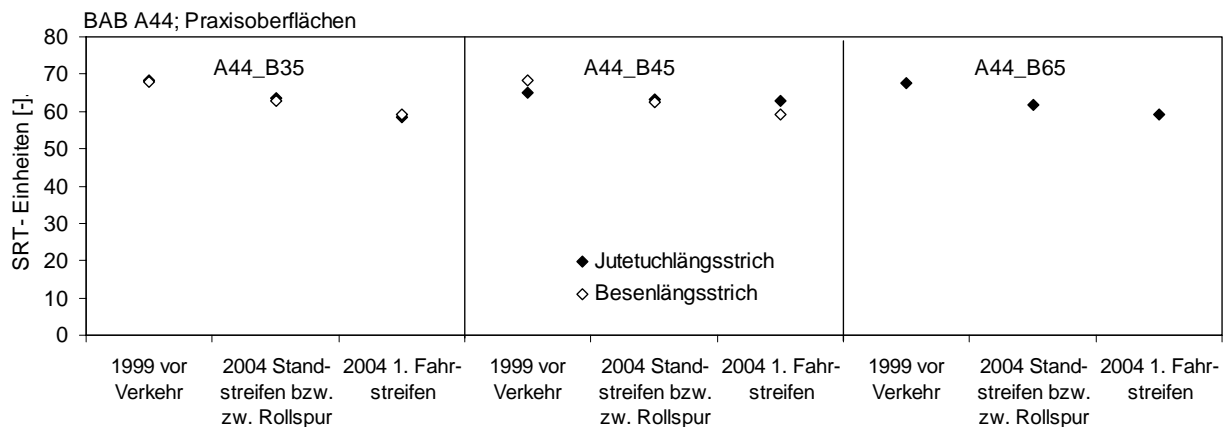


Bild 29: SRT-Einheiten der jeweiligen Oberflächen im Bereich des Standstreifens bzw. zwischen den Rollspuren sowie in den Rollspuren des 1. Fahrstreifens

Die Messungen zeigten bei allen geprüften Oberflächen einen Rückgang über die 5-jährige Liegedauer. Dies konnte sowohl für den Bereich des Standstreifens wie auch für den Bereich der Rollspur des ersten Fahrstreifens festgestellt werden. Nachdem der Rückgang der Messwerte im mechanisch beanspruchten sowie im überwiegend bewitterten Bereich stattgefunden hatte, muss vermutet werden, dass die Messung neben der vorhandenen Feinrauheit selbst auch von weiteren Größen beeinflusst wird. Vorstellbar ist hier z.B. ein Einfluss, der aus der Veränderung der Makrotextur resultiert, denn wie sich aus den Kennwerten der Makrotextur (Materialanteilkurve, mittlere Oberflächentexturtiefe) ergeben hatte, führte die 5-jährige Bewitterung schon zu einer signifikanten Veränderung.

Im folgenden Bild 30 sind die Ergebnisse der Bestimmung des Gleitbeiwertes mit der Prüfanlage Wehner/Schulze an Oberflächen des Betons A44_B45 mit Jutetuchlängsstrich dargestellt, die aus dem Bereich des Standstreifens sowie der Rollspur des 1. Fahrstreifens entnommen wurden. Je Bereich wurde ein Probekörper untersucht.

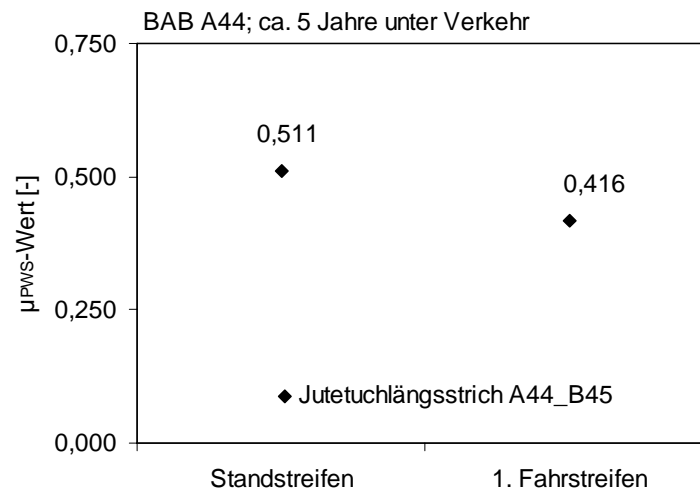


Bild 30: Gleitbeiwerte μ_{PWS} des Jutetuchlängsstrichs des Betons A44_B45 im Bereich des Standstreifens und im Bereich der Rollspur des 1. Fahrstreifens

Im Bereich der Rollspur des 1. Fahrstreifens ergab sich ein deutlich geringerer μ_{PWS} -Wert als im Bereich des Standstreifens. Hierbei ist aber zu beachten, dass eine ausgeprägte Makrotextur einer gerichteten Textur einen deutlichen Einfluss auf den Messwert hat. Denn durch die kreisförmige Bewegung der Messgummis beim Messvorgang (vgl. Beschreibung der Prüfanlage im Kapitel 3.4.3) stellen die Profilrippen von gerichteten Texturen einen wesentlichen Einfluss auf den Messwert dar. Somit kann nicht eindeutig festgestellt werden, ob der verhältnismäßig große Rückgang ausschließlich infolge der polierenden Wirkung des Verkehrs stattgefunden hat.

4.2.2.3 Entwicklung der Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit der Texturgeometrie

Mit dem von der BAST für die Erprobungsstrecke durchgeführten Untersuchungsprogramm sollte im weiteren Verlauf das längerfristige Verhalten der Eigenschaften der Texturen unter den Einflüssen des Verkehrs und der Umwelt erfasst werden. Zu diesem Zweck wurden und werden seit der Herstellung im Frühjahr 1999 kontinuierlich kombinierte Griffigkeits- und Rauheitsmessungen mit dem SRT-Pendel und dem Ausflussmesser (AFM) sowie Messungen der mittleren Oberflächentexturtiefe durchgeführt (Aufbau eines Messfeldes im Anhang C). Zusätzlich wurden Messungen der Griffigkeit mit dem SKM sowie Messungen des Reifen/Fahrbahn-Geräusches mit dem Lärmessanhänger (LMA) und der Pegelstatistik auf drei Versuchsabschnitten in Auftrag gegeben [91]. Die durchschnittliche Verkehrsbelastung auf diesem Teilstück betrug in den Jahren 2001 bis 2003 pro Fahrtrichtung ca. 50.000 Kfz/24h bei einem LKW-Anteil von ca. 2.000 Kfz/24h. Im Anhang C sind eine Übersicht der jeweiligen Messfelder und deren Aufbau skizziert.

In Bild 31 ist beispielhaft die zeitliche Entwicklung der Griffigkeitswerte, gemessen mit dem SKM, und der mittleren Oberflächentexturtiefe, des Jutetuchlängs- und des Besenlängsstrichs im Bereich des Betons A44_B35 dargestellt.

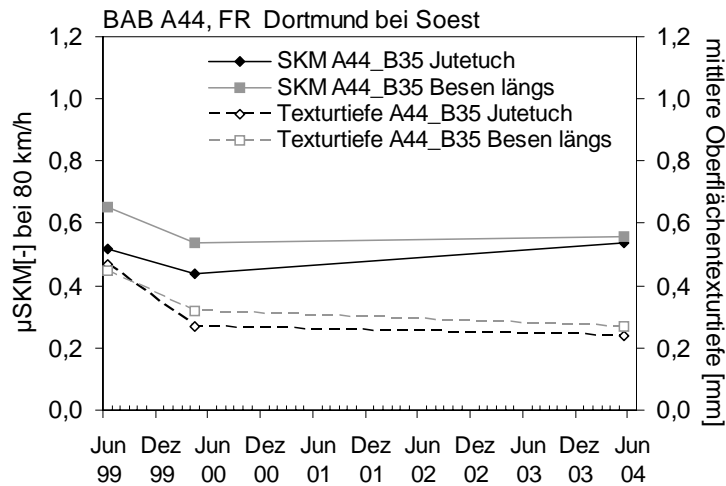


Bild 31: Entwicklung der Griffigkeitswerte gemessen mit der SKM (100 m-Mittelwerte) und der mittleren Oberflächentexturtiefen über den Messzeitraum von Texturen im Bereich des Betons A44_B35; Messwerte aus [91]

Insgesamt konnte bei beiden Texturen im ersten Jahr eine Abnahme der Griffigkeit und der mittleren Oberflächentexturtiefen festgestellt werden. Die Werte der mittleren Oberflächentexturtiefe verringerten sich auch durch die Beanspruchungen der folgenden vier Jahre, d.h. die Textur wurde weiter abgetragen. Dem gegenüber konnte für beide Texturen von Juni 2000 bis Juni 2004 ein Anstieg auf ein gleiches Griffigkeitsniveau festgestellt werden. Diese Zunahme der Griffigkeitswerte kann vor allem auf das Freilegen der Sandkörner und der Köpfe der groben Gesteinskörner zurückgeführt werden (vgl. Bild 32). Beide Texturgeometrien zeigen somit über den Betrachtungszeitraum hinsichtlich der Entwicklung der mittleren Oberflächentexturtiefe und dem Griffigkeitsverhalten ein vergleichbares Verhalten.



Bild 32: links: Besenlängsstrich im Beton A44_B 35 nach 5 Jahren Liegezeit
rechts: Jutetuchlängsstrich im Beton A44_B 35 nach 5 Jahren Liegezeit

Die Texturgeometrien der beiden anderen Betone A44_B45 und A44_B65 wiesen ebenfalls eine Abnahme der gemessenen mittleren Texturtiefen über den Messzeitraum auf (vgl. Bild A 18 im Anhang C). Die Griffigkeit der Texturgeometrien des Betons A44_B45 und A44_B65 entwickelten sich in gleicher Weise wie die des A44_B35, wobei die Texturgeometrien in diesen Fällen zum Teil noch deutlich erkennbar waren (vgl. Bild A 18 im Anhang C).

Das Lärmverhalten der einzelnen Texturabschnitte der BAB A44 wurde zu verschiedenen Zeitpunkten nach Verkehrsfreigabe mit einem Lärmmessanhänger erfasst. In Bild 33 sind die 100m Intervallpegel bei einer Messgeschwindigkeit von 120 km/h über den Versuchsabschnitt zu den Messzeitpunkten 1999, 2004 und 2006 dargestellt. Zusätzlich sind die Grenzen der in dieser Arbeit betrachteten Texturabschnitte eingetragen.

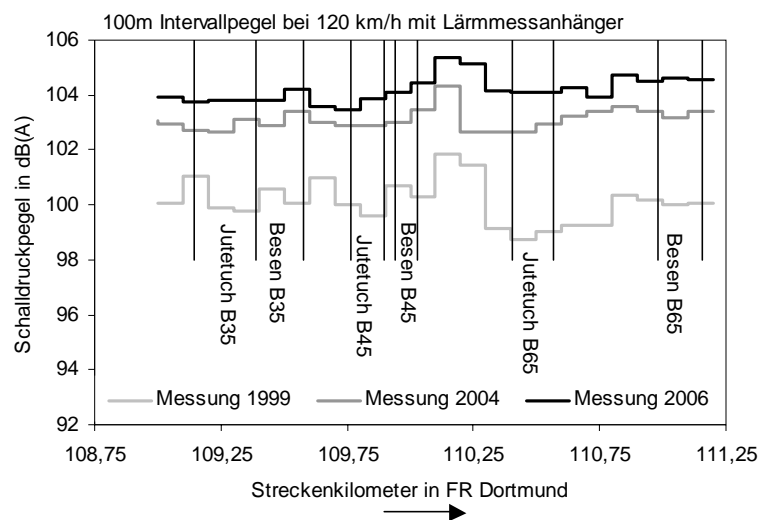


Bild 33: Verlauf der 100m Intervallpegel der Lärmmessungen mit einem Lärmmessanhänger der verschiedenen Texturabschnitte bei 120 km/h zu verschiedenen Messzeitpunkten; Werte aus [91]

Gut zu erkennen ist, dass die jeweiligen Abschnitte mit gleicher Texturgeometrie unmittelbar nach Verkehrsfreigabe (Messung 1999) unabhängig von der Betongüte ein vergleichbares Niveau aufgewiesen haben. Zudem zeigten sich auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden hier betrachteten Texturgeometrien. Die in der Folge durchgeführten Messungen zeigten einen deutlichen Anstieg der Intervallpegel. Wobei auch hier kein deutlicher Unterschied zwischen den verwendeten Betongütern sowie zwischen Texturgeometrien festgestellt werden konnte. Die Entwicklung der 100m Intervallpegel zeigt deutlich, dass sich die Texturgeometrien unabhängig von der Betongüte gleich verhalten haben, und dass eine Zunahme der Lärmemission vermutlich durch die Reduzierung der mittleren Oberflächentexturtiefe (vgl. Bild 31) und dem Verlust der ursprünglich eingebrachten Texturgeometrie (vgl. Bild 32) verursacht wurde.

4.2.3 Zusammenfassung der Untersuchungen an der Praxisstrecke

Insgesamt zeigte sich, dass sich beide Texturgeometrien der hier untersuchten Praxisstrecke durch die fünfjährige Liegezeit im Bereich der Mikro- und der Makrotextur vergleichbar verhalten haben. So wurde die Makrotextur beider Texturgeometrien durch die mechanische Beanspruchung aber auch die Bewitterung abgetragen. Zudem konnte für den Bereich der Feinrauheit (Mikrotextur) festgestellt werden, dass eine Reduktion der Feinrauheit durch die mechanische Beanspruchung erfolgt, und die Bewitterung eher eine Aufrauung bewirkt. Einen direkten Einfluss der Betongüte auf die Beständigkeit der untersuchten Texturgeometrien und den damit verbundenen sekundären Eigenschaften konnte hier nicht eindeutig festgestellt werden. Diese wird nicht nur von der ursprünglich eingebrachten Texturgeometrie, sondern auch von der Zusammensetzung des Oberflächenmörtels (Sand, w/z-Wert der Mörtelschicht usw.) und dessen Dicke beeinflusst.

Die in der Praxis mit dem SKM gemessene Griffigkeit lag auch nach fünfjähriger mechanischer Beanspruchung nach zwischenzeitlichem Abfall wieder auf dem Niveau der Griffigkeit von vor der Verkehrsfreigabe, vgl. Bild 31. Hierbei zeigt sich, dass ein Verlust der ursprünglich eingebrachten Texturgeometrie nicht zwangsläufig zu einem Verlust der Griffigkeit führt. Dies lässt sich auf die Zusammensetzung und die Dicke der entstandenen Mörtelschicht zurückführen. Denn besitzt die Mörtelschicht einen hohen Anteil an Sand, sowie eine günstige Dicke (zw. 0,5 und 1,0 mm), so kann im Laufe der Beanspruchungsdauer – trotz Verlust der ursprünglich eingebrachten Textur - zunächst der Sand mit seiner griffigkeitsrelevanten Feinrauheit freigelegt werden. Im weiteren zeitlichen Verlauf erscheinen dann auch die unter der Mörtelschicht liegenden groben Gesteinskörner, die ab diesem Zeitpunkt maßgeblich die Feinrauheit dominieren. Jedoch kann die Betonoberfläche durch den Verlust der ursprünglich eingebrachten Texturgeometrie die sich aus diesen ergebenden (günstigen) Lärmeigenschaften verlieren, vgl. Bild 33.

4.3 Untersuchungen im Labor

4.3.1 Umfang der Untersuchungen im Labor

Bei den im Labor durchgeführten Untersuchungen wurde die Beständigkeit verschiedener gängiger Texturgeometrien gegenüber der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen simulierten Einwirkung aus Umwelt- und Verkehrsbeanspruchung überprüft. Hierzu wurden in den Oberflächenmörtel einer Betonrezeptur ein Jutetuchlängsstrich, ein Besenlängsstrich, ein Jutetuchlängsstrich + Kamm und ein Kunstrasenlängsstrich eingebracht.

Bei der Betonrezeptur handelte es sich um eine übliche Rezeptur eines Oberbetons, die im Folgenden als 'Labor TU' bezeichnet wird. Die Rezeptur besaß einen w/z-Wert von 0,40 und eine Sieblinie im Bereich A/B 16 (vgl. Anhang C). Die grobe Gesteinskörnung bestand aus einem Basalt und als feine Gesteinskörnung wurde der Sand verwendet, der auch beim Bau eines Teilstückes der BAB A92 (vgl. folgendes Kapitel 5.2.1) zur Anwendung kam. Der eingesetzte Zement (CEM I 42,5 R) entsprach ebenfalls dem Zement, der beim Bau des Teilstückes der BAB A92 verwendet wurde. Um den angestrebten Luftgehalt von 4,5 Vol.-% und die angestrebten

Konsistenzbereiche zu erreichen, wurden ein Luftporenbildner und ein Fließmittel verwendet. In Tabelle 3 ist die Zusammensetzung des für die Versuche verwendeten Betons dargestellt.

Tabelle 3: Zusammensetzung des Betons 'Labor TU', der für die Untersuchung verschiedener Texturgeometrien verwendet wurde

Bestandteile	Einheit	Rezeptur 'Labor TU'
1	2	3
Zementart	[-]	CEM I 42,5 R
Sieblinie	[-]	A/B 16
w/z-Wert	[-]	0,40
Zementgehalt	[kg/m ³]	350
Sand 'A92' 0/4a	[kg/m ³]	931
Basalt 2/8	[kg/m ³]	404
Basalt 8/16	[kg/m ³]	606
Soll-Luftgehalt	[Vol.-%]	4,5

Die Herstellung des Betons erfolgte in einem üblichen Zwangsmischer (Tellerischer). Die Mischzeit und die Zugabe der einzelnen trockenen Ausgangsstoffe wurden stets in konstanter Reihenfolge durchgeführt. Hierbei betrug die Trockenmischzeit für eine ausreichende Homogenisierung der Ausgangsstoffe 1 Minute. Die Zugabe des Anmachwassers mit dem darin enthaltenen Luftporenbildner erfolgte innerhalb der ersten 30 Sekunden und die Zugabe des Fließmittels in den folgenden 30 Sekunden. Anschließend wurde der Beton eine weitere Minute gemischt. Somit betrug die gesamte Nass-Mischzeit 2 Minuten. Die Prüfung der Frischbetoneigenschaften (Temperatur, Verdichtungsmaß, LP-Gehalt, Frischbetonrohichte) erfolgte 15 Minuten nach Wasserzugabe.

Die Herstellung der Texturprobekörper (l/b/h = 150/150/50 mm) erfolgte ca. 30 - 45 Minuten nach Wasserzugabe. Die Verdichtung der Texturprobekörper sowie der Probekörper (Würfel Kantenlänge 150 mm) zur Prüfung der Festigkeitseigenschaften erfolgte mit einem Rütteltisch. Die Dauer der Verdichtung betrug rd. 45 sec.. Bei der Herstellung der Texturprobekörper wurde auf einen ausreichenden Oberflächenschluss geachtet, das Aufbringen der Textur selbst erfolgte rd. 15 - 20 Minuten nach Herstellung. Es wurde von jeder Texturgeometrie eine Serie von drei Texturprobekörpern hergestellt.

Das Einbringen der jeweiligen Texturen wurde wie folgt durchgeführt:

Jutetuchlängsstrich: Entsprechend den Untersuchungen von [11] kann im Labor ein Jutetuchlängsstrich mit sehr guter Wiederholgenauigkeit und Praxisnähe mit einem handelsüblichen Rosshaarbesen simuliert werden. Vor dem Einbringen der Textur in den Oberflächenmörtel wurden die Borsten des Rosshaarbesens leicht mit Zementleim benetzt, um ein Entmörteln der Oberfläche zu verhindern. Der Rosshaarbesen wurde im Anschluss in einem Winkel von ca. 30 ° gegenüber der

Horizontalen geneigt und ohne zusätzlichen Druck, d.h. nur mit seinem Eigengewicht, über die Oberflächen der Probekörper gezogen.

Jutetuchlängsstrich mit Kamm: Nach dem Texturieren der Oberfläche mit dem Rosshaarbesen, wurde ein Kamm (entsprechend [8]) mit einem Anstellwinkel von ca. 30 ° über die Probekörper hinweg gezogen.

Kunstrasenlängsstrich: Die Kunstrasenlängsstrich wurde durch gleichmäßiges Ziehen (ohne zusätzliche Auflast) eines Kunstrasens (Florhöhe 25 mm, weiche Borsten, Flächengewicht ca. 2700 g/m² (trocken)) über die Oberfläche der Probekörper eingebracht. Der Kunstrasen wurde ähnlich wie der Rosshaarbesen zuvor leicht mit Zementleim benetzt, um ein Entmörteln der Oberfläche zu verhindern.

Besenlängsstrich: Der Besenlängsstrich wurde mit einem Piassavabesen in den Oberflächenmörtel eingebracht. Der Piassavabesen wurde zuvor leicht mit Zementleim benetzt, und dann mit einem Anstellwinkel von ca. 30 ° gegenüber der Horizontalen geneigt, gleichmäßig und ohne Druck über die Probekörperoberflächen gezogen.

Die Texturprobekörper wurden nach der Herstellung bis zum Zeitpunkt der Prüfung im Klima 20 °C / 85 % rel. Luftfeuchte gelagert. Bis auf die Zeiten während der Beanspruchungen und Messungen lagerten die Texturprobekörper in diesem Klima.

Für orientierende Versuche zum Einfluss von Nachbehandlungsmittel auf die Texturbeständigkeit wurde auf jeweils eine Probekörperserie mit einem Jutetuchlängsstrich sowie mit einem Kunstrasenlängsstrich ein flüssiges, nicht pigmentiertes Nachbehandlungsmittel aufgetragen. Dazu wurde das Nachbehandlungsmittel in eine Pumpsprühflasche gegeben und auf die augenscheinlich matt feuchte Oberfläche der Probekörper aufgesprüht. Gemäß den Angaben des Herstellers wurden 150 g/m² aufgebracht. Trotz der augenscheinlichen Mattfeuchte der Oberflächen wurde die Textur durch den Auftrag verändert. Dies zeigte sich vor allem in einem Einprägen von Tropfen der aufgetragenen Nachbehandlungssuspension in den frischen Oberflächenmörtel.

Die Texturprobekörper wurden dem im Kapitel 3.4.2 und in Bild 23 beschriebenen kombinierten Laborbeanspruchungszyklus unterzogen. Der Beginn des Beanspruchungszyklus erfolgte für alle hergestellten Texturprobekörper am 28. Tag nach der Herstellung. Neben dem Erfassen der Texturänderungen mit dem Doppeltriangulationssensor wurde die mittlere Oberflächentexturtiefe (vgl. Kapitel 2.5.2) und die Griffigkeitseigenschaften mit dem SRT-Pendel (vgl. Kapitel 2.5.3.2) bestimmt.

4.3.2 Beständigkeit der Textur in Abhängigkeit der Texturgeometrie - Labor

Der im Labor für die Probekörperherstellung verwendete Frischbeton besaß zum Zeitpunkt der Probekörperherstellung ein Verdichtungsmaß von 1,25, der Luftporengehalt im Frischbeton lag bei 4,3 Vol.-%. Die Druckfestigkeit des Betons betrug nach 28 d 66 N/mm².

Die Prüfung der Beständigkeit der in den Oberflächenmörtel des Betons eingebrachten

Texturgeometrien erfolgte im Alter von 28 Tagen mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (vgl. Kapitel 3.4.2).

Die im Labor simulierten Texturen wiesen im unbeanspruchten Zustand eine gute Praxisnähe auf, vgl. Bild 34.

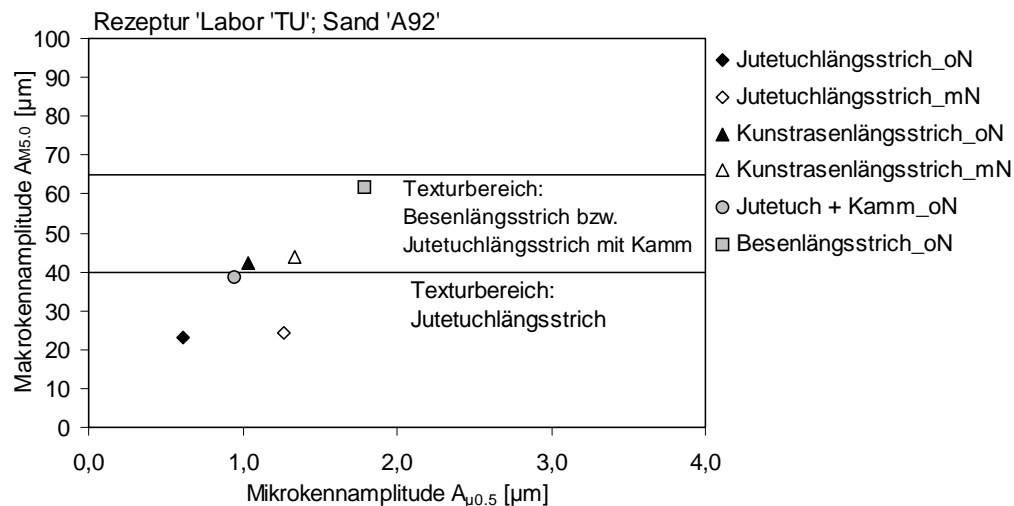


Bild 34: Gegenüberstellung der Makro- und Mikrokennamplitudenwerte der im Labor hergestellten Texturen der Rezepturen 'Labor TU'

Die Kennwerte der Texturgeometrien der Laborprobekörper befinden sich in den jeweiligen Texturbereichen, die anhand unbeanspruchter Praxistexturen definiert worden waren (vgl. Kapitel 2.5.2). Somit sind die im Labor hergestellten Texturen in ihrem Ausgangszustand (unbelastet) hinsichtlich der geometrischen Gestalt denen aus der Praxis vergleichbar. Der Kunstrasenlängsstrich lag dabei zwischen dem rauen Besenlängsstrich und dem eher weniger rauen Jutetuchlängsstrich.

Analyse der Makrotextur

In Bild 35 sind die aus der Materialanteilkurve bestimmten Kenngrößen (vgl. Kapitel 3.3.2) der untersuchten Texturgeometrien vor (Nullmessung) und am Ende des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (Zyklusende) dargestellt. Die dargestellten Kennwerte sind jeweils ein Mittelwert aus drei Probekörpern.

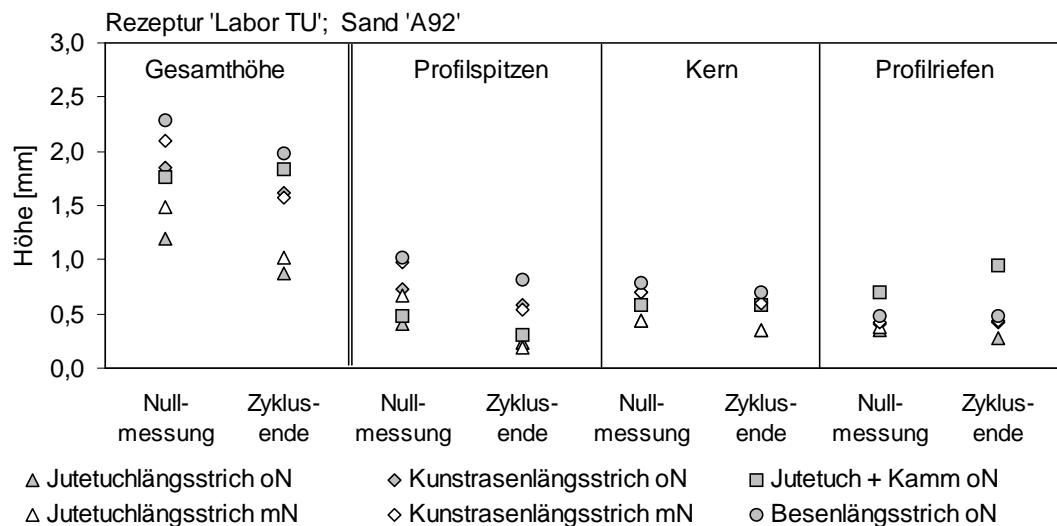


Bild 35: Aus der Materialanteilkurve bestimmte Kennwerte der Texturgeometrien vor (Nullmessung) und nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (Zyklusende)

Die Analyse der verschiedenen Texturgeometrien im Ausgangszustand (Nullmessung) ergab auch hier, dass jede Textur anhand der Kennwerte, die aus der Materialanteilkurve abgeleitet wurden, charakterisiert werden kann. Bei Betrachtung der Gesamthöhe der Nullmessung zeigte sich, dass der 'Besenlängsstrich oN' die Texturgeometrie mit der größten und der 'Jutetuchlängsstrich oN' die Texturgeometrie mit der kleinsten Profilhöhe war. Dazwischen befinden sich der 'Kunstrasenlängsstrich oN' und der 'Jutetuchlängsstrich mit Kamm oN'. Der Auftrag des Nachbehandlungsmittels führte beim 'Kunstrasenlängsstrich' sowie beim 'Jutetuchlängsstrich' zu einer Zunahme der Gesamthöhe des Profils. Augenscheinlich waren in dem Oberflächenmörtel kleine Vertiefungen erkennbar, die durch die feinen Tropfen des Nachbehandlungsmittels beim Auftreffen auf den noch frischen Oberflächenmörtel verursacht worden waren.

Sehr deutlich zeigten sich die texturtypischen Unterschiede in der Ausgangstextur bei der Höhe der Profilsitzen. Hier konnte etwa die gleiche Reihung der Texturgeometrien wie bei der Gesamthöhe festgestellt werden. Im Bereich des Kerns zeigte sich zwischen den Texturgeometrien kaum ein Unterschied. Im Bereich der Profiltiefen war der Einfluss des Kammes bei der Textur 'Jutetuchlängsstrich mit Kamm oN' durch die ausgeprägte Höhe sehr gut zu erkennen.

Ein Vergleich der Gesamthöhe und der Höhen der drei Texturbereiche (Profilsitzen, Kern, Profiltiefen) aller Texturen vor und nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus zeigte, dass mit Ausnahme der Gesamthöhe und der Riefentiefe des 'Jutetuchlängsstrichs mit Kamm oN' eine Abnahme der Höhen stattfand. Ursächlich für die Reduzierung der Höhen war vor allem ein Verlust im Bereich der Profilsitzen infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus. Bei der Textur 'Jutetuchlängsstrich mit Kamm oN' wurde eine leichte Zunahme der Gesamthöhe und der Höhe der Profiltiefen beobachtet.

In Bild 36 sind die Ergebnisse der Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe dargestellt. Die dargestellten Kennwerte sind jeweils ein Mittelwert aus drei Probekörpern.

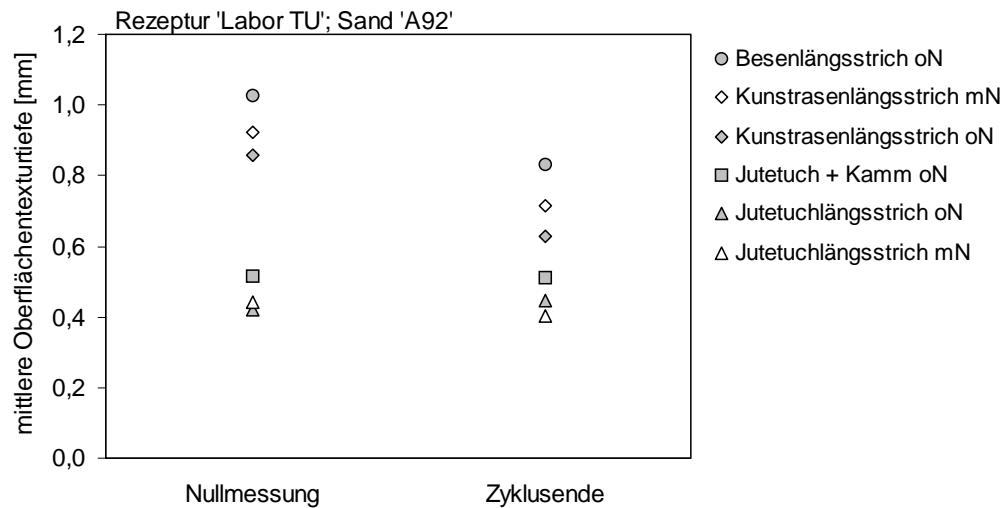


Bild 36: Mittlere Oberflächentexturtiefen der untersuchten Texturen vor und nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

In Bild 36 ist gut zu erkennen, dass bei diesem Kennwert das Einebnen der jeweiligen Texturen infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus nur bei den sehr makrorauen Texturen wie dem 'Kunstrasen'- und 'Besenlängsstrich' deutlich erkennbar war. Die weniger makrorauen Texturen zeigten nahezu keine Veränderung. Letzteres widerspricht den Erkenntnissen die aus der Materialanteilkurve abgeleitet wurden, wonach bei allen Texturen ein Abtrag der Profilhöhe stattgefunden hatte. Eine Erklärung für dieses Ergebnis könnte in dem unterschiedlichen Messbereich beider Verfahren liegen, da beim Abtasten der Oberfläche mit dem Doppeltriangulations-sensor wegen der gewählten Messfeldgröße Welligkeiten größer 30 mm nicht erfasst werden können, diese aber einen Einfluss bei den hier durchgeführten Messungen haben.

Analyse der Mikrotextur

Die Veränderung der Mikrotextur infolge des Beanspruchungszyklus ist in Bild 37 mit der Veränderung der Mikrokennamplitude $A_{\mu 0,5}$ veranschaulicht. Die dargestellten Kennwerte sind jeweils ein Mittelwert aus drei Probekörpern.

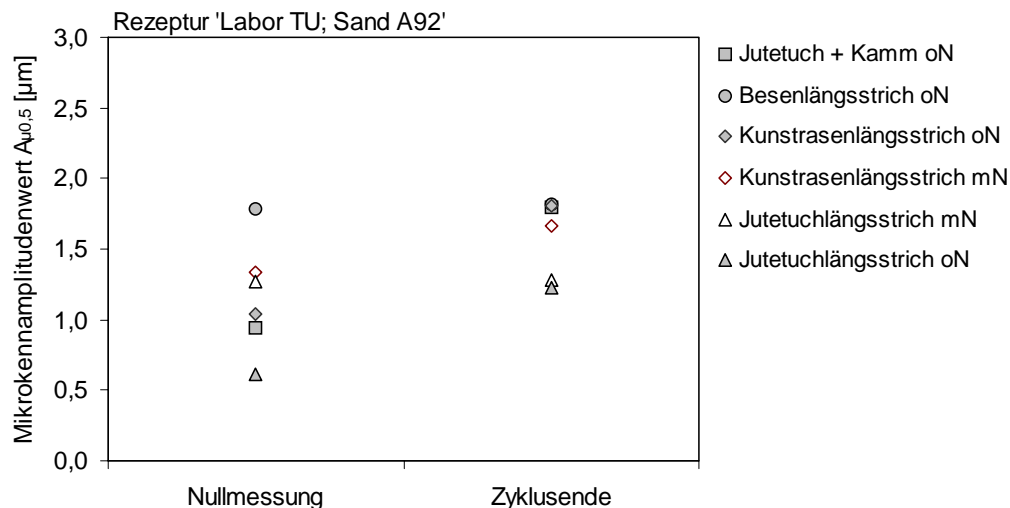


Bild 37: Veränderung der Mikrokennamplitude $A_{\mu 0,5}$ (Mikrotextur) der untersuchten Texturgeometrien infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Die jeweiligen Texturgeometrien wiesen im Ausgangszustand (Nullmessung) nicht nur in der Makrotextur sondern auch in der Mikrotextur texturtypische Werte auf. So besaßen die feinrauen Texturgeometrien, wie z.B. der 'Jutetuchlängsstrich', im Vergleich zu den etwas grobrauen in der Regel auch eine kleinere Feinrauheit. Dies ergibt sich aus der Texturierung selbst. Beim Einbringen gröberer Texturen dringt das Werkzeug tiefer in den Oberflächenmörtel ein und befördert dabei vermehrt Anteile des verwendeten Sandes an die Oberfläche und beeinflusst damit die an der Oberfläche vorhandene Feinrauheit. Zudem zeigte sich ein deutlicher Einfluss des Auftrags des Nachbehandlungsmittels auf die sich ergebende Feinrauheit.

Bei den Texturen ohne Auftrag des Nachbehandlungsmittels wird die vorhandene Feinrauheit – bei gleicher Beton- und Mörtelzusammensetzung – wie zuvor beschrieben ausschließlich durch das bei der Herstellung verwendete Texturierungswerkzeug beeinflusst. Der beschriebene Effekt wird durch den 'Jutetuchlängsstrich' und 'Kunstrasenlängsstrich', auf welche ein Nachbehandlungsmittel appliziert wurde, belegt. Denn beide Texturen mit Nachbehandlungsmittel wiesen in der Nullmessung nahezu identische Werte auf, da der Auftrag des Nachbehandlungsmittels zum Teil die wenig raue Zementleimschicht, die unmittelbar nach der Texturierung um die Sandkörner liegt und deren Eigenrauheit verdeckt, entfernt worden war.

Der kombinierte Laborbeanspruchungszyklus führte bei fast allen Texturen zu einer Zunahme an Feinrauheit und somit des Mikrokennamplitudenwertes. Dies kann hauptsächlich auf ein Freilegen der Eigenrauheit des Sandes und der groben Gesteinskörnung zurückgeführt werden. Beim 'Besenlängsstrich oN' wurde keine Veränderung im Bereich der Mikrotextur nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus festgestellt. Erklärbar ist dies anhand des zuvor beschriebenen Effekts infolge des Texturierungswerkzeugs. Die Entwicklung der Feinrauheit einer beanspruchten Textur wird maßgeblich davon bestimmt wie sich die Eigenrauheit durch das Freilegen von Sand- bzw. groben Gesteinskörnern entwickelt.

Bild 38 zeigt die Ergebnisse der Messungen mit dem SRT-Pendel vor (Nullmessung) und nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (Zyklusende). Die dargestellten Kennwerte sind jeweils ein Mittelwert aus drei Probekörpern.

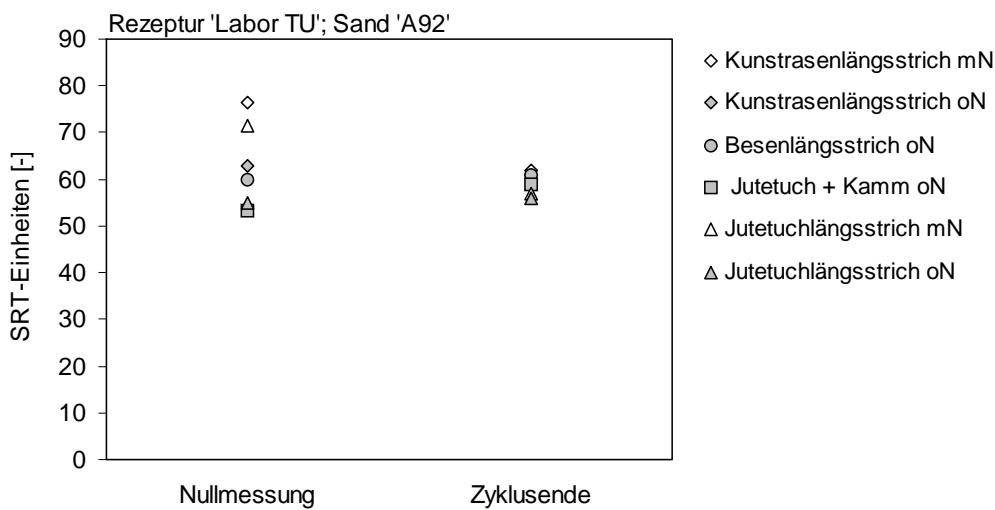


Bild 38: SRT-Einheiten der verschiedenen Texturgeometrien vor (Nullmessung) und nach Durchlaufen (Zyklusende) des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Die Griffigkeitsentwicklung der nicht nachbehandelten Texturgeometrien bestätigte die texturbedingten Unterschiede, die bereits bei den primären Kennwerten der Mikro- und Makrotextur festgestellt worden waren.

Bei den nicht nachbehandelten Texturen wiesen im Ausgangszustand (Nullmessung) der 'Kunstrasen'- und der 'Besenlängsstrich' die höchsten und die beiden Texturen mit dem 'Jutetuchlängsstrich' die niedrigsten Werte auf. Deutlich zu erkennen war auch hier, dass bei den Messungen mit dem SRT-Pendel neben einem Einfluss der Mikrotextur auch ein Einfluss der Makrotextur auf den Messwert vorhanden war. Denn die Abnahme der Messwerte des 'Kunstrasen'- sowie des 'Besenlängsstrichs oN' infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus kann vor allem auf den Verlust der Spitzen im Bereich der Makrotextur (vgl. Bild 35) und die Zunahme der Messwerte der anderen Texturen auf die Zunahme der Feinrauheit durch ein Freilegen der Gesteinskörner und deren Eigenrauheit zurückgeführt werden.

Der Auftrag des Nachbehandlungsmittels verursachte in den Ausgangstexturen eine Zunahme der Werte im Vergleich zu den nicht nachbehandelten Oberflächen. Dies ist durch die zuvor bereits beschriebenen Veränderungen der Textur beim Auftrag des Nachbehandlungsmittels zu erklären. Nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus war ein Einfluss der Texturgeometrie und des Nachbehandlungsmittels nicht mehr erkennbar, da der Oberflächenmörtel und auch der vom Nachbehandlungsmittel beeinflusste Bereich durch die Beanspruchungen abgetragen worden waren.

4.3.3 Zusammenfassung der Untersuchungen im Labor

In den durchgeführten Laboruntersuchungen wurden vier unterschiedliche Texturgeometrien anhand einer üblichen Rezeptur eines Oberbetons untersucht. Die im Labor hergestellten und mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus untersuchten Texturgeometrien waren ein

'Jutetuchlängsstrich', ein 'Jutetuchlängsstrich mit Kamm', ein 'Besen-' und ein 'Kunstrasenlängsstrich'. Zudem wurde jeweils eine Probekörperserie mit einem 'Jutetuch-' sowie einem 'Kunstrasenlängsstrich' mit einem Nachbehandlungsmittel versehen.

Fast alle im Labor untersuchten Texturgeometrien wurden durch den kombinierten Laborbeanspruchungszyklus im Bereich der Makrotextur eingeebnet und im Bereich der Mikrotextur aufgeraut. Im Bereich der Makrotextur erfolgte das Einebnen der Texturen vor allem über den Verlust an Profilsitzen. Mit Ausnahme der Textur 'Jutetuchlängsstrich mit Kamm', die zwar wie die übrigen Texturgeometrien die Profilsitzen verloren hat, aber durch die zusätzlich mit dem Kamm eingebrachten Profilliefen, die ursprüngliche Texturtiefe erhalten konnte. Die Reduktion der Feinrauheit wie dies in der Praxis infolge der mechanischen Beanspruchung festgestellt worden war (vgl. Kapitel 4.2.2), trat hier nicht auf. Dies lässt den Schluss zu, dass der bisher verwendete kombinierte Laborbeanspruchungszyklus hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung noch einen zu geringen Poliereffekt beinhaltet².

Die im Labor mit dem SRT-Pendel bestimmbaren Griffigkeitseigenschaften der jeweiligen Texturen und deren Veränderung infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus ergaben vor allem nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Texturgeometrien. Jedoch muss neben der für die Griffigkeit wichtigen Feinrauheit im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften einer Fahrbahnoberfläche auch eine ausreichende mittlere Oberflächentexturtiefe erhalten bleiben. Beides zeigten nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus der 'Jutetuchlängsstrich mit Kamm' sowie der 'Besen-' oder der 'Kunstrasenlängsstrich'. Der 'Jutetuchlängsstrich' weist herstellungsbedingt schon im Ausgangszustand eine gering ausgeprägte Makrotextur auf, die aus diesem Grund im Vergleich zu den anderen Texturgeometrien schnell abgetragen/verloren wird. Zudem ist für den Erhalt von günstigen Lärmeigenschaften einer Fahrbahnoberfläche die Beständigkeit der Texturgeometrie selbst von Bedeutung. Hier erwiesen sich vor allem die grobrauen aber auch lärmtechnisch ungünstigen Texturen, wie zum Beispiel der Besenlängsstrich, gegenüber den eher feinrauen und lärmtechnisch günstigen Texturen, wie zum Beispiel der Jutetuchlängsstrich, als beständiger.

Eine Veränderung der Texturgeometrie im frischen Zustand konnte durch das Auftragen eines Nachbehandlungsmittels bei augenscheinlicher mattfeuchte der Betonoberfläche beobachtet werden. So veränderte sich die ursprünglich eingebrachte Textur durch den Auftrag im Bereich der Mikro- und Makrotextur. Im Bereich der Mikrotextur konnte dadurch insgesamt eine Zunahme der Feinrauheit beobachtet werden, die hauptsächlich auf ein Entfernen der Zementleimschicht und einem damit verbundenen Freilegen der Eigenrauheit der Gesteinskörner zurückgeführt werden konnte. Im Bereich der Makrotextur wurde durch die feinen Tropfen des Sprühfilms des Nachbehandlungsmittels eine eigene Textur in den frisch texturierten Oberflächenmörtel eingeprägt.

² Untersuchungen im Zusammenhang mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus sind im folgenden Kapitel 6 enthalten.

5 Einfluss der Betontechnologie auf die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften

5.1 Allgemeines

Neben der Texturgeometrie selbst hat der Oberflächenmörtel in welche diese eingebracht wird, einen bedeutenden Einfluss auf die Beständigkeit der Textur und somit auf die Oberflächeneigenschaften. In der Praxis liegt das Hauptaugenmerk beim Entwurf einer Rezeptur auf den geforderten Festbetoneigenschaften und im Weiteren bei der Herstellung der Betonfahrbahndecke auf einem guten Oberflächenschluss. Die in der Vergangenheit aufgetretenen frühen Einbußen beim Gebrauchsverhalten texturierter Oberflächen wurden hauptsächlich mit der eingebrachten Texturgeometrie in Verbindung gebracht. Jedoch werden schon beim Entwurf und beim Einbau des Betons maßgeblich die Dauerhaftigkeit der in die Oberfläche eingebrachten Textur und somit das Gebrauchsverhalten der Fahrbahndecke beeinflusst.

Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit die Betonfahrbahndecken zweier Neubaumaßnahmen mit dem Ziel untersucht, Erkenntnisse über betontechnologische Einflüsse auf die Entstehung und Zusammensetzung des für die Dauerhaftigkeit wichtigen Oberflächenmörtels zu gewinnen.

Die Untersuchungen im Labor knüpften an die Erkenntnisse der betrachteten Praxisstrecken an. Dabei wurden Einflüsse auf die Entstehung und der Zusammensetzung des Oberflächenmörtels sowie ein Einfluss unterschiedlicher w/z-Werte und Mörtelgehalte auf die Texturbeständigkeit untersucht.

5.2 Untersuchungen an Praxisstrecken

5.2.1 Untersuchungen an einem Streckenabschnitt der BAB A92

5.2.1.1 Beschreibung und Herstellung des Streckenabschnittes

Im Zuge des sechsstreifigen Ausbaus der Autobahn BAB A92 bei München zwischen dem AK Neufahrn und der AS Flughafen München wurde die Fahrbahn in Fahrtrichtung Deggendorf über die gesamte Fahrbahnbreite in Betonbauweise neu gebaut. Der Deckeneinbau selbst erfolgte im Oktober und November 2002 in zweischichtiger Bauweise mit einem Gleitschalungsfertiger auf einer hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT). Die Texturierung erfolgte mit einem Jutetuch in Längsrichtung, das an den Nachläufer angebracht war. Im Anschluss wurde von demselben Nachläufer das Nachbehandlungsmittel automatisch aufgetragen. Der Abstand zwischen dem Fertiger und dem Nachläufer betrug zum Zeitpunkt der Untersuchungen zwischen 40 m und 60 m. Die für die Herstellung des Betons verwendeten Ausgangsstoffe erfüllten die Anforderungen der ZTV StB-Beton 01 [75]. Der w/z-Wert des Betons betrug 0,40. Als Zement wurde zur Gewährleistung einer ausreichenden Festigkeitsentwicklung bei den vorherrschenden herbstlichen Einbaubedingungen ein CEM I 42,5 R verwendet. Die Gesteinskörnung bestand aus einem kalzitischen Sand 0/4a aus der Münchener Schotterebene, einem aus demselben Werk stammenden Kies 4/8 und zwei Edelsplitten 8/16 und 16/22 aus Granit. Eine detaillierte Analyse des

verwendeten Sandes, des Zementes, der Kornzusammensetzung und der Zusammensetzung des Betons befinden sich im Anhang D.

5.2.1.2 An dem Streckenabschnitt durchgeführte Untersuchungen

Allgemeines

Die Untersuchungen umfassten die Bestimmung der betontechnologischen Eigenschaften des verwendeten Oberbetons und die Analyse des Oberflächenmörtels. Die Griffigkeit der Oberfläche im Bereich des Standstreifens, dem 1., dem 2. und dem 3. Fahrstreifen wurde im Frühjahr 2003 mit dem SKM gemessen.

Frischbetoneigenschaften

Während der Herstellung der BAB A92 wurden am Beton an vor dem Gleitschalungsfertiger entnommenen Proben der Luftporengehalt, die Frischbetonrohichte, der Wassergehalt und die Kornzusammensetzung bestimmt. Die Untersuchungen der Mörtel­eigenschaften erfolgten an Proben, die unmittelbar nach der Herstellung der Fahrbahndecke (vor der Texturierung und Nachbehandlung) entnommen worden waren. Die Stelle der Probennahme des Oberflächenmörtels entsprach in etwa der Stelle des zuvor beprobten und dann eingebauten Betons. Am frischen Oberflächenmörtel wurden der Luftporengehalt, der Wassergehalt, die Rohdichte sowie die Kornzusammensetzung bestimmt. Zudem wurde die Dicke des frischen Oberflächenmörtels erfasst.

Während der Herstellung der Fahrbahndecke ist die für einen üblichen Straßenbeton vergleichsweise weiche Konsistenz des Frischbetons aufgefallen, die auch zu einer ausgeprägten Mörtelansammlung vor dem Querglätter führte, vgl. Bild 39.



Bild 39: Ausgeprägte Mörtelansammlung vor dem Querglätter beim Betoneinbau auf der BAB A92

Die Untersuchung des entnommenen Frischbetons und des Oberflächenmörtels umfassten die Bestimmung des Wassergehaltes, des Gehaltes an Luftporen und der Rohdichte im frischen Zustand. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Des Weiteren wurde an den Proben des Oberflächenmörtels an welchen der Wassergehalt mittels Darren bestimmt wurde, die Kornzusammensetzung (Bild 40) ermittelt.

Tabelle 4: Mittelwerte und Variationskoeffizienten der ermittelten Kennwerte des Frischbetons bzw. des frischen Oberflächenmörtels der BAB A92

Bezeichnung	Frischbeton		Oberflächenmörtel	
	Mittelwert	Variationskoeffizient	Mittelwert	Variationskoeffizient
1	2a	2b	3a	3b
Wassergehalt	7,3 M.-%	4,4 %	17,3 M.-%	11,7 %
LP-Gehalt	4,0 Vol.-%	12,1 %	10,8 Vol.-%	22,7 %
Rohdichte	2,43 kg/m ³	0,9 %	2,02 kg/m ³	2,7 %

Erwartungsgemäß war die Streuung der am frischen Oberflächenmörtel festgestellten Kennwerte bedeutend größer als die des Frischbetons. Zudem zeigte sich der bekannte Sachverhalt, dass der Oberflächenmörtel in seiner Zusammensetzung - z.B. beim Wassergehalt - sich deutlich vom Beton unterscheidet. Eine grobe Abschätzung des w/z-Wertes des Oberflächenmörtels anhand der ermittelten Wassergehalte und mit der Annahme, dass der Kornanteil < 0,063 mm bei der Siebung überwiegend aus Zement besteht, ergab einen mittleren w/z-Wert von rd. 0,8. In Folge dessen wies der Oberflächenmörtel eine andere Festigkeit bzw. ein anderes Porensystem als der Kernbeton auf.

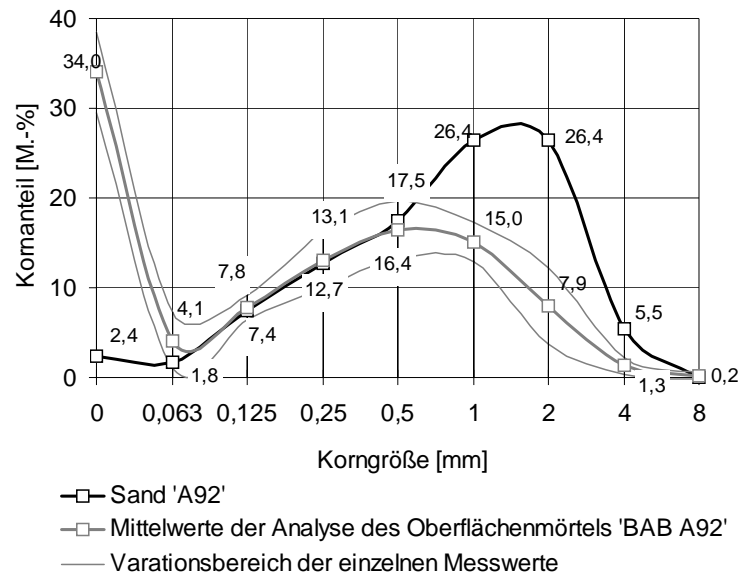


Bild 40: grau: Mittelwert (mit Variationsbereich) des Kornanteils des untersuchten Oberflächenmörtels der BAB A92;
schwarz: Kornanteil des verwendeten Sandes 'A92'

Im Verlauf des Kornanteils des Oberflächenmörtels ist zu erkennen, dass der Oberflächenmörtel sedimentierte, d.h., dass die groben Sandkörner abgesunken waren und der Oberflächenmörtel einen hohen Anteil an Feinstoffen $< 0,063$ mm besaß. Die oberste Schicht war somit wenig rauer Zementstein. Dieser Oberflächenmörtel erwies sich bei der Probennahme als weich und wies eine Dicke von bis zu 3,0 mm auf.

Oberflächeneigenschaften

Die Texturierung erfolgte durch Nachziehen eines Jutetuchs, das an dem Nachläufer angebracht war. Der Abstand des Nachläufers zum Fertiger betrug zum Zeitpunkt der Untersuchungen zwischen 40 und 60 m. Der vorhandene Jutetuchlängsstrich war gut erkennbar, und durch den weichen Oberflächenmörtel sehr ausgeprägt. Neben dem ausgeprägten Jutetuchlängsstrich konnten außerdem grobe Gesteinskörner an der Oberfläche festgestellt werden. Augenscheinlich war dies nicht auf ein Entfernen des weichen Oberflächenmörtels zurückzuführen, sondern vielmehr auf ein Herauslösen der Körner aus der weichen Matrix bei der Texturierung, vgl. Bild 41.



Bild 41: Detail einer Stelle, an welcher ein grobes Gesteinskorn infolge des weichen Oberflächenmörtels durch das Jutetuch aus der Matrix herausgelöst und mitgeführt wurde

Die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche wurde mit dem SKM etwa ein Vierteljahr nach Verkehrsfreigabe in der rechten Rollspur der drei Fahrstreifen sowie auf dem Standstreifen gemessen. Das Messergebnis ist in Bild 42 enthalten. [93]

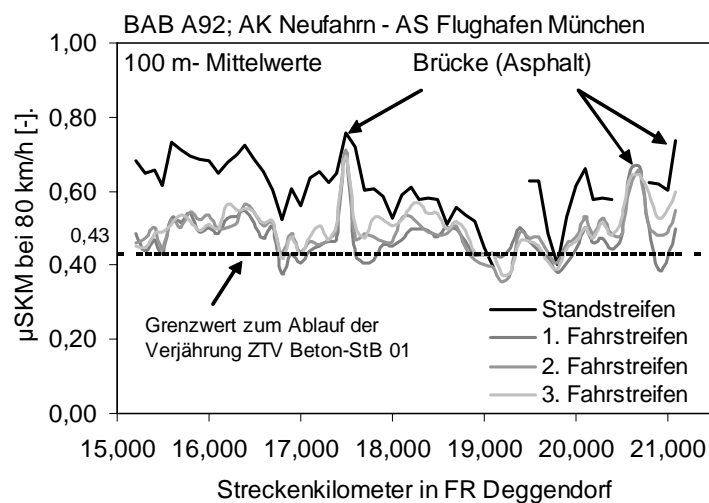


Bild 42: Griffigkeitswerte gemessen mit dem SKM, 100 m-Mittelwerte ca. 3 Monate nach Verkehrsfreigabe [93]

Die Griffigkeitswerte in den Rollspuren der drei Fahrstreifen lagen bereits nach nur drei Monaten nach Verkehrsfreigabe in einzelnen Bereichen unterhalb des Grenzwerts zum Ablauf der Verjährungsfrist nach ZTV Beton-StB 01 [75] von 0,43. Dem gegenüber wiesen die Griffigkeitswerte des Standstreifens sichtbar höhere Griffigkeitswerte auf. Das heißt, der Rückgang des Griffigkeitsbeiwerts im Bereich der Fahrstreifen kann primär auf die Verkehrsbeanspruchung zurückgeführt werden. Der schnelle Griffigkeitsverlust ergab sich aus der beobachteten Feinstoffanreicherung und der festgestellten großen Dicke des Oberflächenmörtels. Durch die bis dahin hauptsächlich stattfindende mechanische Beanspruchung des Verkehrs wurden keine griffigkeits-

relevanten Bestandteile des Sandes bzw. des Grobkorns freigelegt. Somit wurde der hauptsächlich aus Zementstein bestehende Oberflächenmörtel poliert, und die Fahrbahnoberfläche wies trotz gut sichtbarer Makrotextur den beobachteten Griffigkeitsabfall auf.

5.2.2 Untersuchungen an einem Streckenabschnitt der BAB A4

5.2.2.1 Beschreibung und Herstellung des Streckenabschnittes

Der für die hier durchgeführten Untersuchungen betrachtete Streckenabschnitt befindet sich auf der BAB A4 bei Köln in Fahrtrichtung Köln zwischen der Tank- und Rastanlage 'Frechen' und dem AK Köln-West (km 59+515 bis km 61+500). Die Autobahn weist in diesem Bereich drei Richtungsfahrstreifen auf, wobei der 1. Fahrstreifen und der Standstreifen in Beton und die beiden Überholfahrstreifen in Asphalt ausgeführt wurden. In dem untersuchten Bereich erfolgte der Betoneinbau Anfang Juli 2005 mit einem Gleitschalungsfertiger (gleicher Typ wie bei der Herstellung der BAB A92) in zweischichtiger Bauweise. Die Texturierung erfolgte mit einem nachgezogenen Jutetuch, das an den Nachläufer angebracht worden war. Von diesem wurde auch das pigmentierte Nachbehandlungsmittel auf die Oberfläche aufgebracht.

Die für die Herstellung des Betons verwendeten Ausgangsstoffe erfüllten die Anforderungen der ZTV StB-Beton 01 [75]. Der w/z-Wert des Betons betrug 0,45. Als Zement wurde ein CEM I 32,5 R verwendet. Die Gesteinskörnung bestand aus einem quarzitischem Sand 0/2, einem Kies 2/8 aus demselben Werk, und einem Edelsplitt 8/16 und 16/22 aus Diabas aus einem anderen Lieferwerk. Eine Analyse des verwendeten Sandes, des Zementes und der Zusammensetzung des Betons befinden sich im Anhang D.

5.2.2.2 An dem Streckenabschnitt durchgeführte Untersuchungen

Allgemeines

Beim Einbau des Betons wurde der gleiche Umfang an Untersuchungen wie auf der BAB A92 durchgeführt (vgl. Kapitel 5.2.1.2).

Anhand dieser Praxisstrecke wurden auch die Untersuchungen zur Abschätzung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden an der Fahrbahnoberfläche zu definierten Zeitpunkten Messungen der Oberflächeneigenschaften mit dem SKM sowie an entnommenen Bohrkernoberflächen Messungen im Labor durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Untersuchungsumfanges befindet sich im folgenden Kapitel 6.

Frischbetoneigenschaften

Die Entnahme des zu untersuchenden Frischbetons erfolgte unmittelbar vor dem Einbau und die des Oberflächenmörtels unmittelbar hinter dem Längsglätter und vor der Texturierung. Die Stelle der Probennahme des Oberflächenmörtels entsprach in etwa der Stelle des zuvor beprobten und dann eingebauten Betons.

Die Untersuchungen am entnommenen Frischbeton umfassten die Bestimmung des Wasser-

gehalten mittels Darren, der Rohdichte, des Verdichtungsmaßes und des Gehalts an Luftporen. An den jeweiligen Entnahmestellen des Frischbetons wurde die rechnerische Dicke des Oberflächenmörtels, dessen Wassergehalt mittels Darren, dessen Rohdichte und die Kornzusammensetzung der gedarrten Probe bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 5 und die Kornzusammensetzung des Oberflächenmörtels in Bild 43 dargestellt. Die Einzelwerte an den jeweiligen Entnahmestellen sind im Anhang D in der Tabelle A 13 und der Tabelle A 14 enthalten.

Tabelle 5: Mittelwerte und Variationskoeffizienten der ermittelten Kennwerte des Frischbetons bzw. des frischen Oberflächenmörtels der BAB A4

Bezeichnung	Frischbeton		Oberflächenmörtel	
	Mittelwert	Variationskoeffizient	Mittelwert	Variationskoeffizient
1	2a	2b	3a	3b
Wassergehalt	7,9 M.-%	2,1 %	20,3 M.-%	6,3 %
LP-Gehalt	3,7 Vol.-%	12,4 %	-	-
Verdichtungsmaß	1,28	4,2 %	-	-
rechnerische Mörtelschichtdicke	0,77 mm	16,7 %	-	-
Rohdichte	2,36 kg/m ³	4,3 %	1,87 kg/m ³	4,2 %

Der Frischbeton wies an den untersuchten Stellen eine straßenbetontypische steife Konsistenz ($C_{\text{Mittelwert}} = 1,28$) auf, welche sich auch positiv auf die sich einstellende rechnerische Dicke des Oberflächenmörtels auswirkte. Diese lag im Mittel bei 0,77 mm und war somit in dem nach M OB [8] anzustrebenden Bereich von 0,5 - 1,0 mm. Die gute Qualität des zum Untersuchungszeitraum eingebauten Frischbetons zeigte sich auch schon während der Herstellung, durch das Ausbilden einer gleichmäßigen Mörtelwalze mit einem Durchmesser von rd. 15 - 20 cm und einer guten Texturierbarkeit. Zudem ergab die Analyse der Kornzusammensetzung der gedarrten Proben des Oberflächenmörtels, dass der Siebrückstand mit dem des verwendeten Sandes (vgl. Bild 43) einen vergleichbaren Verlauf aufwies. Das bedeutet, dass es zu keinem Sedimentieren und somit zu keinem Verlust der griffigkeitsrelevanten Bestandteile des Sandes $> 0,5$ mm gekommen war.

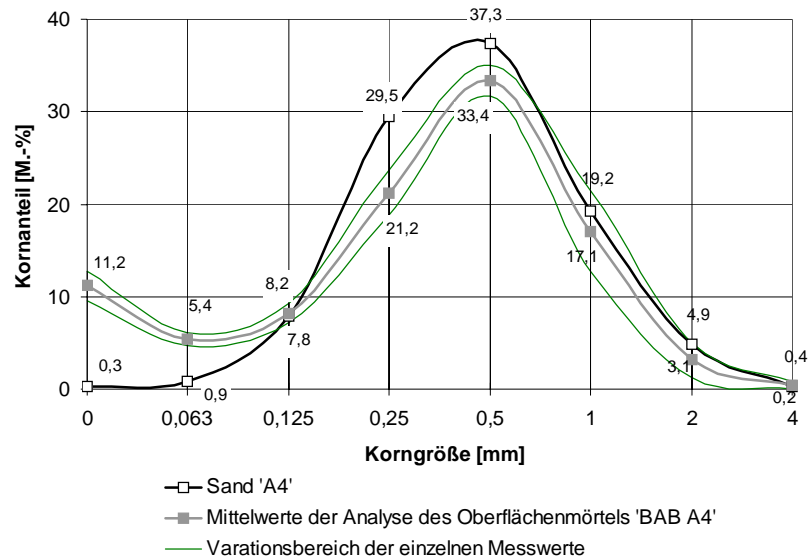


Bild 43: grau: Mittelwert (mit Variationsbereich) des Kornanteils des untersuchten Oberflächenmörtels der BAB A4;
schwarz: Kornanteil des verwendeten Sandes 'A4'

Oberflächeneigenschaften

Die Texturierung erfolgte durch Nachziehen eines Jutetuchs, das an dem Nachläufer angebracht war. Der Abstand des Nachläufers zum Fertiger betrug zum Zeitpunkt der Untersuchungen zwischen 10 – 20 m. Der Jutetuchlängsstrich konnte zielsicher in den frischen Oberflächenmörtel eingebracht werden, jedoch wurde dieser, durch den unmittelbaren Auftrag des Nachbehandlungsmittels bereichsweise stark verändert (vgl. Bild 44).

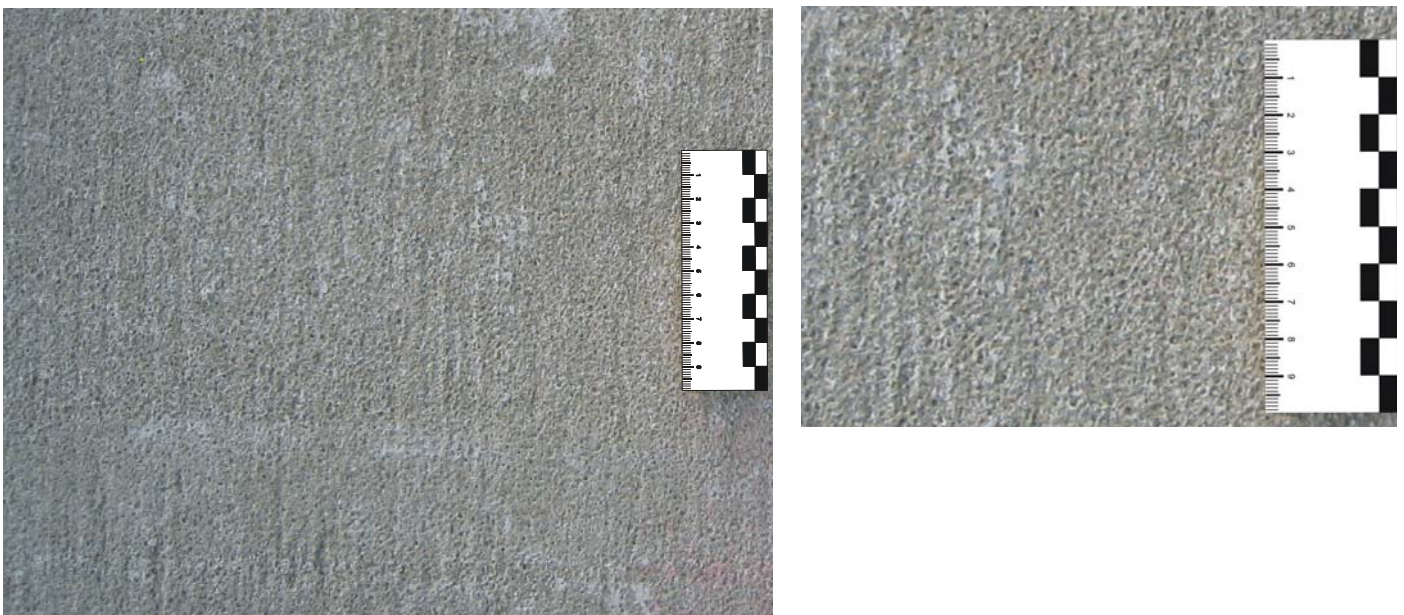


Bild 44: Textur nach Auftrag des Nachbehandlungsmittels im erhärteten Zustand (rechts im Bild: stark vergrößert)

Auf dem Streckenabschnitt wurde die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche im Zuge der Untersuchungen zur Abschätzung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (vgl. Kapitel 6.3) in definierten Zeitabständen untersucht. Die zeitliche Entwicklung des μ SKM-Wertes ist in Bild 45 als Mittelwert des gesamten untersuchten Streckenabschnittes dargestellt. Die Messungen die unmittelbar vor Verkehrsfreigabe auf dem Standstreifen durchgeführt wurden, konnten wegen starker Verschmutzung des Messbereichs durch den Baustellenverkehr nicht berücksichtigt werden. Die erste Messung im Rollspurbereich des 1. Fahrstreifens erfolgte 2 Wochen nach Verkehrsfreigabe. Des Weiteren sind in Bild 45 Mittelwerte des gesamten untersuchten Streckenabschnittes der BAB A92 vom Standstreifen sowie von der Rollspur des 1., 2. und 3. Fahrstreifens enthalten. Die Griffigkeitseigenschaften des untersuchten Streckenabschnitts der BAB A92 die 3 Monate nach Verkehrsfreigabe gemessen wurden sind in Bild 42 enthalten.

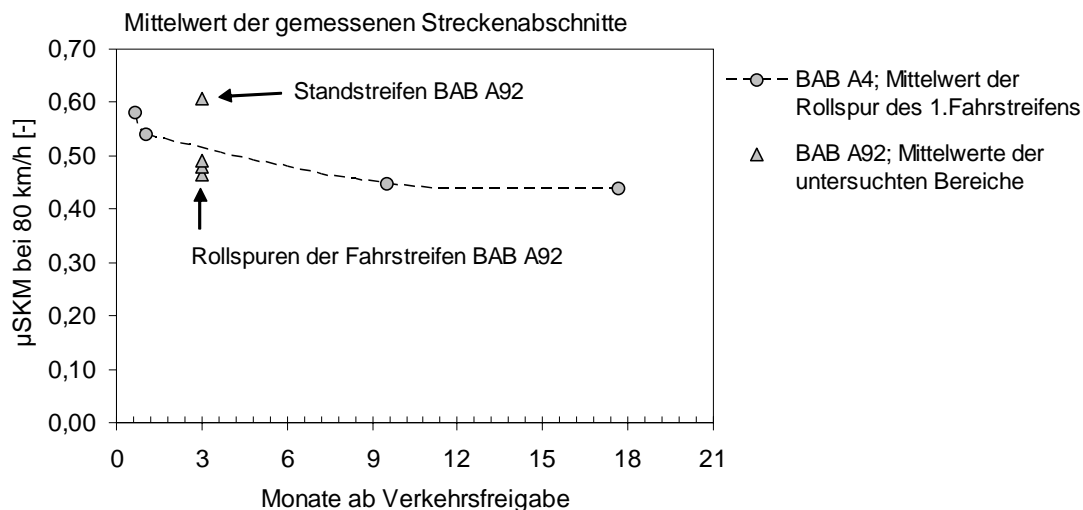


Bild 45: Entwicklung der über den jeweiligen Streckenabschnitt gemittelten Griffigkeitswerte, die mit dem SKM gemessen wurden

Gut zu erkennen ist, dass das anfänglich gute Griffigkeitsniveau der BAB A4 bei der Messung, die ca. 1,5 Jahre nach der Verkehrsfreigabe erfolgt war, nicht mehr vorhanden ist. Das anfänglich gute Griffigkeitsniveau bestätigt die Ergebnisse der Untersuchungen des Oberflächenmörtels, welcher beim Einbau neben einer guten Texturierbarkeit auch eine optimale Kornzusammensetzung aufgewiesen hatte. Ein deutlicher Abfall des Messwertes zeigte sich bei der Messung, die 9 Monate nach der Verkehrsfreigabe durchgeführt wurde. Im Vergleich hierzu war auf der BAB A92 ein deutlicher Abfall des Messwertes zwischen unbeanspruchtem Standstreifen und den Rollspuren der jeweiligen Fahrstreifen bereits in den ersten 3 Monaten zu beobachten. Da hier keine langfristigen Messdaten vorliegen, kann nur ein Einfluss der Zusammensetzung des Oberflächenmörtels in der Anfangsphase abgeleitet werden.

5.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der untersuchten Praxisstrecken

Auf den Abschnitten zweier Autobahnen wurde während der Herstellung der Fahrbahndecke der Frischbeton und der sich nach dem Verdichten und Glätten ergebende Oberflächenmörtel untersucht.

Dabei zeigte sich, dass - bei Einbau des Betons mit einem baugleichen Gleitschalungsfertiger - die Einbaukonsistenz eine direkte Auswirkung auf den sich einstellenden Oberflächenmörtel hatte. So führte der Einbau eines Betons mit einer eher plastischen Konsistenz zu einem dicken Oberflächenmörtel, der sedimentierte. Hingegen ergab sich beim Einbau eines Betons mit straßenbetontypischer steifer Konsistenz ein Oberflächenmörtel, der hinsichtlich der Dicke und der Zusammensetzung optimal war. In beide Oberflächenmörtel konnte ein Jutetuchlängsstrich eingebracht werden, wobei der Jutetuchlängsstrich der BAB A92 im eher dicken Oberflächenmörtel eine sichtbar stärker ausgeprägte Makrotextur besaß.

Jedoch zeigte sich bei den Griffigkeitseigenschaften der BAB A92, dass bereits nach 3-monatiger Liegezeit die Griffigkeit in Teilbereichen unterhalb des Grenzwerts der Verjährungsfrist entsprechend der der ZTV Beton-StB 01 lag. Eine Gegenüberstellung mit der Griffigkeitsentwicklung der BAB A4 bestätigte die Vermutung, dass die Zusammensetzung des Oberflächenmörtels einen Einfluss auf das Griffigkeitsverhalten der Fahrbahnoberfläche besitzt. Dies konnte hier nur für die Anfangsphase der Fahrbahnoberfläche bestätigt werden, da zu diesen Strecken bisher keine langfristigen Messdaten vorliegen.

Bei den Untersuchungen auf der BAB A4 bestätigte sich die bereits im M OB [8] angegebene Empfehlung, dass bei einer straßenbetontypischen Einbaukonsistenz des Betons sich in der Regel ein Oberflächenmörtel ergibt, der kein Sedimentieren der Sandanteile aufweist.

5.3 Untersuchungen im Labor

5.3.1 Einflüsse auf die Entstehung des Oberflächenmörtels

5.3.1.1 Allgemeines

Ziel der Untersuchungen war es, Erkenntnisse über betontechnologische Einflüsse auf die Entstehung der Dicke der sich einstellenden Mörtelschicht bei jeweils gleicher, praxisnaher Versuchsdurchführung zu gewinnen. Hierzu wurde neben betontechnologischen Faktoren wie zum Beispiel der Zement- und Sandart auch der Einfluss des Betonalters bei der Herstellung der Probekörper untersucht.

5.3.1.2 Umfang der Untersuchungen

Die Versuchsdurchführung sah dabei eine Ermittlung der zeitabhängigen Veränderung der Mörtelschichtdicken und der Frischbetoneigenschaften (Konsistenz, Frischbetonrohddichte, LP-Gehalt) vor. Zu diesem Zweck wurden die jeweiligen Untersuchungen 15, 45 und 75 Minuten nach Wasserzugabe durchgeführt.

Für die Untersuchungen wurde als Basisrezeptur die Zusammensetzung des Betons der BAB A92

(vgl. Kapitel 5.2.1) verwendet. Die Rezeptur wird im Folgenden mit 'Original A92' bezeichnet. In Tabelle 6 ist eine Übersicht über den Umfang der variierten Rezepturbestandteile enthalten.

Tabelle 6: Für gezielte Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften gewählte Zement- und Sandkombinationen der Rezeptur 'Original A92'

Bezeichnung	Zementwerk	Zementart	Sand
1	2	3	4
Original A92_RU 1	A	CEM I 32,5 R	'B'
Original A92_RU 2			'A92'
Original A92_RU 3		CEM II/A-LL 32,5 R	'A'
Original A92_RU 4			
Original A92_RU 5	B	CEM I 32,5 R	'B'
Original A92_RU 6			'A92'
Original A92_RU 7			'A'

Ausgehend von der Rezeptur 'Original A92' wurden die einzelnen Zemente und Sande gegeneinander ausgetauscht. Die Zemente stammten dabei aus zwei verschiedenen Werken (A und B). Aus dem Werk A wurde dabei ein CEM I 32,5 R sowie ein CEM II/A-LL 32,5 R und aus dem Werk B ein CEM I 32,5 R verwendet. Bei den für die Untersuchungen verwendeten Sanden wurden neben dem Sand 'A92', der beim Bau der BAB A92 eingesetzt wurde, ein vergleichbarer Sand 'A', und ein Sand 'B' verwendet. Beim Sand 'A' und beim Sand 'A92' handelte es sich jeweils um einen kalzitischen Sand 0/4 aus demselben Werk in der Münchner Schotterebene, wobei der Sand 'A92' gegenüber dem Sand 'A' im Bereich $< 1,0$ mm einen etwas geringeren Anteil aufgewiesen hatte (vgl. Bild A 29 im Anhang D). Im Gegensatz zu den beiden zuvor genannten Sanden war der Sand 'B' ein quarzitischer Sand 0/2.

Die für die Bestimmung der Mörtelschichtdicke verwendeten Probekörper hatten die Abmessungen $l \times b \times h = 300 \times 300 \times 100$ mm³. Die Verdichtung erfolgte in Anlehnung an die Praxis für eine Dauer von einer Minute auf einem Rütteltisch bei einer Frequenz von 100 Hz und einer Schwingbreite von 0,4 mm. Die Dauer der Verdichtung von einer Minute, ergibt sich aus der Verweildauer des Betons im Verdichtungsraum (Länge ca. 1,0 m, vgl. Bild 3) bei einem Fortschritt des Fertigers von 1 m pro Minute (vgl. Kapitel 2.1.1). Der für eine ausreichende Verflüssigung notwendige Energieeintrag in den Beton konnte im Labor nur mittels eines Rütteltisches gleichmäßig und reproduzierbar erreicht werden. Die Verwendung einer Rüttelflasche führte zu lokalen und ungleichmäßig auftretenden Mörtelschichtdicken an der Oberseite. Für alle Betone wurde eine Konsistenz (Verdichtungsmaß 1,28 – 1,30) nach dem Mischen (15 Minuten nach Wasserzugabe) vorgegeben.

Nach der Verdichtung wurde - wie in Kapitel 3.2 beschrieben - die rechnerische Mörtelschichtdicke bestimmt.

5.3.1.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Der sich bei der Herstellung einstellende Oberflächenmörtel hängt neben betontechnologischen Faktoren auch vom Betonalter bei der Herstellung ab. Das Betonalter zum Zeitpunkt des Einbaus ist in der Praxis ein wesentlicher Einfluss, da z.B. die benötigte Transportzeit des Betons vom Mischwerk bis zum Einbauort sehr stark schwanken kann. In Bild 46 sind die rechnerischen Mörtelschichtdicken aus den Laboruntersuchungen getrennt für die jeweiligen Untersuchungszeitpunkte dem zugehörigen Verdichtungsmaß gegenübergestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Betone sowie der übrigen Frischbetonuntersuchungen sind im Anhang D enthalten.

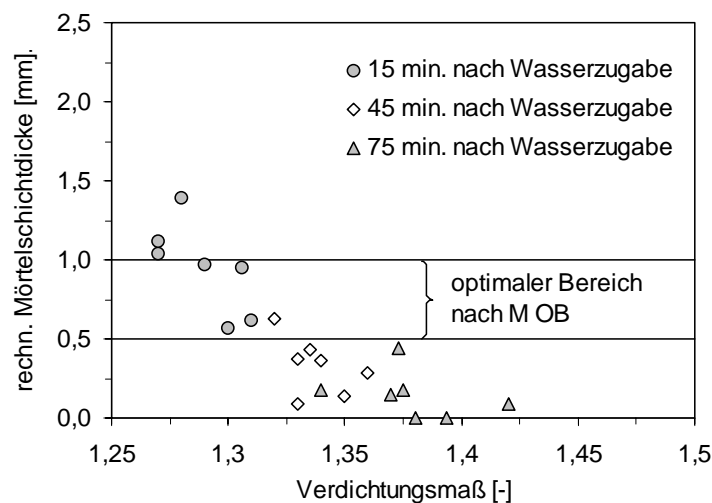


Bild 46: Zusammenhang zwischen rechnerischer Mörtelschichtdicke und Konsistenz, jeweils getrennt für die Prüfzeitpunkte nach Wasserzugabe

Gut zu erkennen ist, dass bei diesen im Labor durchgeführten Untersuchungen die rechnerische Mörtelschichtdicke mit zunehmenden Verdichtungsmaß abgenommen hatte. Sehr ausgeprägt war dieses Verhalten im noch jungen Betonalter (15 und 45 Minuten nach Wasserzugabe), da hier neben der Wirkung des Fließmittels auch die Viskosität des Zementleims von Bedeutung ist, die von dem Wasserrückhaltevermögen der verwendeten Zemente und Gesteinskörnungen abhängig ist. Zu dem späteren Prüfzeitpunkt konnte dieser Zusammenhang in ähnlicher Form festgestellt werden, jedoch war dies zum Prüfzeitpunkt '75 Minuten nach Wasserzugabe' wegen dem Nachlassen der Wirkung des Fließmittels und der bereits einsetzenden Hydratation nicht mehr so deutlich erkennbar. In Bild 46 ist zudem der Bereich der Mörtelschichtdicke markiert, der sich nach dem M OB [8] ergibt, wenn der Beton optimal zusammengesetzt ist und eine optimale Einbaukonsistenz aufweist. Die Betone mit einem Verdichtungsmaß zwischen 1,28 und 1,33 wiesen bei der Versuchsdurchführung im Labor diese rechnerische Mörtelschichtdicke auf. Dies lässt den Schluss zu, dass in der Praxis die Betone mit typischer Zusammensetzung ($\rho = 350 \text{ kg/m}^3$ CEM I; w/z-Wert von 0,40 bis 0,45) für das Erreichen einer optimalen rechnerischen Mörtelschichtdicke ebenso eine steife Konsistenz benötigen, zumal im Labor der Energieeintrag bei der Verdichtung im Vergleich zur Praxis geringer war.

Eine Betrachtung der rechnerischen Mörtelschichtdicken in Abhängigkeit der jeweiligen Konsistenzen zum Prüfzeitpunkt '45 Minuten nach Wasserzugabe' in Bild 47 zeigt, dass neben der Konsistenz auch die Betonzusammensetzung (bei etwa gleicher Konsistenz) einen Einfluss auf die Entstehung des Oberflächenmörtels hat.

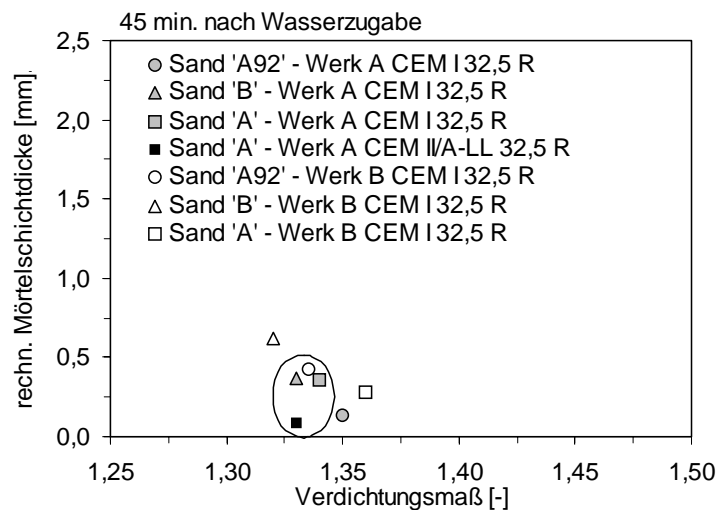


Bild 47: Zusammenhang zwischen rechnerischer Mörtelschichtdicke und Konsistenz zum Prüfzeitpunkt 45 Minuten nach Wasserzugabe

Deutlich zu erkennen ist, dass alle Betone zum Zeitpunkt der Untersuchungen in einem engen Konsistenzbereich zwischen 1,33 und 1,38 lagen. Vier Betone wiesen hier sogar ein Verdichtungsmaß von ca. $1,33 \pm 1$ auf (schwarzer Kreis in Bild 47). Auffallend war hier, dass der Beton bei welchem ein Portlandkalksteinzement (schwarzes Rechteck in Bild 47) verwendet worden war, die Mörtelschichtdicke im Vergleich zu den anderen drei Betonen deutlich geringer ausfiel. Obwohl der Frischbeton mit dem Portlandkalksteinzement verarbeitbar und verdichtungswillig war, erwies sich diese Zusammensetzung als derart stabil, dass durch den Energieeintrag der Verdichtung die gewollte Mörtelanreicherung an der Oberfläche nicht erzeugt werden konnte. D.h. dass neben der - wie zuvor angesprochenen - notwendigen steifen Konsistenz des zu verarbeitenden Betons noch zusätzlich die Betonzusammensetzung für die Entstehung der Mörtelschichtdicke bei gleicher Verarbeitbarkeit von Bedeutung ist.

5.3.2 Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Texturbeständigkeit

5.3.2.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Laborversuche sollten vor allem die für die Praxis wichtigen Einflüsse aus der Betonzusammensetzung auf die Texturbeständigkeit geklärt werden. So wurden neben dem w/z-Wert und den Mörtelgehalten auch der Einfluss verschiedener Sande auf die Beständigkeit eines Jutetuchlängsstrichs untersucht.

5.3.2.2 Umfang der Untersuchungen

Die Basisrezeptur für die Untersuchung zum Einfluss unterschiedlicher w/z-Werte sowie Mörtelgehalte wies hierbei einen w/z-Wert von 0,45 und einen Zementgehalt von 350 kg/m³ auf. Davon ausgehend wurde der w/z-Wert entweder mit konstantem Zementgehalt bzw. Mörtelgehalt (Zementgehalt \neq konst.) variiert. Die untersuchten w/z-Werte betragen 0,40 und 0,36, wobei die Variation des Mörtelgehaltes an der Rezeptur mit einem w/z-Wert von 0,40 erfolgte. In Tabelle 7 ist die Zusammensetzung der untersuchten Betone enthalten

Tabelle 7: Zusammensetzungen der für die Untersuchung zum Einfluss des w/z-Wertes und des Mörtelgehaltes verwendeten Betone

Bestandteile	Einheit	Variation w/z-Wert (Mörtelgehalt konstant)			Variation Mörtelgehalt (w/z-Wert konstant)	
		3	4	5	6	7
Zementart	[-]	CEM I 42,5 R				
Sieblinie	[-]	A/B 16				
w/z-Wert	[-]	0,45	0,40	0,36	0,40	
Zementgehalt	[kg/m ³]	350	375	397	350	375
Sand 'A92' 0/4a	[kg/m ³]	921	924	920	943	924
Basalt 2/8	[kg/m ³]	396	395	393	405	395
Basalt 8/16	[kg/m ³]	594	587	585	608	587
Soll-Luftgehalt	[Vol.-%]	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Der Sand ist im Zusammenhang mit den Oberflächeneigenschaften einer Betonfahrbahndecke ein wichtiger Faktor, da dieser im Oberflächenmörtel eingebettet einen Großteil der Feinrauheit zu Verfügung stellt. Für die Untersuchungen zum Einfluss des Sandes auf die Texturbeständigkeit wurde die Rezeptur 'Labor TU' aus Kapitel 4.3 verwendet und nur der Sand ausgetauscht. Neben dem Sand 'A92' wurde der Sand 'B' (vgl. Kapitel 5.3.1.2) verwendet. Die für die Griffigkeit relevanten PWS-Werte wurden für den Sand 'A92' mit μ PWS = 0,56 und für den Sand 'B' mit μ PWS = 0,64 entsprechend der TP Min-StB [94] ermittelt.

Die Herstellung und Lagerung der Texturprobekörper erfolgte wie bei den Untersuchungen zum Einfluss der Texturgeometrie auf die Oberflächendauerhaftigkeit (vgl. Kapitel 4.3). Die Probekörper wurden nicht nachbehandelt und im Klima 20 °/85 % r.F. gelagert.

5.3.2.3 Einfluss des Mörtelgehaltes und des w/z-Wertes auf die Texturbeständigkeit

Die hier verwendete Bezeichnung der Probekörperserien wurde entsprechend der Zusammensetzung gewählt. So bedeutet zum Beispiel die Bezeichnung A92_0,40-7z, dass bei dieser

Rezeptur der Sand 'A92', ein w/z-Wert von 0,40 und 7 M.-% mehr Zement gegenüber der Referenzmischung mit dem w/z-Wert von 0,45 verwendet worden war.

Die Betone besaßen bei der Herstellung der Texturprobekörper die gleiche Konsistenz (mit FM eingestellt). Zudem wurde darauf geachtet, dass die Texturprobekörper zur Untersuchung des Einflusses des w/z-Wertes eine annähernd gleiche Mörtelschichtdicke (zw. 0,40 und 0,65 mm) besaßen. Alle Probekörper wurden mit einem Jutetuchlängsstrich texturiert und nicht nachbehandelt. Nach Durchlaufen des Beanspruchungszyklus waren der Oberflächenmörtel und somit auch der Jutetuchlängsstrich bei allen Probekörpern nahezu vollständig abgetragen worden. Die unter dem Oberflächenmörtel liegenden Köpfe der groben Gesteinskörnungen waren zum Teil sichtbar.

Zum Nachweis der Praxisnähe der im Labor hergestellten Texturen sind in Bild 48 die Werte der Mikro- und Makrokennamplituden der Oberflächen im unbelasteten Zustand gegenübergestellt.

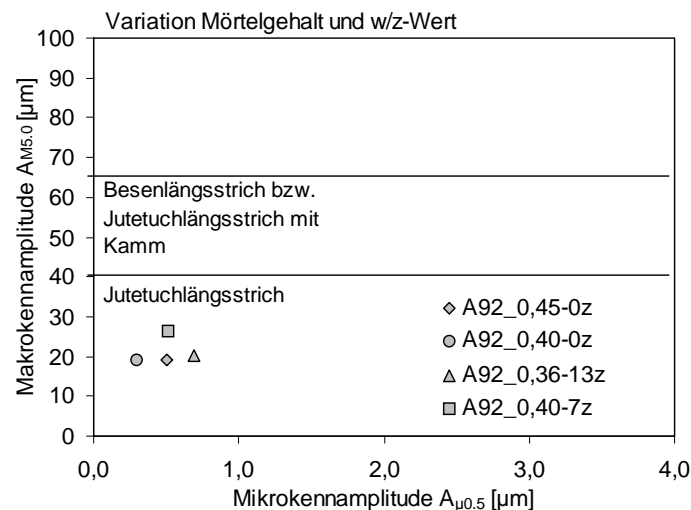


Bild 48: Gegenüberstellung der Makro- und Mikrokennamplitudenwerte des für diese Untersuchungen verwendeten Jutetuchlängsstrichs

Die Kennwerte der Texturgeometrien der Laborprobekörper befanden sich in dem angestrebten Texturbereich des Jutetuchlängsstrichs. Gut zu erkennen ist auch, dass die Texturen im Bereich der Makro- und Mikrotextur in einem engen Wertebereich lagen und somit eine gute Vergleichbarkeit gegeben war.

Die Entwicklung der Oberflächeneigenschaften der Textur in den jeweiligen Betonen ist in Bild 49 und Bild 50 mit der Entwicklung der primären Kenngrößen dargestellt. Die Entwicklung der mittleren Oberflächentexturtiefe und der Griffigkeitseigenschaft die mit dem SRT-Pendel gemessen worden war sind in Anhang D in den Bild A 37 und Bild A 38 enthalten und bestätigen die hier dargestellten Ergebnisse.

In Bild 49 sind die aus der Materialanteilkurve bestimmten Kenngrößen der Betone vor (Nullmessung) und nach Durchlaufen (Zyklusende) des Laborbeanspruchungszyklus dargestellt. Die dargestellten Ergebnisse sind jeweils Mittelwerte aus drei Probekörpern.

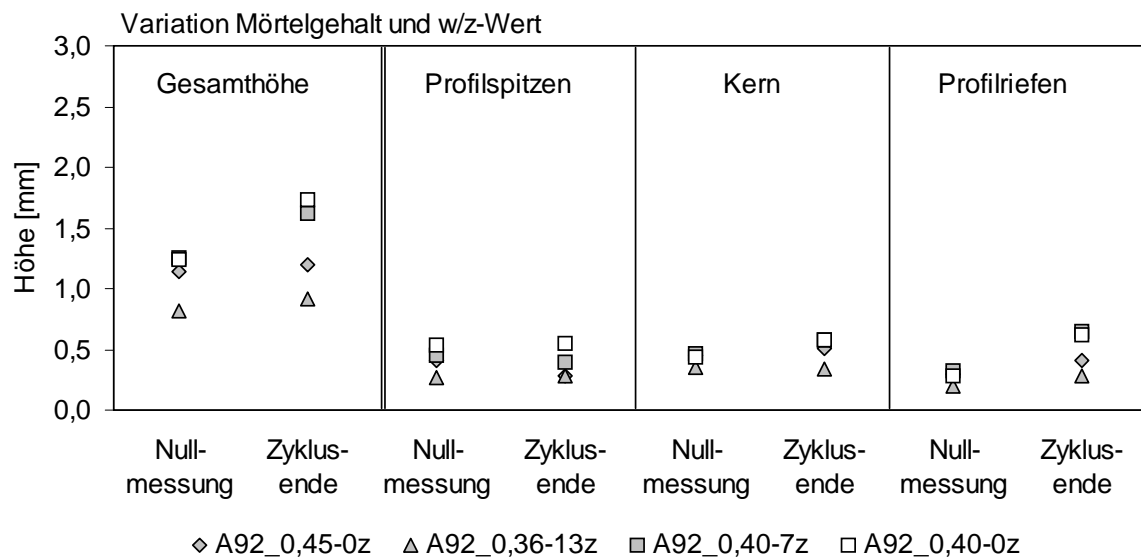


Bild 49: Aus der Materialanteilkurve bestimmte Kennwerte vor (Nullmessung) und nach Durchlaufen des Beanspruchungszyklus (Zyklusende)

Die in der Ausgangstextur (Nullmessung) festgestellten Gesamthöhen und Höhen der jeweiligen Texturbereiche waren typisch für einen Jutetuchlängsstrich. Der Jutetuchlängsstrich im Beton A92_0,36-13z hatte herstellungsbedingt eine etwas geringere Gesamthöhe, die aus einer geringeren Höhe der Profilsitzen resultierte.

Nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus waren der Jutetuchlängsstrich bei allen Probekörpern nahezu vollständig abgetragen und einzelne grobe Gesteinskörnungen freigelegt worden. Dies führte bei allen Oberflächen zu einem Anstieg im Bereich der Profiltriefen somit der Gesamthöhe. Dieser Effekt zeigte sich am deutlichsten bei den Probekörpern der A92_0,40-7z bzw. A92_0,40-0z mit welchen der Einfluss des Mörtelgehaltes auf die Texturbeständigkeit untersucht wurde. Da der Anstieg im Bereich der Profiltriefen bei den Probekörpern aus dem Beton A92_0,36-13z und aus dem Beton A92_0,45-0z vergleichbar ausfielen, kann ein direkter Einfluss des w/z-Wertes nicht abgeleitet werden. In den beiden anderen Profilbereichen zeigten die Probekörper aller Betone ein ähnliches Verhalten.

Insgesamt ergab sich somit bei den hier im Labor untersuchten Betone kein eindeutiger Einfluss des w/z-Wertes sowie des Mörtelgehaltes auf die Beständigkeit der Textur im Bereich der Makrotextur. Die Ergebnisse wurden auch mit durch Messungen der mittleren Oberflächentexturtiefen (vgl. Bild A 37 im Anhang D) bestätigt.

Die Veränderung der Mikrotextur infolge des Beanspruchungszyklus ist in Bild 50 mit der Veränderung der Mikrokennamplitude $A_{\mu 0,5}$ dargestellt.

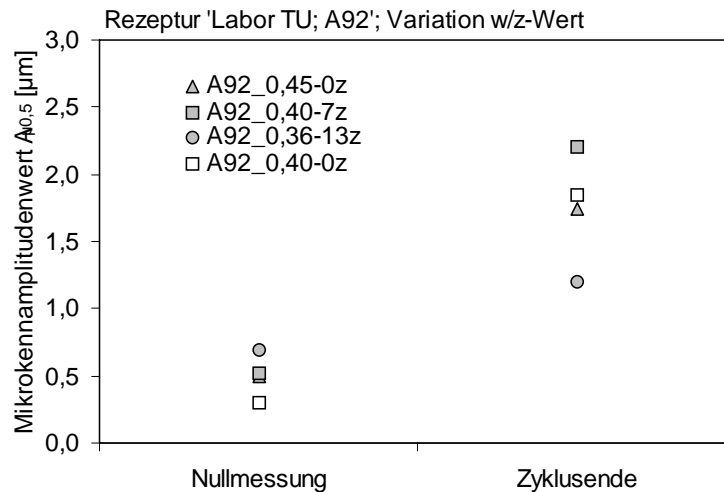


Bild 50: Veränderung der Mikrokennamplitude $A_{\mu 0,5}$ (Mikrotextur) infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Die Texturen wiesen im Ausgangszustand (Nullmessung) für einen Jutetuchlängsstrich typische Feinrauheit auf. Nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (Zyklusende) nahmen die Kennwerte und damit auch die Feinrauheit aller Texturen zu. Die Oberflächen der Probekörper A92_0,40-0z und A92_0,45-0z wiesen vergleichbare Werte auf, was den Schluss erlaubt, dass diese Absenkung des w/z-Wertes ohne Anpassung des Mörtelgehaltes keinen Einfluss auf die Entwicklung der Feinrauheit hat. Die Variation des w/z-Wertes bei konstantem Mörtelgehalt ergab hingegen eine geringere Feinrauheit der Oberfläche der Probekörper (A92_0,36-13z) mit dem vergleichsweise niedrigen w/z-Wert von 0,36. Anscheinend konnte die Feinrauheit des Sandes durch die Beanspruchung von dem vergleichsweise festeren Oberflächenmörtel - der zudem einen höheren Zementanteil aufgewiesen hatte (vgl. Tabelle 7) - nicht in ähnlicher Form freigelegt werden wie dies bei den anderen Probekörperserien der Fall (A92_0,45-0z, A92_0,40-7z) war. Die geringere Feinrauheit führte dabei auch zu einem geringen SRT-Wert (vgl. Bild A 38 im Anhang D). Ein Einfluss des Mörtelgehaltes ergab sich hier in der Form, dass die Probekörper mit einem höheren Mörtelgehalt auch eine vergleichsweise hohe Feinrauheit aufgewiesen haben. Dies widerspricht sich, denn die Anpassung des Mörtelgehaltes wurde über eine erhöhte Zugabe an Zement vorgenommen (vgl. Tabelle 7) was im Oberflächenmörtel zu einer Erhöhung des eher 'glatten' Zementsteins führt.

5.3.2.4 Einfluss des Sandes auf die Texturbeständigkeit

Der Einfluss der petrographischen Zusammensetzung des Sandes auf die Texturbeständigkeit wurde anhand eines kalzitischen (Sand 'A92') und eines quarzitisches (Sand 'B') Sandes

betrachtet (vgl. Kapitel 5.3.2.2). Hierbei blieb die Zusammensetzung des Betons stets die gleiche. Der Oberflächenmörtel wurde mit einem Jutetuchlängsstrich texturiert und nicht nachbehandelt.

Im Bereich der Makrotextur konnte kein Einfluss des verwendeten Sandes auf die mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus geprüfte Texturbeständigkeit festgestellt werden (vgl. Anhang D Bild A 39 bzw. Bild A 40). Denn der in den Oberflächenmörtel eingebettete Sand stellt einen Großteil der Feinrauheit (Mikrotextur) einer Fahrbahnoberfläche bereit.

Die Kenngrößen, welche die Feinrauheit (Mikrotextur) einer Oberfläche beschreiben, sind in Bild 51 und Bild 52 enthalten. Die Veränderung der Mikrokennamplitude $A_{\mu 0,5}$ infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus ist in Bild 51 veranschaulicht. Die dargestellten Kennwerte sind jeweils ein Mittelwert aus drei Probekörpern.

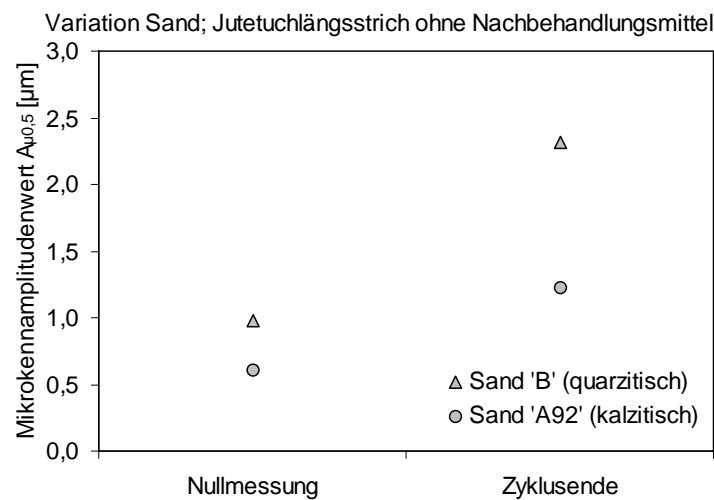


Bild 51: Veränderung der Mikrokennamplitude $A_{\mu 0,5}$ (Mikrotextur) infolge des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Die Feinrauheit der Oberfläche beider untersuchten Betone war im Ausgangszustand in dem typischen Bereich eines Jutetuchlängsstrichs. Nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus zeigte sich ein deutlicher Unterschied im Wert der Mikrokennamplitude beider Betone. So konnten bei dem Beton, bei welchem der quarzitisches Sand verwendet worden war, eine deutlich größere Feinrauheit festgestellt werden als bei dem Beton mit dem kalzitisches Sand. Dieses Ergebnis wurde jedoch nicht von den Messungen mit dem SRT-Pendel (vgl. Bild 52) bestätigt.

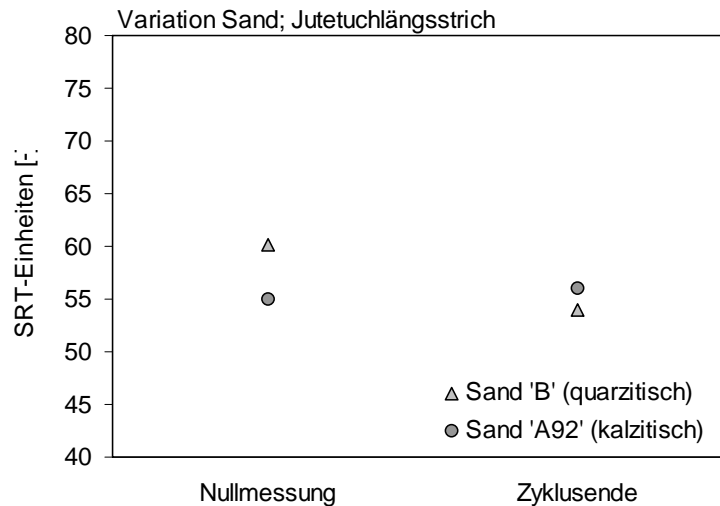


Bild 52: SRT-Einheiten der verschiedenen Texturgeometrien vor und nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Im Ausgangszustand war bei nahezu identischer Makrotextur der Messwert des Betons mit quarzitischem Sand höher als der des Betons mit kalzitischem Sand. Nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus wies die Textur des Betons mit quarzitischem Sand einen starken Rückgang des Messwertes auf, der bei vergleichbarer Makrotextur unter dem des Betons mit kalzitischem Sand lag.

Bei anderen Untersuchungen [11] wurden ebenfalls ein quarzitischer und ein kalzitischer Natursand, die mit einem zwei Komponenten Klebstoff auf einer Trägerplatte fixiert waren, untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass bei gleicher Einbettung der Sande, das quarzitisches Sandkorn als Ganzes aus der Einbettung herausgelöst wird, wobei das kalzitisches Sandkorn dagegen eher abgetragen und poliert wird. Das heraus gelöste quarzitisches Sandkorn hinterlässt dabei im Zementstein eine raue Vertiefung, die auf den Messwert des SRT-Pendel keinen Einfluss mehr hat, aber bei der Messung mit dem Doppeltriangulationssensor erfasst wird und somit zu dem in Bild 51 festgestellten starken Anstieg des Mikrokennamplitudenwertes geführt hatte.

5.3.3 Zusammenfassung der Laborversuche

Die Untersuchungen zum Einfluss des w/z-Wertes und des Mörtelgehaltes auf die Texturbeständigkeit wurden an einem nicht nachbehandelten Jutetuchlängsstrich durchgeführt. Im Ausgangszustand wiesen alle Texturen nahezu identische Kenngrößen der Oberflächeneigenschaften auf. Nach Durchlaufen des Beanspruchungszyklus war die Texturgeometrie bei allen Probekörpern sichtbar entfernt und vereinzelt die Köpfe der groben Gesteinskörnung freigelegt worden. Dies führte im Bereich der Makrotextur (Kennwerte der Materialanteilkurve, mittlere Oberflächentexturtiefe) bei allen im Labor untersuchten Oberflächen zu einer unterschiedlich starken Zunahme im Bereich der Profilriefen, was aber nicht eindeutig auf die variierten Parameter (w/z-Werte bzw. Mörtelgehalt) zurückgeführt werden konnte. Im Bereich der Mikrotextur konnte nur bei dem hier verwendeten sehr niedrigem w/z-Wert von 0,36 und einem

vergleichsweise hohen Zementgehalt ein ungünstiger Einfluss auf die Feinrauheit festgestellt werden. Für die im Straßenbau üblichen w/z-Werte von 0,40 bzw. 0,45 ergab sich kein Einfluss des w/z-Wertes auf die Feinrauheit. Die Erklärung für die Ergebnisse ist vor allem in der Entstehung und der damit verbundenen Zusammensetzung des Oberflächenmörtels begründet. Der Oberflächenmörtel weist in der Regel einen höheren w/z-Wert und eine feinstoffreichere Zusammensetzung als der übrige Mörtel im Kernbeton auf. Bei höheren w/z-Werten liegen die Festigkeiten generell auf einem niedrigeren Niveau. Bei anderen Untersuchungen [11] konnte zwar ein Einfluss des w/z-Wertes auf die Beständigkeit der Texturgeometrie (Makrotextur) festgestellt werden, wobei in diesem Fall neben einer Reduktion des w/z-Wertes von 0,45 auf 0,36 zusätzlich auch eine Zugabe von Silikastaub stattgefunden hatte. Dies führte zu einer erheblichen Verbesserung der Mörtelfestigkeit und somit zu einer höheren Dauerhaftigkeit der eingebrachten Texturgeometrie.

Die Untersuchungen zum Einfluss des Sandes auf die Texturbeständigkeit ergaben keinen Einfluss auf die Beständigkeit der Makrotextur. Hinsichtlich der mit dem SRT-Pendel bestimmten Griffigkeitseigenschaften hatten sich die Oberflächen bei welchen ein kalzitischer Sand verwendet wurde im Vergleich zu denjenigen mit quarzitischem Sand etwas günstiger Verhalten. Dies wurde bereits bei anderen Untersuchungen [11] in ähnlicher Weise festgestellt. Zurückgeführt wird dies auf die Stabilität der Einbettung des Sandkorns im Zementstein. Besitzt ein Sandkorn im Vergleich zur Zementsteinmatrix eine höhere Festigkeit kann sich dieses infolge einer Beanspruchung als Ganzes aus der Zementsteinmatrix lösen. Dadurch geht neben dem Korn selbst auch die für die Griffigkeit wichtige Eigenrauheit des Kornes verloren. Sande mit einer vergleichsweise niedrigeren Festigkeit, verbleiben dagegen in der Zementsteinmatrix. In der Regel sind diese Sande weniger polierresistent. Dies muss nicht grundsätzlich zu einer Verschlechterung der Griffigkeitseigenschaften führen, da das in der Zementsteinmatrix verbliebene Korn durch Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt wieder aufgeraut werden kann.

6 Abschätzung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

6.1 Allgemeines

Der bisher in den Untersuchungen verwendete kombinierte Laborbeanspruchungszyklus (vgl. Kapitel 3.4.2) wurde mit dem Ziel entwickelt, die in der Praxis auftretenden Beanspruchungen einer Fahrbahnoberfläche aus Beton möglichst realitätsnah und zeitraffend zu simulieren. Die Wirkung des bisher verwendeten kombinierten Laborbeanspruchungszyklus im Vergleich zu der in der Praxis stattfindenden Einwirkung aus Verkehr und Umwelt konnte bei dem Entwurf von [11] nur grob abgeschätzt werden. Aus diesem Grund wurden hier systematische Untersuchungen an einem neu gebauten Fahrbahnabschnitt durchgeführt, um einschätzen zu können, welche realen Einwirkungen durch den kombinierten Laborbeanspruchungszyklus simuliert werden.

6.2 Konzeption der Untersuchungen

Für die Abschätzung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus wurden Untersuchungen im Labor sowie Messungen an einer Praxisstrecke durchgeführt. Als Praxisstrecke wurde der Abschnitt der BAB A4 bei Köln herangezogen, der in Kapitel 5.2.2 im Zusammenhang mit den Versuchen zum Einfluss der Betontechnologie auf die Texturbeständigkeit während der Herstellung betrachtet wurde. Die Veränderungen der Oberflächeneigenschaften, das Verkehrsaufkommen sowie das dort herrschende Klima wurden über einen Zeitraum von ca. 1,5 Jahren erfasst. Im Labor wurden Bohrkernoberflächen, die aus diesem Streckenabschnitt vor der Verkehrsfreigabe entnommen wurden, zum Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe mit unterschiedlich intensiven Zyklen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus beansprucht. Zum Beanspruchungsbeginn wiesen die Bohrkernoberflächen somit die gleiche Historie hinsichtlich der Erhärtungsbedingungen und der mechanischen Beanspruchung durch den Baustellenverkehr auf. Die Veränderungen der Oberflächeneigenschaften der im Labor beanspruchten Bohrkernoberflächen wurden mit den Veränderungen der Oberflächeneigenschaften des betrachteten Streckenabschnitts der BAB A4 verglichen.

6.3 Umfang und Durchführung der Untersuchungen

6.3.1 Praxisstrecke - Wetterdaten und Verkehrsbelastung

6.3.1.1 Wetterdaten

Allgemeines

Die Umgebungsbedingungen an dem untersuchten Autobahnabschnitt wurden von einer vom Deutschen Wetterdienst betreuten Wetterstation erfasst. Ziel war es, durch die systematische Erfassung der Klimadaten an dem untersuchten Streckenabschnitt der BAB A4, die in der Praxis stattfindende Beanspruchung mit der im Labor durchgeführten simulierten Umwelteinwirkungen zu vergleichen und damit die jeweilige Intensität abzuschätzen.

Frosteinwirkung

Die Wetterdaten, der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes, umfassten die Tageswerte für die Minimal- und Maximaltemperatur sowie die Menge des Niederschlags. Anhand der über den Tag gemessenen Temperaturverläufe und den Niederschlagsereignissen konnten die Tage in Frost-, Eis- und Warmtage eingeteilt werden. Lag die Minimal- und die Maximaltemperatur den gesamten Tag unter dem Gefrierpunkt, so handelte es sich um einen Eistag. Fand ein Tauen statt (Nulldurchgang der Temperatur), so wurde dieser Tag als Frosttag bezeichnet. Bei Warmtagen kam es im Tagesverlauf zu keinen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Die Verteilung der Eis-, Frost- und Warmtage in der untersuchten Liegezeit der Fahrbahndecke ist in Tabelle 8 dargestellt. Dabei wurde eine Einteilung der betrachteten Zeiträume in Sommermonate und Wintermonate vorgenommen. Wobei der Zeitraum Sommermonate die Monate von April bis September und die der Wintermonate die Monate Oktober bis März des folgenden Jahres umfasst.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Wetterdaten

Monat	Eistage	Frosttage	Warmtage	Warmtage mit Niederschlag ¹⁾	Frosttage
1	2	3	4	5	6
Juli 2005 - September 2005	0	0	92	29	0
Oktober 2005 - März 2006	4	48	130	65	15
April 2006 - September 2006	0	1	183	58	0
Oktober 2006 - März 2007	0	9	173	70	4

¹⁾ Niederschlagsmenge > 1 l/m²

Wie bei der Frost-Tausalz-Prüfung im Labor (CDF-Verfahren) ist hinsichtlich der Frosteinwirkung in der Praxis neben der Feuchte vor allem die Anzahl der Temperaturnulldurchgänge und somit die Anzahl der Frosttage entscheidend. Um im Labor eine zeitraffende Wirkung zu erzielen finden pro 24 Stunden zwei Temperaturnulldurchgänge mit 40 K Temperaturunterschied statt. Im Vergleich zur Praxis stellt dies eine extreme Beanspruchung für den Beton dar, da die Temperaturänderungen bei freier Bewitterung über 24 Stunden stattfinden und die Temperaturdifferenzen zwischen der Maximal- und der Minimaltemperatur nicht derart extrem ausfallen. Dies ist vor allem für eine Übertragbarkeit der im Labor simulierten Beanspruchung auf die Praxis von Bedeutung, da z.B. das Nachsaugen von Tausalzlösung (Mikroeislinsepumpe) und die Spannungen, welche aus dem Eisdruck resultieren, direkt von der Temperaturbelastung abhängig sind [37]. So zeigten Untersuchungen von Hartmann [95] und Siebel [96], dass die Abwitterungsraten bei der Prüfung der Frost-Tausalz-Beständigkeit nach dem CDF-Verfahren abhängig von der Minimaltemperatur bei der Prüfung sind. Eine Anhebung der Minimaltemperatur von -20 °C auf -15 °C bewirkte beispielsweise eine Reduktion der Abwitterung nach 28 FTW um 5 % bis 9 % pro Kelvin, d.h. bei -15 °C wurden zwischen 25 % und 45 % geringere Abwitterungen bestimmt als bei -20 °C .

Neben dem Temperaturverlauf ist das Feuchteangebot bei der jeweiligen Temperatur für den Schädigungsfortschritt entscheidend. Im Laborversuch ist dies durch die ständige Lagerung der Prüffläche in der Tausalzlösung klar definiert. So kann durch den Effekt der Mikroeislinsepumpe und dem ausreichenden Feuchteangebot bei der Frost-Tausalz-Prüfung (CDF-Verfahren) ständig ein Nachsaugen von Tausalzlösung erfolgen. Dagegen ist bei der Fahrbahnoberfläche das Feuchteangebot nicht klar definiert, denn viele Frost-Tau-Wechsel finden hier auch während einer Trockenphase statt. Deshalb wurden in Tabelle 8 auch die Frosttage mit Niederschlag angegeben. Dabei wurden nur Niederschläge mit einer Menge $> 1\text{ l/m}^2$ berücksichtigt. Dadurch wird die Feuchte, die als Tau auftritt und damit dem Porensystem des Betons wegen der schnellen Verdunstung nicht zur Verfügung steht, nicht gewertet. Dabei zeigte sich, dass im Zeitraum von Oktober 2005 - März 2006 im Vergleich zum folgenden Jahr (Oktober 2006 - März 2007) eine deutlich höhere Anzahl an Frosttagen aufgetreten war. Während des gesamten Beobachtungszeitraums sind an der Praxisstrecke 19 Frosttage mit Niederschlag aufgetreten, die zu einer Beanspruchung der Fahrbahnoberfläche führten.

Aus den zuvor genannten Unterschieden zwischen den Beanspruchungen, die während der Prüfung im Labor und denen die in der Praxis auftreten, kann die Prüfung im Labor nicht direkt auf die Praxis übertragen werden. Hierzu werden derzeit zum Beispiel von Brandes [97] Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Prüfung im Labor der Frost-Tausalzbeständigkeit von Beton mit dem CDF-Verfahren auf die Praxis durchgeführt.

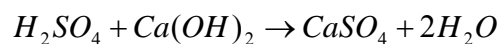
Einwirkungen infolge von Niederschlag – lösender Angriff

Wie bereits in Kapitel 2.4.2 angesprochen, treten bei einem Regenereignis verschiedene Mechanismen auf, welche die Betonoberfläche angreifen bzw. wodurch ein Abtrag stattfindet. Die Einwirkung des Regens stellt für die Fahrbahnoberfläche grundsätzlich eine lösende Beanspruchung dar, die während des Regens durch die mechanische Einwirkung der Fahrzeugreifen durch Abtrag der abgelösten Schicht verstärkt wird.

Der Angriffsgrad des Regenwassers auf die Betonoberfläche hängt maßgeblich von der Zusammensetzung des Regens ab. Zudem wird die Wirkung des Regens auf die beaufschlagte Betonoberfläche und damit die Dicke der angelösten Schicht von der Betonzusammensetzung (Zementgehalt, CaO-Gehalt des Zements) bestimmt.

Die betonangreifende Wirkung des Regenwassers ergibt sich aus dem sich einstellenden Gleichgewicht zwischen den in die Atmosphäre gelangten Säuren und Basen. Entsprechend den Untersuchungen des Umweltbundesamtes [40] lag der pH-Wert des Regens im Jahr 2002 zwischen 4,8 und 4,9. Dieser ergibt sich dabei hauptsächlich aus einer Übersäuerung des Regenwassers durch Schwefel- und Salpetersäuren, die sich in der Atmosphäre als Folgen der Schwefeldioxid- und Stickstoffbelastungen bilden. Im chemischen Sinn handelt es sich beim Regenwasser um eine gering gepufferte Säure mit einem niedrigen pH-Wert. Bei dieser Art der Säure (anorganische Säure) wird der Angriffsgrad der lösenden Reaktion von dem pH-Wert bestimmt. In der DIN EN 206 [98] sind in Tabelle 2 die Stärke des Angriffs von betonangreifenden Böden und Grundwässern definiert. Für das in Deutschland auftretende Regenwasser würde sich wegen des pH-Wertes ein mäßig chemischer Angriff (XA2) ergeben.

Der Angriff des Betons basiert dabei auf einer kalkauflösenden Reaktion. In Gleichung 2 ist dies beispielhaft für die im Regen vorkommende Schwefelsäure (H_2SO_4) dargestellt.



Gleichung 2

Das im Zementstein befindliche Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) wird von der Schwefelsäure (H_2SO_4) gelöst und eine neutrale Calciumsulfatlösung entsteht. Wegen der geringen Pufferkapazität des Regenwassers ist für einen stetigen lösenden Angriff ein stetiger Nachschub an unverbrauchter Säurelösung notwendig. Beim Regen wird dies durch die Regenmenge, die über die Dauer eines Regenereignisses auftritt, gewährleistet. Im Labor wird zur Gewährleistung eines konstanten Angriffsgrades eine gepufferte Essigsäure verwendet, vgl. Kapitel 3.4.2.

Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, wird die Schädigung einer Betonoberfläche maßgeblich von dem Abtrag der angelösten Schicht beeinflusst. Findet kein Abtrag der angelösten Schicht statt, so wird der weitere Korrosionsvorgang in den Beton verlangsamt und folgt annähernd dem \sqrt{t} -Gesetz (Bild 12). Dagegen führt ein ständiges Entfernen der angelösten Schicht zu einem beschleunigten Abtrag des Betons (Bild 12). In diesem Fall ist die Zunahme der Abtragtiefe über die Zeit konstant. Dies findet in der Praxis durch den Abtrag der angelösten Schicht infolge der stetigen Überrollung durch Fahrzeugreifen statt. Beim kombinierten Laborbeanspruchungszyklus erfolgt ein Abtrag der angelösten Schicht durch den mechanischen Angriff mit dem Prallabrießgerät im Anschluss an die lösende Beanspruchung.

Mit den zuvor beschriebenen Zusammenhängen kann der Zeitraum, den die Kombination aus lösendem und mechanischem Angriff im Rahmen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus simuliert, für die Praxis abgeschätzt werden.

Im Labor wurde die Abtragtiefe aus lösendem und mechanischem Angriff anhand des Abrießes der Bohrkernoberflächen, der sich durch die Prallabrießbeanspruchung im Anschluss an die lösende Beanspruchung ergeben hatte, bestimmt. Der Abrieß wurde dabei auf die beanspruchte

Fläche umgerechnet. Bei einer Dichte des Oberflächenmörtels von $1,9 \text{ kg/m}^3$ entsprach der Abrieb einem Abtrag von etwa $0,07 \text{ mm}$.

Zur rechnerischen Abschätzung der Abtragstiefe der in der Praxis stattfindenden Kombination aus Regen und Verkehr wurde grundsätzlich angenommen, dass die Säure nach Gleichung 2 vollkommen neutralisiert wird, und die entstandene angelöste Schicht vollständig abgetragen wird. Für die Berechnung der Dicke der angelösten Schicht wurden für die Regenmenge, für den pH-Wert des Regens, für die Betonzusammensetzung sowie für den CaO-Gehalt des Zements folgende Werte ermittelt bzw. angenommen. Die Regemenge wurde aus den Klimadaten der Wetterstation über den Zeitraum Juni 2005 bis April 2007 ermittelt. Im Bereich des hier betrachteten Fahrbahnabschnitts betrug die Regenmenge pro Jahr rd. 1000 l/m^2 . Der pH-Wert des Regens wurde entsprechend den Untersuchungen Ergebnissen der Messung des Umweltbundesamtes mit $4,8$ festgelegt. Zusätzlich wurden auch Berechnungen mit dem bei den Laborversuchen im Essigsäurepuffer vorliegenden pH-Wert von $4,5$ durchgeführt. Der Zementgehalt des bei der Herstellung der Fahrbahndecke verwendeten Betons betrug 360 kg/m^3 wobei der dabei verwendete Zement einen CaO-Gehalt von $62,3 \%$ aufwies. Der Zementgehalt des Oberflächenmörtels kann im Vergleich zum Kernbeton höher sein, weshalb die Berechnungen auch mit ein Zementgehalt von 400 kg/m^3 durchgeführt wurden. Anhand dieser Daten ergeben sich die in Bild 53 dargestellten zeitlichen Verläufe des Abtrags unter der Berücksichtigung, dass eine stetige Entfernung der angelösten Schicht stattfindet. Zudem beinhaltet Bild 53 den Abtrag, der durch die im Labor simulierte lösende Beanspruchung in Kombination mit der mechanischen Beanspruchung aufgetreten ist.

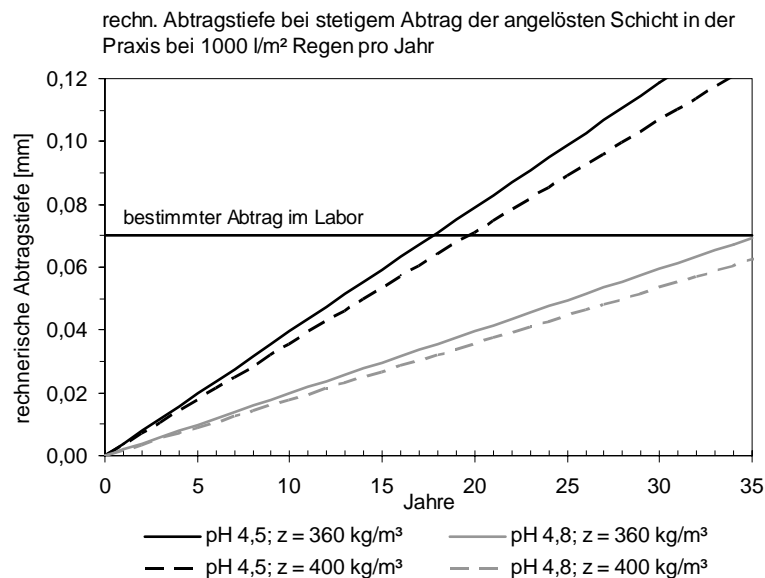


Bild 53: Abgeschätzter zeitlicher Verlauf des Abtrags in der Praxis

Deutlich zu erkennen ist, dass die zeitliche Entwicklung der Abtragstiefe von dem pH-Wert der angreifenden Lösung und weniger von dem Zementgehalt im oberflächennahen Bereich beeinflusst wird.

Anhand der Bedingungen (Regenmenge, Zusammensetzung Beton bzw. CaO-Gehalt Zement) des in diesen Untersuchungen betrachteten Streckenabschnitts ergibt sich mit der aus dem Laborversuch bekannten Abtragstiefe von etwa 0,07 mm ein simulierter Zeitraum zwischen 15 und 35 Jahren. Dies kann anhand der zuvor getroffenen Feststellungen nur eine grobe Annäherung darstellen, da z.B. bereits Änderungen im pH-Wert des Regens einen deutlichen Einfluss auf die Dicke der angelösten und damit der abtragbaren Schicht haben.

6.3.1.2 Verkehrsbelastung

In dem hier betrachteten Autobahnabschnitt wurde die Verkehrsbelastung, die in den Jahren 2004 und 2005 zwischen dem AK Kerpen und dem AK Köln West in Fahrtrichtung Köln erfasst wurde, betrachtet. Dabei betrug 2004 die durchschnittliche Verkehrsbelastung rd. 42.000 Kfz/24h bei einem LKW-Anteil von ca. 6 % (5.900 Kfz/24h). Im Jahr 2005 wurde eine Verkehrsbelastung rd. 40.000 Kfz/24h bei einem LKW-Anteil von ca. 6,5 % (5.150 Kfz/24h) gemessen.

6.3.2 Praxisstrecke - Bestimmung der Oberflächeneigenschaften und deren zeitliche Veränderung

6.3.2.1 Allgemeines

Das Ziel dieser Untersuchungen war es, die Veränderung der primären und sekundären Oberflächeneigenschaften durch die Einwirkungen aus dem Verkehr und der Umwelt zu verschiedenen Zeitpunkten nach Verkehrsfreigabe zu erfassen. Hierzu wurden vor Verkehrsfreigabe am 22.10.2005 sowie am 09.11.2005 (2 Wochen nach Verkehrsfreigabe), am 22.11.2005 (4 Wochen nach Verkehrsfreigabe), am 02.08.2006 (41 Wochen nach Verkehrsfreigabe) und am 04.04.2007 (75 Wochen nach Verkehrsfreigabe) die Oberflächeneigenschaften des in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Streckenabschnitts der BAB A4 durch Bohrkernentnahmen und durch Messungen mit dem SKM erfasst. Dabei wurde die Griffigkeit unmittelbar vor der Entnahme der Bohrkern mit dem SKM gemessen.

Die Bohrkernoberflächen, die kurz vor Verkehrsfreigabe entnommen wurden, stammten aus dem Bereich des Standstreifens. Die Entnahme der Bohrkern erfolgte dabei an den Stellen, an welchen zuvor die Frischbetonkennwerte (vgl. Kapitel 5.2.2) bestimmt wurden.

Die Bohrkernoberflächen, die 2, 4, 41 und 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe entnommen wurden, stammten aus der rechten Rollspur des 1. Fahrstreifens und ebenfalls aus den Bereichen, an welchen zuvor die Frischbetonkennwerte (vgl. Kapitel 5.2.2) bestimmt wurden. Die Beanspruchung der Rollspur im 1. Fahrstreifen stellt dabei den denkbar ungünstigsten Beanspruchungsfall einer Fahrbahnoberfläche dar, da hier überwiegend der LKW-Verkehr stattfindet.

An den Oberflächen der entnommenen Bohrkern wurden im Labor Griffigkeitsmessungen mit dem SRT-Pendel durchgeführt, sowie die Oberflächengestalt durch Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe und Messungen mit dem Doppeltriangulationssensor charakterisiert.

6.3.2.2 Griffigkeitsentwicklung

In Bild 54 sind die Ergebnisse der Messungen mit dem SKM im Bereich der Rollspur des ersten Fahrstreifens bei 80 km/h dargestellt. Die Messwerte vor Verkehrsfreigabe wurden wegen einer starken Verschmutzung des Messbereichs zum Zeitpunkt der Messung durch den Baustellenverkehr nicht berücksichtigt. Neben den 100 m-Mittelwerten des untersuchten Streckenbereichs sind zudem einzelne 5 m-Mittelwerte der Streckenabschnitte, aus welchen die Bohrkerne entnommen wurden, eingetragen.

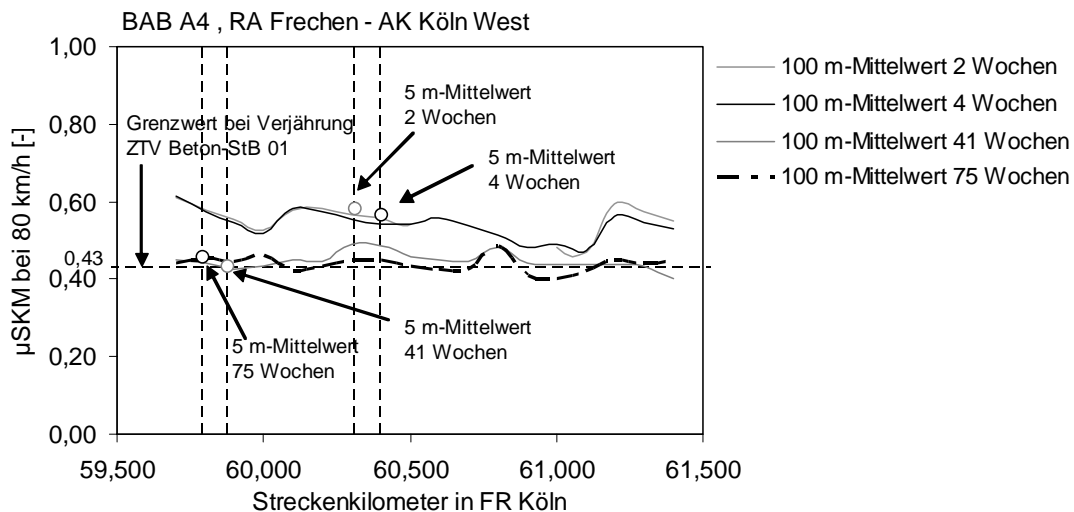


Bild 54: Griffigkeitswerte gemessen mit dem SKM bei 80 km/h; 100 m bzw. 5 m-Mittelwerte in der rechten Rollspur des ersten Fahrstreifens zu den jeweiligen Entnahmezeitpunkten

Die Messwertverläufe der 100-m-Mittelwerte bis 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe waren nahezu identisch und lagen zum Teil deutlich über der Anforderung an den Abnahmewert bei 80 km/h von $\mu\text{SKM} = 0,46$ der ZTV Beton StB 01 [75]. Dies zeigte sich ebenso bei der Betrachtung der 5 m-Mittelwerte der beiden Streckenabschnitte. Das etwas niedrigere Niveau des 5 m-Mittelwerts der Messung 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe gegenüber dem der Messung 2 Wochen nach Verkehrsfreigabe ist nicht auf die erfolgte Beanspruchung zurückzuführen, sondern ergibt sich insgesamt aus dem Messwertverlauf der Fahrbahndecke. Das Griffigkeitsniveau ging jedoch bis zum nächsten Messzeitpunkt bei etwa 41 Wochen nach Verkehrsfreigabe deutlich zurück. Der Verlauf des 100 m-Mittelwerts lag im Bereich des Grenzwertes, der nach der ZTV Beton-StB 01 zum Ablauf der Verjähierungsfrist eingehalten werden muss. Auch der 5 m-Mittelwert, in dem Bereich aus dem die Bohrkerneoberflächen entnommen wurden, zeigte im Vergleich zu den beiden anderen Entnahmezeitpunkten 2 bzw. 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe einen deutlich niedrigeren Wert. Die Reduzierung des Griffigkeitsniveaus ist vor allem auf die Verkehrseinwirkung zurückzuführen. Berücksichtigt werden muss dabei, dass die Untersuchungen in der sehr hoch beanspruchten Rollspur des ersten Fahrstreifens (überwiegend LKW-Verkehr) erfolgten.

6.3.2.3 Oberflächeneigenschaften

Allgemeines

Der visuelle Vergleich der unbeanspruchten Bohrkernoberflächen, die aus dem Standstreifen entnommen wurden, mit denen die zwei bzw. vier Wochen nach Verkehrsfreigabe aus der Rollspur des 1. Fahrstreifens stammten, zeigte kaum Unterschiede auf (vgl. Bild A 41 im Anhang E). Erst die Oberflächen, die etwa 41 Wochen bzw. 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe aus der Fahrbahn entnommen wurden, waren sehr deutlich durch Verkehr und Umwelteinwirkungen verändert worden. Der ursprünglich in den Oberflächenmörtel eingebrachte Jutetuchlängsstrich war bei diesen Bohrkernoberflächen kaum mehr erkennbar.

Analyse des Makrotextrur

In Bild 55 ist die Veränderung der Texturgeometrie im Bereich der Makrotextrur mit den aus der Materialanteilkurve bestimmten primären Kenngrößen enthalten (vgl. Kapitel 3.3.2). Dabei sind Gesamthöhe sowie die Höhen der Profilspitzen, des Kerns, und der Profiltiefen getrennt für die jeweiligen Entnahmezeitpunkte (vor Verkehr, 2 Wochen, 4 Wochen, 41 Wochen und 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe) dargestellt. Die Kennwerte sind jeweils der Mittelwert aus drei Bohrkernoberflächen.

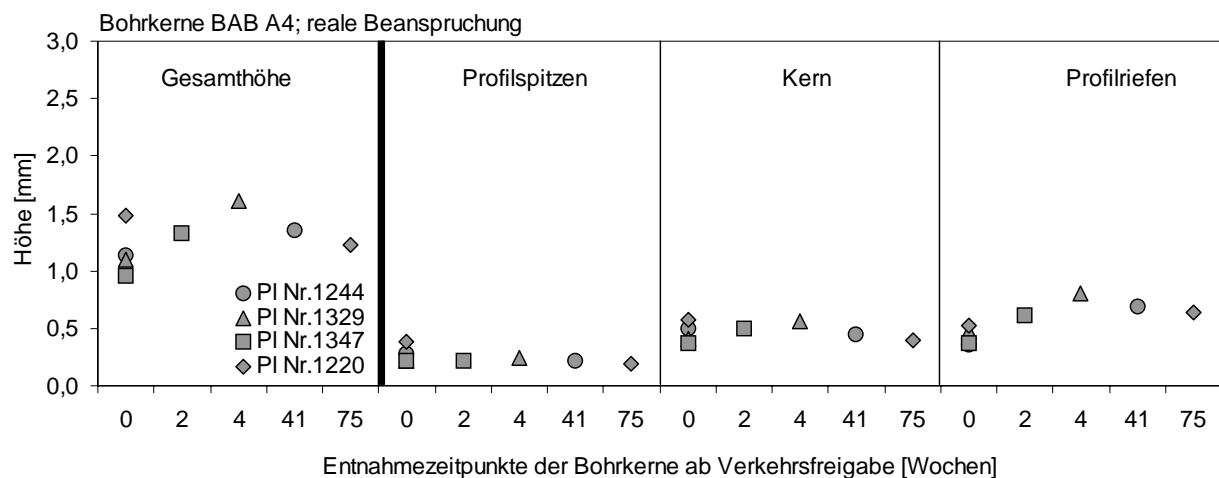


Bild 55: Veränderung der Kennwerte der Materialanteilkurve der Bohrkernoberflächen aus der BAB A4 über den Beobachtungszeitraum

Die aus den Platten des Standstreifens vor Verkehrsfreigabe entnommen Bohrkernoberflächen zeigten bis auf die Oberflächen aus der Platte mit der Nummer 1220 zeigten nahezu identische Kennwerte in der Makrotextrur. Die hier festgestellten Unterschiede in der Ausgangstextrur beruhen auf herstellbedingten Schwankungen.

Über die ersten zwei bis vier Wochen nach Verkehrsfreigabe vergrößerte sich die Gesamthöhe des Profils durch eine Zunahme im Bereich des Kerns und der Profiltiefen. D.h. die Profiltiefen der Makrotextrur wurden insgesamt tiefer, wodurch letztlich auch die Höhe des Kerns leicht zunahm.

Erklärbar ist dies mit dem lösenden Angriff des Regens. Denn der in den Profilliefen zu diesem Zeitpunkt noch vermehrt vorhandene Zementstein wird durch den lösenden Angriff des Regens abgetragen. Bei den Bohrkernoberflächen, die ca. 41 Wochen und 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe entnommen wurden, zeigte sich ein Rückgang der Gesamthöhe des Profils. Dies ergab sich aus einer Reduzierung der Höhe des Kernbereichs sowie der Profilliefen infolge des durch die Verkehrsbeanspruchung stattfindenden Abtrags.

Die Entwicklung der mittleren Oberflächentexturtiefe zeigt Bild 56. Die dargestellten Messwerte sind Mittelwerte aus drei Bohrkernoberflächen, wobei an jeder Bohrkernoberfläche eine Doppelbestimmung durchgeführt wurde.

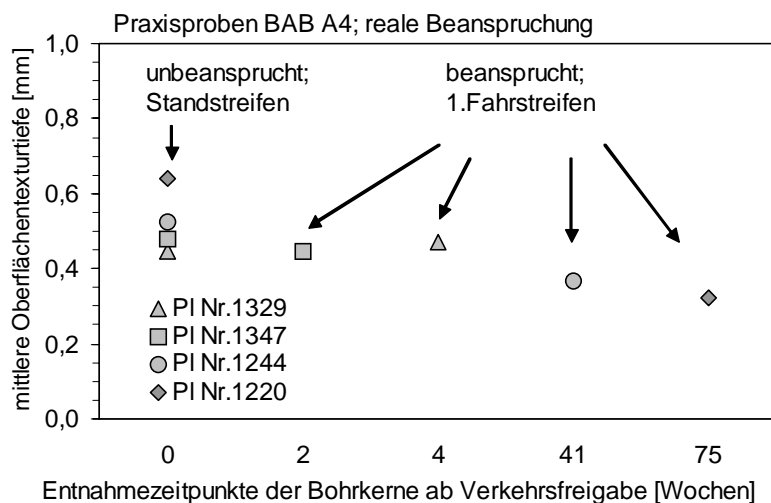


Bild 56: Mittlere Oberflächentexturtiefen der einzelnen Oberflächen im Bereich des Standstreifens sowie in der Rollspur des ersten Fahrstreifens zu den jeweiligen Entnahmezeitpunkten

Die mittlere Oberflächentexturtiefe der gewählten Entnahmestellen im Bereich des Standstreifens vor der Verkehrsfreigabe (0 Wochen) bestätigen die schon zuvor mit der Materialanteilkurve (Bild 55) festgestellten Unterschiede. Durch die Einwirkung des Verkehrs konnte bis 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe keine signifikante Reduzierung der mittleren Oberflächentexturtiefe festgestellt werden. Erst zum Entnahmezeitpunkt 41 Wochen und 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe zeigte sich ein deutlicher Rückgang.

Bei den Werten aus der Materialanteilkurve ergab sich eine Zunahme der Gesamthöhe infolge einer Höhenzunahme der Profilliefen (Bild 55). Dies beruht auf der unterschiedlichen Messgenauigkeit der beiden Messverfahren. Durch die hohe Auflösung des Doppeltriangulationsensors (laterale Auflösung = 30 μm ; vertikale Auflösung = 0,3 μm) werden andere Tiefenbereiche als bei Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe (Auflösung = 180 $\mu\text{m} \leq \varnothing_{\text{Glaskugeln}} \leq 250 \mu\text{m}$) erfasst.

Analyse der Mikrotextur

Bild 57 zeigt die Veränderung der Kennwerte der Mikrotextur in den ersten 75 Wochen nach der Verkehrsfreigabe der Autobahn. Die dargestellten Kennwerte sind jeweils der Mittelwert aus drei Bohrkernoberflächen.

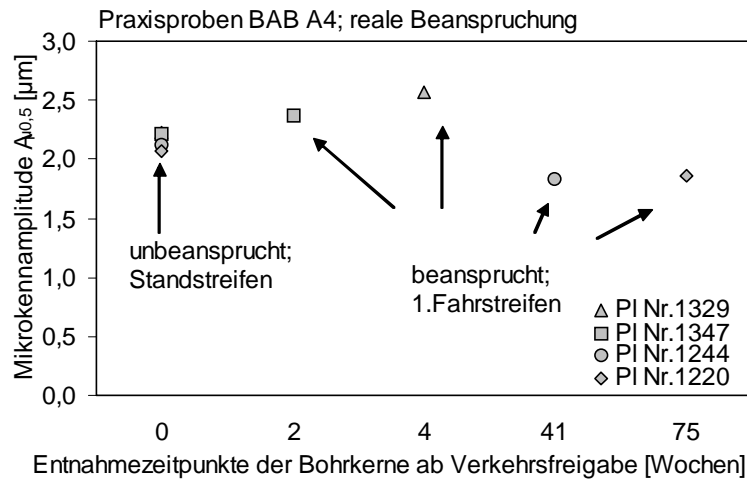


Bild 57: Veränderung der Mikrotexturamplitude (Feinrauheit) der entnommenen Bohrkernoberflächen aus der BAB A4 über den Beobachtungszeitraum

Im unbeanspruchten Zustand wiesen die Probekörper aus den drei untersuchten Fahrbahnplatten eine vergleichbare Mikrotextur auf. Die Fahrbahnoberfläche raute sich im Anschluss über die ersten 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe auf, was hauptsächlich auf ein beginnendes Freilegen der Sandkörner und deren Eigenrauheit zurückzuführen war. So zeigte sich zum Beispiel bei visueller Beurteilung der real beanspruchten Bohrkernoberflächen unter einem Lichtmikroskop, dass 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe im Vergleich zum Ausgangszustand (0 Wochen) ein vermehrter Anteil des Sandes freigelegt worden ist, was zu der beobachteten Zunahme der Feinrauheit führte (Bild 58).

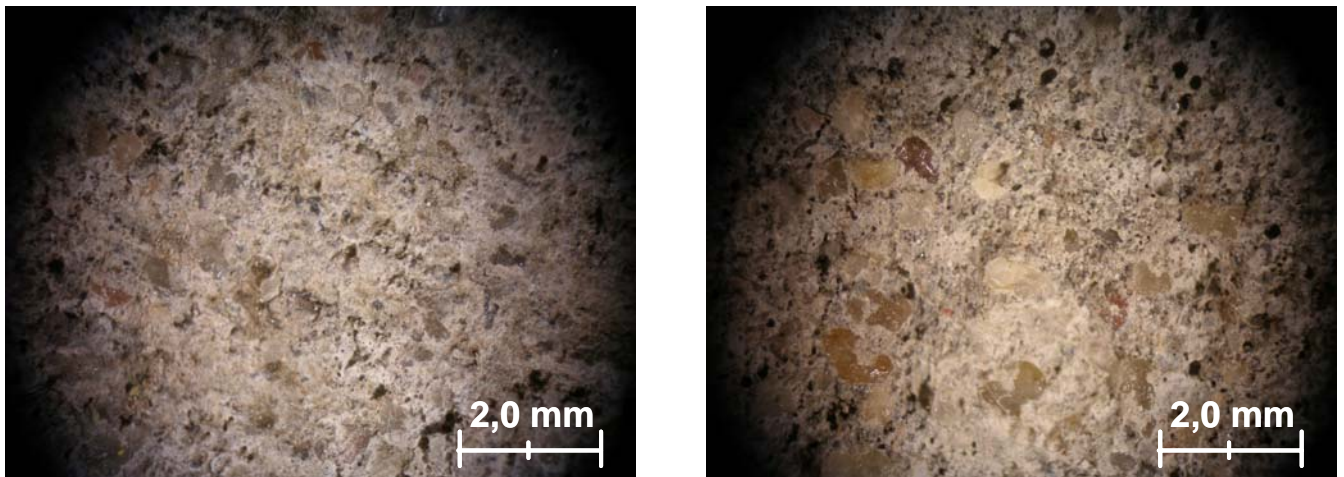


Bild 58: Mikroskopaufnahmen von Bohrkernoberflächen aus der BAB A4
links: vor Verkehrsfreigabe
rechts: vier Wochen nach Verkehrsfreigabe

Im weiteren zeitlichen Verlauf (41 Wochen und 75 Wochen) reduzierten sich der Wert der Mikro-kennamplitude und damit die Feinrauheit der Oberfläche infolge der Verkehrsbeanspruchung (Polieren). Bestätigt wurde dies mit der Messung der Griffigkeit mit dem SRT-Pendel im Labor (vgl. Anhang E, Bild A 42).

6.3.3 Anpassung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

6.3.3.1 Versuchsdurchführung

Die Laborversuche wurden - wie bereits zuvor beschrieben - an Bohrkernoberflächen durchgeführt, die unmittelbar vor der Verkehrsfreigabe aus dem Standstreifen entnommen worden waren. Aufgrund der aus Praxisbeobachtungen bekannten zunehmend hohen Verkehrsbelastung und des deshalb zu erwartenden schnelleren Verlusts wichtiger Oberflächeneigenschaften im Bereich der Mikro- und Makrotextur wurde der mechanische Angriff insgesamt im Vergleich zu dem bisherigen kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (vgl. Kapitel 3.4.2) deutlich erhöht. Die mechanische Beanspruchung stellt die Beanspruchungsform der Oberfläche dar, die zu einer Verminderung der Griffigkeit infolge eines Verlustes der Fein- und Grobrauheit (Poliervorgang) und zu einem ungünstigeren Lärmverhalten durch Verlust der ursprünglich eingebrachten Texturgeometrie führt. Die Beanspruchungen aus den Umwelteinwirkungen führen dagegen eher zu einer Regeneration der Oberflächeneigenschaften, vor allem der Feinrauheit. Zudem wurde bei Vorversuchen, bei welchen ausschließlich die Intensität der Umweltbeanspruchung durch eine erhöhte Anzahl an Einzelbeanspruchungen während des Zyklus verstärkt wurde, festgestellt, dass die dadurch erzielten Oberflächeneigenschaften nicht mit denen aus der Praxis bekannter vergleichbar waren. So erfolgt zum Beispiel durch eine Erhöhung der Anzahl der im Zyklus stattfindenden lösenden Beanspruchung eine starke Aufrauung der Oberfläche, die in der Praxis in der Form niemals auftritt.

Im Rahmen der Versuche wurde aus den zuvor genannten Gründen die Dauer der mechanischen

Beanspruchung mittels Prallabrieb variiert. Die Probekörperserien, die aus je drei Bohrkernoberflächen bestanden, wurden bei den durchgeführten Untersuchungen in Summe 120 Minuten bzw. 180 Minuten der mechanischen Beanspruchung des Prallabriebs ausgesetzt. Die Abfolge im kombinierten Laborbeanspruchungszyklus blieb bestehen, so dass nach jeder Umweltbeanspruchung jeweils die Hälfte der Beanspruchungsdauer erfolgte. D.h. die mechanische Beanspruchung betrug dabei zum einen nach dem lösenden Angriff sowie nach dem Frost-Tausalz-Angriff je 60 Minuten (12 x 5 Minuten Einzelbeanspruchung), zum anderen jeweils 90 Minuten (18 x 5 Minuten Einzelbeanspruchung).

6.3.3.2 Gegenüberstellung: Praxisbeanspruchung – Laborbeanspruchung

Allgemeines

Im Folgenden werden die jeweiligen Kennwerte der Bohrkernoberflächen, die durch reale Einwirkungen sowie im Labor mittels der zwei unterschiedlich intensiven kombinierter Laborbeanspruchungszyklen beansprucht wurden, vergleichend gegenübergestellt. Für die Gegenüberstellung wurden die real beanspruchten Bohrkernoberflächen aus den Platten mit der Nummer 1329 (4 Wochen beansprucht) und der Nummer 1220 (75 Wochen beansprucht) verwendet. Um die Veränderungen der Oberflächen infolge der beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen bzw. infolge der Praxisbeanspruchung zu verdeutlichen, wurden die primären und sekundären Oberflächeneigenschaften getrennt betrachtet. Denn Oberflächen mit grundsätzlich unterschiedlichen primären Kenngrößen können trotzdem vergleichbare sekundäre Oberflächeneigenschaften, v. a. Griffigkeitseigenschaften, aufweisen.

Analyse der primären Eigenschaften der Texturen

Bei visueller Betrachtung der Bohrkernoberflächen, die mit den beiden verlängerten kombinierten Laborbeanspruchungszyklen belastet wurden, ergaben sich keine Unterschiede, die auf eine intensivere Einwirkung durch den längeren Prallabrieb von 180 Minuten zurückgeführt werden konnten. Bei allen im Labor beanspruchten Bohrkernoberflächen war der ursprünglich in den Oberflächenmörtel eingebrachte Jutetuchlängsstrich kaum mehr erkennbar. Der Oberflächenmörtel selbst war noch vorhanden und Anteile des Sandes waren freigelegt worden (vgl. Bild A 43 und Bild A 44 im Anhang E). Dies entspricht in etwa dem Oberflächenzustand der Bohrkernoberflächen, die 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe aus der rechten Rollspur des ersten Fahrstreifens entnommen wurden (vgl. Bild A 41 im Anhang E).

Die Veränderung der Makrotextur der untersuchten Oberflächen ist mittels der aus der Materialanteilkurve bestimmten Kenngrößen in Bild 59 dargestellt. Dabei sind die Gesamthöhe und die Höhen der Profilspitzen, des Kerns, und der Profiltiefen im unbelasteten Zustand (0 Wochen) und bis zum jeweiligen Beanspruchungszustand dargestellt. Im Fall der Bohrkernoberflächen mit realer Einwirkung sind dies die Werte der Bohrkernoberflächen, die 4 Wochen und 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe entnommen worden waren. Für die Bohrkernoberflächen, die mit den beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen beansprucht wurden, ist der Wert am Ende des jeweiligen Beanspruchungszyklus im Folgenden mit 'Labor' gekennzeichnet. Die dargestellten Kennwerte sind jeweils der Mittelwert aus drei Bohrkernoberflächen.

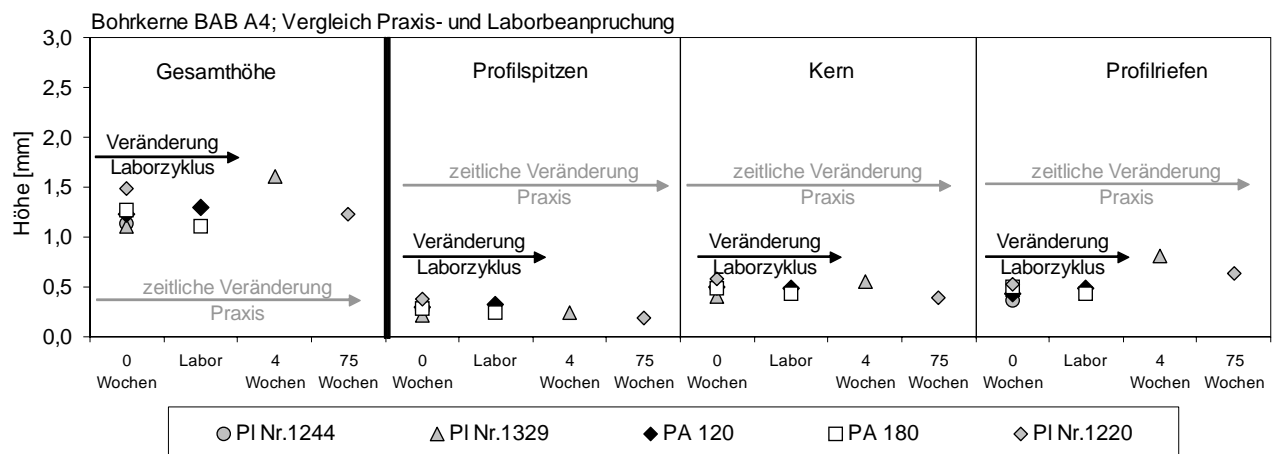


Bild 59: Gegenüberstellung der Kennwerte der Materialanteilkurve der untersuchten Bohrkernoberflächen aus der BAB A4, die durch reale Einwirkung sowie durch die beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen beansprucht wurden

Im unbeanspruchten Zustand (0 Wochen) wiesen die Bohrkernoberflächen, die einer realen Beanspruchung ausgesetzt waren, gegenüber den Bohrkernoberflächen, welche die beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen durchlaufen hatten, zum Teil niedrigere bzw. größere Höhen in den jeweiligen Profilbereichen auf. Dies beruhte auf herstellbedingte Schwankungen bei der Texturierung (vgl. Kapitel 6.3.2.3). Die Betrachtung der Bohrkernoberflächen, die der realen Beanspruchung ausgesetzt waren, zeigten vor allem einen Anstieg der Höhe im Bereich der Profilriefen und somit auch in der Gesamthöhe, vgl. hierzu auch Kapitel 6.3.2.3.

Ein Vergleich der Gesamthöhe von den in der Praxis und den im Labor beanspruchten Bohrkernoberflächen ergibt, dass die beiden im Labor untersuchten Probekörperserien am jeweiligen Zyklusende ähnliche oder geringere Höhen aufgewiesen haben als die Probekörper, die einer 75-wöchigen realen Beanspruchung ausgesetzt waren.

In Bild 60 sind die Werte der Mikrokennamplitude der Bohrkernoberflächen, die real und im Labor beansprucht wurden gegenübergestellt. Die dargestellten Kennwerte sind jeweils der Mittelwert aus drei Bohrkernoberflächen.

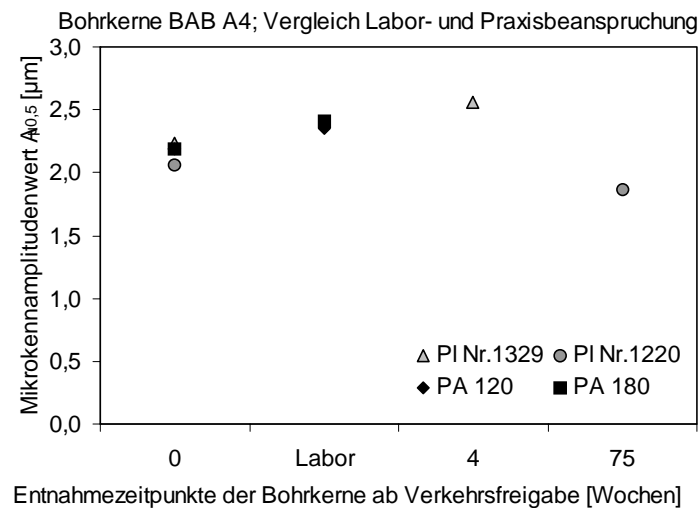


Bild 60: Mikrokennamplitudenwerte $A_{\mu 0,5}$ der untersuchten Bohrkerneoberflächen aus der BAB A4, die durch reale Einwirkung sowie durch die beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen beansprucht wurden

Die Werte aller untersuchten Bohrkerneoberflächen unterschieden sich im Ausgangszustand nur unwesentlich. Die Bohrkerneoberflächen, die den beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen ausgesetzt worden waren, sowie die Bohrkerneoberflächen, die 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe (PI Nr. 1329) entnommen wurden, zeigten eine Zunahme der Feinrauheit. Dies kann in beiden Fällen auf das Freilegen des Sandanteils im Oberflächenmörtel zurückgeführt werden, vgl. Bild 58.

Die im weiteren Beanspruchungsverlauf (75 Wochen, PI Nr. 1220) erfolgte Reduktion des Mikrokennamplitudenwertes weist auf ein Polieren des freigelegten Sands hin. Eine kurzfristige Zunahme im Bereich der Mikrotextrur (Feinrauheit) kann wiederum durch Umwelteinwirkungen bewirkt werden. Im Gegensatz zu den Werten aus der Praxis erfolgte durch den kombinierten Laborbeanspruchungszyklus kein Rückgang der Mikrokennamplitudenwerte. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die nach dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus im Vergleich zur Praxisbeanspruchung insgesamt unebenere Oberfläche (Bild 61).

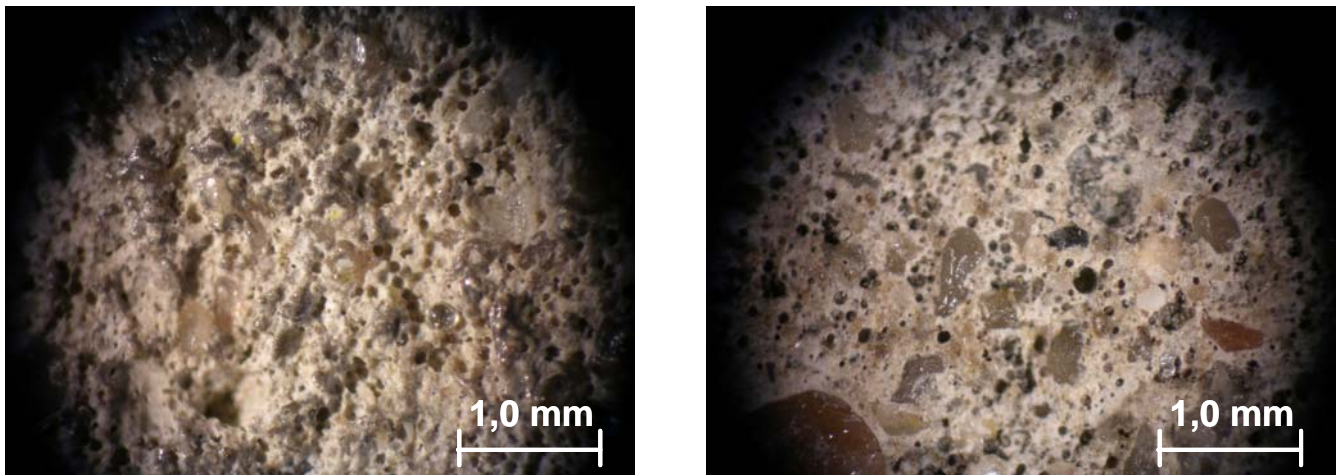


Bild 61: Mikroskopaufnahmen von Bohrkernoberflächen aus der BAB A4
links: nach kombinierter Laborbeanspruchung mit PA180
rechts: 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe

Analyse der sekundären Eigenschaft (Griffigkeit) der Texturen

Bild 62 enthält eine Gegenüberstellung der im Labor gemessenen SRT-Einheiten der Bohrkernoberflächen aus der BAB A4, die real und im Labor beansprucht wurden. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte aus drei Probekörpern.

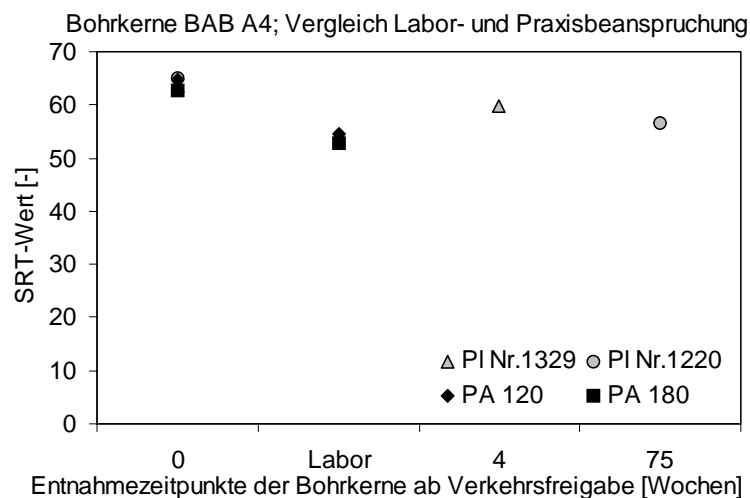


Bild 62 SRT-Einheiten der untersuchten Bohrkernoberflächen aus der BAB A4, die durch reale Einwirkung sowie durch die beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen beansprucht wurden

Das mit dem SRT-Pendel bestimmte Griffigkeitsniveau aller Bohrkernoberflächen war im Ausgangszustand gleich und auf einem hohen Niveau. Die reale Beanspruchung sowie die im Labor durchgeführte Beanspruchung mit den beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen führten zu einem Rückgang der Griffigkeit aller untersuchten Oberflächen. Dieser fiel bei den im

Labor beanspruchten Bohrkernoberflächen sowie bei den Bohrkernoberflächen, die 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe entnommen worden waren, in etwa gleich aus.

Dies steht scheinbar konträr zu den Ergebnissen der Werte der Mikrokennamplitude in Bild 60, wonach die Oberflächen nach dem kombinierten Laborzyklus eine höhere Feinrauheit im Vergleich zu den Oberflächen aufgewiesen haben, die 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe entnommen worden waren. Im Vergleich zum SRT-Pendel erfasst der Doppeltriangulationssensor durch die hohe Auflösung Rauigkeiten, die für die Griffigkeitseigenschaften, und damit bei der Messung mit dem SRT-Pendel nicht unmittelbar zur Verfügung stehen.

6.4 Zusammenfassung

Die Abschätzung und Anpassung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus erfolgte an Bohrkernoberflächen, die aus einem Abschnitt der Praxisstrecke vor der Verkehrsfreigabe entnommenen wurden. Hierzu wurden Wetterdaten sowie die Entwicklung der primären und sekundären Oberflächeneigenschaften, die im Bereich des untersuchten Streckenabschnittes gewonnen wurden, ausgewertet. Die Oberflächeneigenschaften des Jutetuchlängsstrichs im untersuchten Streckenabschnitt waren in dem bis jetzt betrachteten Zeitraum in der Anfangsphase (bis 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe) stabil und zeigten erst bei den Messungen, die 41 Wochen bzw. 75 Wochen nach Verkehrsfreigabe durchgeführt wurden, eine deutliche Verschlechterung. Berücksichtigt werden muss dabei, dass die Untersuchungen in der sehr hoch beanspruchten Rollspur des ersten Fahrstreifens (überwiegend LKW-Verkehr) erfolgten.

Die Auswertung der Wetterdaten des untersuchten Streckenabschnittes ergab, dass an der Fahrbahnoberfläche während des Beobachtungszeitraums eine übliche Frost-Tau-Wechsel-Belastung stattgefunden hat. Eine Angabe der Anzahl an im Labor mit dem CDF-Verfahren simulierten Wintern war nicht möglich, da die Übertragbarkeit der Prüfung des Frost-Tausalz-widerstandes mit dem CDF-Test im Labor auf die Praxis derzeit noch nicht abschließend untersucht ist. Die Untersuchungen im Zusammenhang mit den Einwirkungen aus saurem Regen ergaben, dass sich die einstellende Abtragstiefe aus der Kombination von mechanischem und lösendem Angriff ergibt. Dabei findet ein stetiger Abtrag der abgelösten Schicht durch die mechanische Beanspruchung statt. In diesem Fall ist die Zunahme der Abtragstiefe über die Zeit konstant. Dies findet in der Praxis durch den Abtrag der abgelösten Schicht infolge der stetigen Überrollung durch Fahrzeugreifen statt. Beim kombinierten Laborbeanspruchungszyklus erfolgt ein Abtrag durch den mechanischen Angriff mit dem Prallabriebgerät im Anschluss an die lösende Beanspruchung. Die Dicke der abgelösten Schicht wird dabei maßgeblich vom pH-Wert der angreifenden Lösung bestimmt. Unter Berücksichtigung der an dem untersuchten Streckenabschnitt vorliegenden Randbedingungen konnte über die Abtragstiefe, die sich im Labor infolge der Kombination aus lösendem und mechanischem Angriff eingestellt hatte, ein simulierter Zeitraum abgeschätzt werden. In Abhängigkeit des pH-Wertes entspricht die im Labor verwendete Kombination aus lösendem und mechanischem Angriff etwa 15 bis 35 Jahre des hier untersuchten Streckenabschnitts.

Die mechanische Einwirkung aus dem Verkehr, die im Laborversuch mit dem Prallabriebgerät simuliert wird, wurde deutlich intensiviert. Dies resultierte aus der in der Praxis zunehmenden

Verkehrsbelastung und der in diesen Untersuchungen betrachteten durch LKW-Verkehr hoch belasteten Rollspur des 1. Fahrstreifens. Es zeigte sich, dass die jutetuchtypische Makrotextur durch die beiden untersuchten kombinierten Laborbeanspruchungszyklen verloren gegangen war. Das Eintreten dieses Oberflächenzustandes wird in der Praxis maßgeblich von der Verkehrsbelastung (Art und der Anzahl der Fahrzeuge) bestimmt. Bei dem hier untersuchten Streckenabschnitt war der ursprünglich eingebrachte Jutetuchlängsstrich nach rund 1,5 Jahren unter Verkehr kaum mehr erkennbar. Im Bereich der Mikrotextur ergab sich nach Durchlaufen der beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen ein höherer Endwert der Mikrokennamplitude als nach rund 1,5 Jahren unter Verkehr. Die im Labor beanspruchten Oberflächen wiesen in diesem Texturbereich eine im Vergleich zur Praxis unebenere Oberflächengestalt auf, was sich aber nicht direkt auf die im Labor mit dem SRT-Pendel gemessenen Griffigkeitswerte auswirkte. Hier wiesen sowohl die mit den beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen beanspruchten Oberflächen als auch die Oberflächen, die der Praxisbeanspruchung ausgesetzt waren, ein vergleichbares Niveau auf. Aufgrund der Ergebnisse der Betrachtung der primären Eigenschaften erscheint der Poliereffekt im Bereich der Mikrotextur im Vergleich zur Praxis zu schwach, weshalb hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung eine Erweiterung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus um die Beanspruchung mit der Prüfanlage Wehner/Schulze sinnvoll wäre.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die beiden hier durchgeführten verstärkten kombinierten Laborbeanspruchungszyklen, wegen der Kombination aus lösender, mechanischer und Frost-Tausalz Beanspruchung, eine gute Simulation der Einwirkungen aus der Praxis darstellen. Eine genaue zeitliche Angabe des Zeitraums ist deshalb nicht möglich, da der bisherige Untersuchungszeitraum zu kurz, sowie der aus der Praxis gewonnene Umfang an Proben zu gering, um eine definitive Aussage über die Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus zu treffen. Hierzu wären deshalb weitere Untersuchungen an dem Streckenabschnitt notwendig.

7 Zusammenfassung

7.1 Allgemeines

Fahrbahndecken aus Beton müssen während der gesamten Nutzungszeit neben einer ausreichenden Tragfähigkeit vor allem dauerhaft gute Gebrauchseigenschaften ihrer Oberfläche aufweisen. Zu den wesentlichen Gebrauchseigenschaften der Oberfläche zählen die Griffigkeit und das Lärmemissionsverhalten, die von der Gestalt der Fahrbahnoberfläche, der Textur, bestimmt werden. Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt führen zu einer Veränderung der Textur, wobei die Dauerhaftigkeit der Textur und die sich aus ihr ergebenden Gebrauchseigenschaften von der Qualität des Oberflächenmörtels und der eingebrachten Texturgeometrie beeinflusst werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Einflüsse auf die Beständigkeit der Texturgeometrie einer Betonfahrbahndecke untersucht. Dabei wurde die Texturgeometrie selbst sowie der Einfluss der Betonzusammensetzung und der Eigenschaften des frischen Betons bei der Herstellung betrachtet. Neben Versuchen im Labor wurden Abschnitte von Praxisstrecken bei der Herstellung sowie - zur Erfassung der Veränderungen der Oberflächeneigenschaften – zu definierten Zeitpunkten untersucht. Dabei wurde auch eine Abschätzung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus durchgeführt sowie die mechanische Beanspruchung deutlich intensiviert. Zudem wurde die Auswertemethodik der Messdaten, die mit dem Doppeltriangulationssensor berührungslos erfasst werden, hinsichtlich der Charakterisierung der Makrotextur angepasst.

7.2 Beständigkeit der Texturgeometrie

Die Untersuchungen zum Einfluss der Texturgeometrie auf die Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften umfassten eine Praxisstrecke sowie Laboruntersuchungen. Im Zusammenhang mit der Praxisstrecke wurden zwei Texturgeometrien (Besenlängsstrich, Jutetuchlängsstrich), die in den Oberflächenmörtel dreier unterschiedlich fester Betone eingebracht wurden, betrachtet. Hierbei war es möglich, durch die bis zu diesem Zeitpunkt stattgefundene 5-jährige Liegezeit des Streckenabschnitts, die Veränderung der primären und sekundären Oberflächeneigenschaften gezielt zu analysieren. Die Bestimmung der Oberflächeneigenschaften der Texturen erfolgte mit gängigen Messmethoden (SKM, SRT-Pendel, Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe, Lärmessanhänger) sowie im Labor mit einem berührungslosen Messsystem (Doppeltriangulationssensor). Insgesamt zeigten sich durch die bis zu diesem Zeitpunkt erfolgte Beanspruchung vor allem im Bereich der Rollspur des ersten Fahrstreifens eine Reduzierung der Feinrauheit (Mikrotextur) und ein Einebnen der Makrotextur. Ein Einfluss der unterschiedlichen Betongüte konnte nicht festgestellt werden. Die mit dem SKM gemessene Griffigkeit lag auch nach der fünfjährigen mechanischen Beanspruchung nach einem zwischenzeitlichen Abfall wieder auf dem Niveau vor der Verkehrsfreigabe. Hierbei zeigt sich, dass ein Verlust der ursprünglich eingebrachten Texturgeometrie nicht zwangsläufig zu einem Verlust der Griffigkeit führt, wenn die Textur in die frische Oberfläche eines Betons mit guter Betonzusammensetzung und optimalen Frischbetoneigenschaften eingebracht wurde. Jedoch kann die Betonoberfläche durch den Verlust der ursprünglich eingebrachten Texturgeometrie die sich aus diesen ergebenden

(günstigen) Lärmeigenschaften einbüßen.

In den Laboruntersuchungen konnten die Ergebnisse aus der Praxis bestätigt werden. Die vier verwendeten Texturgeometrien (Jutetuch-, Kunstrasen-, Besenlängsstrich und Jutetuchlängsstrich mit Kamm) verhielten sich unter dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus vergleichbar. Im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit der Funktionseigenschaften einer Fahrbahnoberfläche muss neben einer ausreichenden Feinrauheit auch eine genügende mittlere Oberflächentexturtiefe erhalten bleiben. Beides zeigten nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus der Jutetuchlängsstrich mit Kamm sowie der Besen- und der Kunstrasenlängsstrich.

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften (Griffigkeit, günstiges Lärmemissionsverhalten) ist der Jutetuchlängsstrich wegen der schwach ausgeprägten Makrotextur für Verkehrsflächen, die einer hohen Beanspruchung (z.B. Autobahnen, Schnellstraßen) ausgesetzt sind, nicht geeignet. Denn im Vergleich zu Texturen mit ausgeprägter Makrotextur geht die des Jutetuchlängsstrichs schneller verloren, was einen direkten Einfluss auf die Oberflächeneigenschaften, v.a. auf das Lärmemissionsverhalten, hat. Berücksichtigt werden muss dabei, dass Texturgeometrien mit ausgeprägter Makrotextur, wie z.B. ein Besenlängsstrich hinsichtlich des Lärmemissionsverhalten im Vergleich zu einem intakten Jutetuchlängsstrich deutlich ungünstiger sind. Nach derzeitigem Kenntnisstand gelten Fahrbahnoberflächen, bei welchen der Oberflächenmörtel planmäßig entfernt wird und sich dadurch eine Waschbetonstruktur ergibt, in Bezug auf die notwendigen Oberflächeneigenschaften als dauerhaft. Dies gilt vor allem hinsichtlich eines günstigen Lärmemissionsverhaltens. Denn die Texturgeometrie ergibt sich aus der Anordnung der groben Gesteinskörner an der Oberfläche, die während der Liegezeit keiner Veränderung unterworfen ist. Das Griffigkeitsverhalten wird dagegen durch die Polierresistenz der groben Gesteinskörner bestimmt und sollte deshalb möglichst hoch sein.

7.3 Einfluss der Betontechnologie auf die Texturbeständigkeit

Zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Texturbeständigkeit wurden Untersuchungen an Praxisstrecken während des Einbaus und darauf folgend gezielte Untersuchungen im Labor durchgeführt. Hierbei waren vor allem die Entstehung des Oberflächenmörtels und die sich ergebende Oberflächenmörtelschicht und deren Eigenschaften (Zusammensetzung, Dicke, usw.) von Interesse. Bei den Untersuchungen des sich bei der Herstellung ergebenden Oberflächenmörtels zweier Autobahnabschnitte zeigte sich, dass - bei Einbau des Betons mit einem baugleichen Gleitschalungsfertiger - die Einbaukonsistenz eine direkte Auswirkung auf den sich einstellenden Oberflächenmörtel hatte. So führte der Einbau eines Betons mit einer eher plastischen Konsistenz zu einem dicken Oberflächenmörtel, der sedimentierte. Hingegen ergab sich beim Einbau eines Betons mit straßenbetontypischer steifer Konsistenz ein Oberflächenmörtel, der hinsichtlich der Dicke und der Zusammensetzung optimal war. In beide Oberflächenmörtel konnte ein Jutetuchlängsstrich eingebracht werden, wobei der Jutetuchlängsstrich im eher dicken Oberflächenmörtel eine sichtbar stärker ausgeprägte Makrotextur besaß. Jedoch wurden schon nach kurzer Liegezeit ungünstige Griffigkeitseigenschaften festgestellt, da die griffigkeitsrelevanten Bestandteile im Oberflächenmörtel durch das Sedimentieren nicht mehr an der Oberfläche zur Verfügung standen. Die nachfolgenden Laboruntersuchungen bestätigten die in der Praxis gewonnenen Erkenntnisse, dass Betone mit typischer Zusammensetzung ($z = 350\text{kg/m}^3$ CEM I;

w/z-Wert von 0,40 bis 0,45) für das Erreichen einer optimalen Oberflächenmörtelschicht eine steife Einbaukonsistenz benötigen. Dagegen führte eine wesentliche Veränderung des Anteils an Feinstoffen oder deren Korngrößenverteilung im Beton, wie dies zum Beispiel durch Verwendung von Portlandkompositzementen erfolgen kann, zu einer grundsätzlichen Verbesserung der Stabilität der Frischbetone. Weshalb in diesem Fall unter Umständen eine vergleichsweise weichere Konsistenz des Frischbetons gewählt werden muss, um eine optimale Mörtelschichtdicke zw. 0,5 – 1,0 mm erreichen zu können.

Grundsätzliche Untersuchungen im Labor zum Einfluss des w/z-Wertes und des Mörtelgehaltes sowie zum Einfluss der verwendeten Sandart auf die Oberflächendauerhaftigkeit wurden an einem nicht nachbehandelten Jutetuchlängsstrich durchgeführt. Insgesamt konnte kein Zusammenhang zwischen dem w/z-Wert bzw. dem Mörtelgehalt auf die Texturbeständigkeit gefunden werden. Wobei hinsichtlich der Entwicklung der Feinrauheit ein niedriger w/z-Wert von 0,36 in Verbindung mit einem vergleichsweise hohen Zementgehalt sich als ungünstig erwiesen hatte. Für die im Straßenbau üblichen w/z-Werte von 0,40 bzw. 0,45 ergab sich jedoch kein Einfluss des w/z-Wertes auf die Feinrauheit. Die Erklärung für dieses Ergebnis ist vor allem in der Entstehung und der damit verbundenen Zusammensetzung des Oberflächenmörtels begründet. Der Oberflächenmörtel weist in der Regel einen höheren w/z-Wert und eine feinstoffreichere Zusammensetzung als der übrige Mörtel im Kernbeton auf. Bei höheren w/z-Werten liegen die Festigkeiten generell auf einem niedrigeren Niveau. Bei anderen Untersuchungen [11] konnte zwar ein Einfluss des w/z-Wertes auf die Texturbeständigkeit festgestellt werden, wobei in diesem Fall neben einer Reduktion des w/z-Wertes von 0,45 auf 0,36 zusätzlich auch eine Zugabe von Silikastaub stattgefunden hatte. Dies führte zu einer erheblichen Verbesserung der Mörtelfestigkeit und somit zu einer höheren Dauerhaftigkeit der eingebrachten Texturgeometrie.

Die Untersuchungen zum Einfluss des Sandes auf die Texturbeständigkeit ergaben keinen Einfluss auf die Beständigkeit die Makrotextur. Hinsichtlich der mit dem SRT-Pendel bestimmten Griffigkeitseigenschaften hatten sich die Oberflächen bei welchen ein kalzitischer Sand verwendet wurde im Vergleich zu denjenigen mit quarzitischem Sand etwas günstiger Verhalten. Dies wurde bereits bei anderen Untersuchungen [11] in ähnlicher Weise festgestellt. Zurückgeführt wird dies auf die Stabilität der Einbettung des Sandkorns im Zementstein. Besitzt ein Sandkorn im Vergleich zur Zementsteinmatrix eine höhere Festigkeit kann sich dieses infolge einer Beanspruchung als Ganzes aus der Zementsteinmatrix lösen. Dadurch geht neben dem Korn selbst auch die für die Griffigkeit wichtige Eigenrauheit des Kornes verloren. Sande mit einer vergleichsweise niedrigeren Festigkeit, verbleiben dagegen in der Zementsteinmatrix. In der Regel sind diese Sande weniger polierresistent. Dies muss nicht grundsätzlich zu einer Verschlechterung der Griffigkeitseigenschaften führen, da das in der Zementsteinmatrix verbliebene Korn durch Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt wieder aufgeraut werden kann.

7.4 Abschätzung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Die Abschätzung und Anpassung der Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus erfolgte an Bohrkernoberflächen, die aus einem Abschnitt der Praxisstrecke vor der Verkehrsfreigabe entnommen wurden. Hierzu wurden Wetterdaten sowie die Entwicklung der primären und sekundären Oberflächeneigenschaften, die im Bereich des untersuchten Streckenabschnittes

gewonnen wurden, ausgewertet.

Die Auswertung der Wetterdaten des untersuchten Streckenabschnittes ergab, dass an der Fahrbahnoberfläche während des Beobachtungszeitraums eine übliche Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung stattgefunden hat, wobei eine Angabe der Anzahl an im Labor simulierten Wintern dagegen nicht möglich war. Die Untersuchungen im Zusammenhang mit den Einwirkungen aus saurem Regen ergaben, dass sich die einstellende Abtragstiefe aus der Kombination von mechanischem und lösendem Angriff ergibt. Die Abtragstiefe über die Zeit ist dabei konstant und die Dicke der angelösten Schicht wird dabei maßgeblich vom pH-Wert der angreifenden Lösung bestimmt. Anhand der an dem untersuchten Streckenabschnitt vorliegenden Randbedingungen und in Abhängigkeit des pH-Wertes entspricht die im Labor verwendete Kombination aus lösendem und mechanischem Angriff etwa 15 bis 35 Jahre des hier untersuchten Streckenabschnitts.

Die mechanische Einwirkung aus dem Verkehr, die im Laborversuch mit dem Prallabtriebgerät simuliert wird, wurde wegen der in der Praxis zunehmenden Verkehrsbelastung und der in diesen Untersuchungen betrachteten durch LKW-Verkehr hoch belasteten Rollspur des 1. Fahrstreifens deutlich intensiviert. Durch die beiden untersuchten kombinierten Laborbeanspruchungszyklen wurde der ursprünglich eingebrachte Jutetuchlängsstrich weitgehend abgetragen. Aufgrund der Ergebnisse der Betrachtung der primären Eigenschaften (Mikrokennamplitudenwert) erscheint der Poliereffekt im Bereich der Mikrotextur im Vergleich zur Praxis zu schwach, weshalb hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung eine Erweiterung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus um die Beanspruchung mit der Prüfanlage Wehner/Schulze vorstellbar wäre.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die beiden hier durchgeführten verstärkten kombinierten Laborbeanspruchungszyklen, wegen der Kombination aus lösender, mechanischer und Frost-Tausalz Beanspruchung, eine gute Simulation der Einwirkungen aus der Praxis darstellen. Eine genaue zeitliche Angabe des Zeitraums ist deshalb nicht möglich, da der bisherige Untersuchungszeitraum zu kurz, sowie der aus der Praxis gewonnene Umfang an Proben zu gering ist, um eine definitive Aussage über die Wirkung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus zu treffen. Hierzu wären deshalb weitere Untersuchungen an dem Streckenabschnitt notwendig.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Huschek, S.: Kennzeichnung der Oberflächenrauheit und deren Einfluss auf die Griffigkeit und die Reifengeräusche. Straße und Autobahn 6, S. 307-314, 1996.
- [2] Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen (FGSV): Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe (M BGriff). Fassung 2003.
- [3] Beckenbauer T.: Akustische Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen. Straße und Autobahn 10, S. 553-561, 2001.
- [4] Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr - Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche", S. 9-14, Heft S37, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, 12/2004.
- [5] Streit, G.: Handbuch des Betonstraßenbaues; Bauverlag GmbH Wiesbaden-Berlin 1964.
- [6] Moss, Th.: Einsatz des Gleitschalungsfertigers in der Bundesrepublik Deutschland; Betonstraßentagung 1981 in Cuxhaven; Schriftenreihe FGSV Heft 15, S. 57-62, 1981.
- [7] Schulz, E.: Untersuchungen zum Verdichtungsvorgang bei der Betondeckenherstellung durch Stampfen, Rütteln, und Rütteln mit Auflast; Straße und Autobahn 11, S. 436-442, 1962.
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Fahrbahndecken aus Beton (M OB). Fassung 2000.
- [9] Dames, J.; Sulten, P.: Einfluss der Oberflächenausführung von Betondecken auf die Griffigkeit, Heft 356 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", BMVBW 1982.
- [10] Dames, J; Sulten, P.: Einfluß der Oberflächenausführung von Betondecken auf die Griffigkeit. Straße und Autobahn 1, S. 11 ff., 1981.
- [11] Schießl, P., et. al.: Oberflächendauerhaftigkeit, Heft 902 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", BMVBW Oktober 2004.
- [12] Walz, K.: Über den Zusammenhang zwischen Griffigkeit, Abnutzbarkeit, Betonzusammensetzung und Herstellung von Betonfahrbahnen. Straßen und Tiefbau 10/1968 S. 761-768.
- [13] Walz, K.: Einfluss der Zusammensetzung und der Oberflächentextur von Straßenbeton auf die Griffigkeit. beton 10 + 11/1967, S. 369-373 + S. 403-406.
- [14] Huschek, S.; Böhnisch, S.: Einfluss des Sandes auf die Griffigkeit von Betonfahrbahndecken, Heft 883 der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", BMVBW 2004.
- 15 Sulten, P.; Wolf, Th.: Waschbeton – Eine alternative Betonoberfläche; Straße und Autobahn Heft 4 , S. 210 – 218, 2006.
- [16] Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): ARS Nr. 5/2006 vom 17.02.2006; AZ: S 13/7144.4/01.
- [17] Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): ARS Nr. 14/2006 vom 16.05.2006; AZ: S 17/7183.3/3-2.
- [18] Steinauer, B., Ueckermann, A.: Ein vereinfachtes Verfahren zur Auswertung der Längsebenheit von Straßen. Straße und Autobahn 4, S. 173-182, 1999.

- [19] DIN ISO 13473: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen; Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen, Juli 2004.
- [20] Krieger, B.; Sulten, P.: Stand der Entwicklung von lärmarmen Betondecken; Straße und Autobahn 9, S. 479-486, 1999.
- [21] Krieger, B. Kunz, K. Sulten, P.: Dauerhaft griffige und geräuscharme Betonfahrbahndecken - Stand der Entwicklung. Straße und Autobahn 12, S. 753-759, 2000.
- [22] Ullrich, S.: Die Entwicklung der Geräuschemission von Straßen von 1975 bis 2002. Straße und Autobahn 10, 2003.
- [23] Ullrich, S., Glaeser, K.-P., Sander, P.: Der Einfluss der Textur auf Reifen/Fahrbahn-geräusch und Rollwiderstand. Berichte aus der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 11, 1996.
- [24] Siebel, E., Eikschen, E.: Lärmarme Betonfahrbahndecken – ein europäisches Forschungsprojekt. Straße und Autobahn 11, S. 658-662, 1995.
- [25] Beckenbauer, T.; Spiegler, P.: Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen/Fahrbahn-Geräusch, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 03.293 im Auftrag des BMVBW, 2000.
- [26] Beckenbauer, Th., Huschek, S.: Entstehungsmechanismen des Reifen/Fahrbahn-Geräusches. VDI Berichte NR 1494, 1999.
- [27] Sommer, H.: Möglichkeiten zur Herabsetzung des Rollgeräusches bei Betonfahrbahndecken. Zement + Beton 4, S. 137-141; 1989.
- [28] Sandberg, U., Descornet, G.: Road surface influence on tire/road noise. Proceedings international noise 80, Miami, Florida, USA, 1980.
- [29] Roik, G.: Einfluss des Reifens auf Fahrzeug und Fahrbahn; Straße und Autobahn, S. 315-318; 6/1996.
- [30] Kraemer, P.: Die Oberflächengestalt von Fahrbahndecken, ihre maßliche Erfassung und ihre Beeinflussung durch die Aufbaukomponenten des Belags; Straßen und Tiefbau, S.118 - 129; 3/1961 S.224 - 231; 4/1961, S.336 - 348; 6/1961 S.522 – 530; 2/1967.
- [31] Wehner, B.; Siedek, P., Schulze K.H.: Handbuch des Straßenbaus, Band 1, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1979.
- [32] Schulze, K.-H.: Griffigkeits- und Rauheitsmessungen auf Straßen mit dem Pendelgerät und dem Ausflussmesser – Neue Untersuchungen, Straße und Autobahn 1, 1973.
- [33] Schulze, K.: Festlegung eines Prüfverfahrens zur Verschleißnachahmung anhand von Verschleißmessungen auf 43 Versuchsfeldern der BAB Salzburg - München; Straße und Autobahn, S. 109 – 117; 3/1973.
- [34] Wehner, B.: Veränderung der Straßenoberflächen durch Verkehr und Wetter insbesondere bezüglich der Straßengriffigkeit; Der Bauingenieur 40, Heft 1, 1965.
- [35] Setzer, M. J. et al.: CDF-Test – Prüfverfahren des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton – Prüfung mit Taumittel-Lösung (CDF) RILEM Recommendation. Betonwerk und Fertigteil-Technik 4, S. 100-106, 1997.
- [36] Auberg, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalzwiderstandes von Beton mit dem CDF- und CIF-Test; Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, Heft 6, Universität Gesamthochschule Essen; 1998.

- [37] Setzer, M. J.: Die Mikroslinsenpumpe – Eine neue Sicht bei Frostangriff und Frostprüfung; Band 1 zur 14. ibausil (Internationale Baustofftagung) 20.-23.9.2000 in Weimar.
- [38] Locher, F. W.: Chemischer Angriff auf Beton; Beton 17, H.1, S. 47-49; 1967.
- [39] Bühlmann, F.: Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit von Fahrbahnen; Mitteilung Nr. 55 des Instituts für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau der ETH Zürich, 1985.
- [40] Umweltbundesamt: Jahresbericht 2002 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes, Texte 89/03.
- [41] Gille, F.: Über den Einfluss des Kalkgehalts des Zements und des Zuschlags auf das Verhalten des Betons in sauren Wässern. Betontechnische Berichte, S. 147-158; 1962.
- [42] Grube, H., Neck, U.: Beton widerstandsfähig gegen chemisch Angriffe. Betonwerk und Fertigteil-Technik Heft 1, S. 122-130; 1996.
- [43] Grube, H., Rechenberg, W.: Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer. Beton Heft 11, S. 446-451 und Beton Heft 12, S. 495-498; 1987.
- [44] Hosking, JR; Woodford, GC.: Measurement of Skidding Resistance Part II: Factors Affecting the Slipperiness of a Road Surface. TRL-Report LR 738, 1976.
- [45] Vogler, H.: Das Problem der witterungsbedingten Griffigkeitsschwankungen aus petrographischer Sicht; Straße und Autobahn 8/1966, S. 288-292.
- [46] Gölz, K.: Bedeutung der Oberflächenmessungen an Straßendecken; Asphalt und Teer Jhg. 1938 Nr. 31 S. 497-499 + Nr. 32 S. 508-513.
- [47] Weingraber v., H.: Über die Rauheit von Straßendecken und ein neues Verfahren zu ihrer Messung; Straße und Autobahn; S. 121-127+ 8 /1959 S. 303-307; 4 /1954.
- [48] Neumann, E.: Die Begriffsbestimmung von Welligkeit und Rauigkeit und die Verfahren zur Messung dieser Werte; Straße und Autobahn; S. 325-329, S374-377; 10 + 11/1951.
- [49] Kraemer, P.: Die Oberflächengestalt von Fahrbahndecken, ihre maßliche Erfassung und ihre Beeinflussung durch die Aufbaukomponenten des Belags; Straßen und Tiefbau, S.118 - 129; 3/1961 S.224 - 231; 4/1961, S.336 - 348; 6/1961 S.522 – 530; 2/1967.
- [50] Bundesanstalt für das Straßenwesen (BASt): T3D, Gerätebeschreibung des dreidimensionalen Oberflächenmessgerätes.
- [51] DIN EN ISO 13473: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen; Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe, Juli 2004.
- [52] Abbott, E.J.; Firestone, F.A.: Specifying Surface Quality, Mechanical Engineering nb. 55, 1933, S. 569-572.
- [53] DIN EN 13036: Prüfverfahren, Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens; August 2001.
- [54] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. Straßenbautechnik 24, 1971.
- [55] Bühlmann, F., Beurteilung der Griffigkeit auf Fahrbahnen, Schlussbericht zum FA des EDI Nr. 20/76 der ETH Zürich, März 1983.
- [56] DTV Atlas zur Physik Band 1, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & CO. KG, München.
- [57] Bundesminister für Verkehr-, Bau und Wohnungswesen (BMVBS): ARS Nr. 16/1992: Verfahren zur Messung der Geräuschemissionen von Straßenoberflächen GEstro-92.

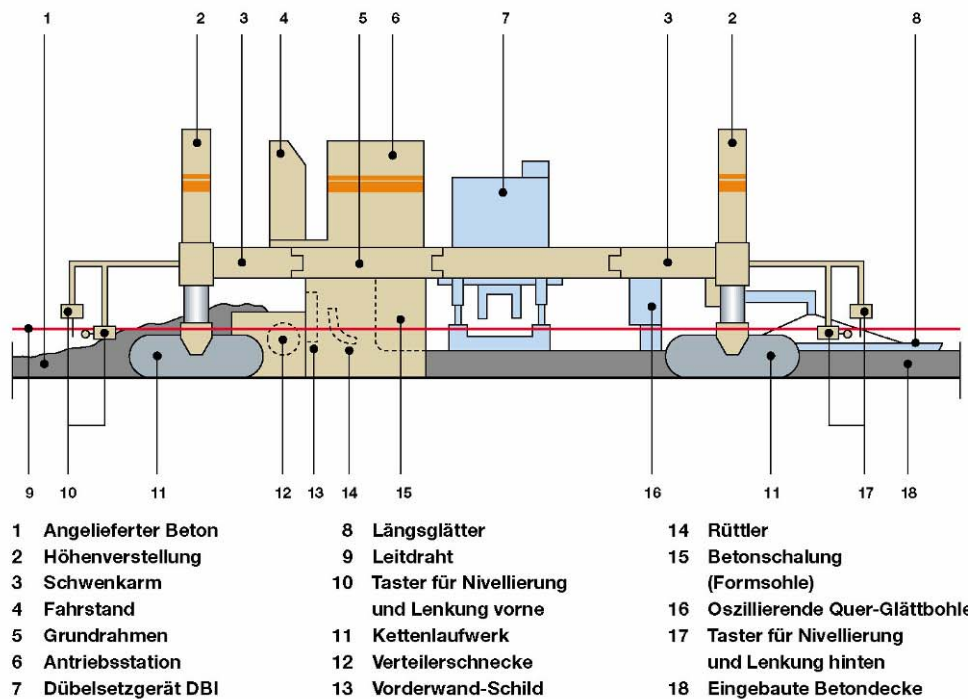
- [58] DIN EN ISO 11819: Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgerausche - Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren; Mai 2002.
- [59] Kühne, R.: Neuartige Straßenbeläge mindern Straßenlärm; Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2003, rainer.kuehne@lfu.bayern.de.
- [60] Ullrich, S.: Messung der Geräuschemission einer Straße - Messunsicherheiten, Mess-toleranzen, Straße und Autobahn 11, S. 622-623, 1998.
- [61] Huschek, S.: Zur Optimierung der Oberflächeneigenschaften von Betonfahrbahn-decken, Straße und Autobahn 1, S. 22-27, 1990.
- [62] Beckenbauer, Th.: Akustische Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen; Straße und Autobahn 10, 2001.
- [63] Kamplade, J.: Oberflächenausführung von Betondecken – Griffigkeit und Lärmver-halten, Straße und Autobahn 7, S. 442-448, 1992.
- [64] Wehner, B.: Vergleich verschiedener Messmethoden zur Messung der Straßengriffig-keit; Straße und Autobahn 6, S. 201 – 210, 1959.
- [65] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV): Arbeitsanweisung für kombinierte Griffigkeits- und Rauheitsmessung mit dem Pendelgerät und dem Ausflussmesser, Ausgabe 1972.
- [66] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Prüfvor-schriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Messverfahren SRT (TP Griff-StB (SRT)), Ausgabe 2004.
- [67] Corce, K.; Gauß, F.; Hörz, E.; Ritter, E.; Schmitz, H.; Schulze, K.-H.; Wehner, B.: Untersuchungen auf dem Gebiet der Straßengriffigkeit, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1, Bonn 1959.
- [68] Hahn, J.: Systematische Griffigkeitsmessungen, Straße und Autobahn 3, S. 99-104, 1981.
- [69] Design Manual for Roads and Bridges, Vol. 7 Pavement Design and Maintenance, Skidding Resistance; HD 28/04; The Department of Transport (GB) 2004.
- [70] Kamplade, J.; Schmitz, H.: Erfassen und Bewerten der Fahrbahngriffigkeit mit dem Messverfahren SRM und SCRIM. Forschungsberichte aus der Bundesanstalt für Verkehrswesen, Heft 4, 1984.
- [71] Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen (FGSV): TP Griff-StB (SCRIM): Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau , Teil: Messver-fahren (SCRIM), Ausgabe 2001.
- [72] BASt, Bundesanstalt für das Straßenwesen: ZEB Hintergrund; www.zeb.bast.de/zeblang.html 2004.
- [73] Lohberg, K.: Die Zustandserfassung und -bewertung der Bundesautobahnen. Straße und Autobahn 1, S. 18-24, 1991.
- [74] Potschka, V.: Die Straßengriffigkeit zwischen Verkehrssicherheit und Machbarkeit. Straße und Autobahn 5, 2001.
- [75] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV): ZTV-Beton-StB 01: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2001.
- [76] Bundesminister für Verkehr-, Bau und Wohnungswesen (BMVBW): ARS Nr. 24/2003, vom 7.7.2003.

- [77] Bodschwina, H.: Funktionsgerechte Rauheitsbeschreibung; Technische Rundschau 26/88, S. 36-40.
- [78] DIN EN ISO 13565: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve, April 1998.
- [79] Brunner, M.: Untersuchungen über den Einfluss der Zuschläge im Mörtel- und Grobkornbereich auf die Griffigkeit von Betonoberflächen bei unterschiedlicher mechanischer Beanspruchung (Polierbarkeit). Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Forschungsbericht Heft 298, 1980.
- [80] Walz, K.: Einfluss der Zusammensetzung und der Oberflächentextur von Straßenbeton auf die Griffigkeit; beton 10 + 11/1967, S. 369-373 + S. 403-406.
- [81] Ejsmont, J.A.: Tire/ Road Noise Generating Mechanisms and Possible Ways of their Reduction. Proc. of the Second International Seminar TRE/ROAD NOISE, TUG, Gdansk, Poland, 25 Juni 1997, VTI Konferens No. 8A, VTI, SE-581 95 Linköping, Schweden, 1997.
- [82] DIN EN 12697-16 "Asphalt – Prüfverfahren für Heiasphalt – Teil 16: Abrieb durch Spikereifen", Berlin, September 2004.
- [83] DIN EN 12390: Prüfung von Festbeton Teil 9: Prüfung von Frost und Frost-Tausalz Widerstand, Abwitterung. Entwurf Mai 2002.
- [84] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Merkblatt Frostprüfung von Beton, Ausgabe Dezember 2004.
- [85] Dorner, H., Hilbig, H.: Widerstand von Beton sehr geringer Porosität gegenüber einem sehr starken chemischen Angriff. Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben (Nr. Do. 279), 12/1999.
- [86] Heft 103: Zur Quantitativen Bewertung der Rauheit von Straßenoberflächen in Beziehung zum Reibungswiderstand bei Nässe der Schriftenreihe "Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik", BMVBW 1970.
- [87] Walz, K; Bonzel, I.: Über den Zusammenhang zwischen Griffigkeit, Abnutzbarkeit, Betonzusammensetzung und Herstellung der Betonfahrbahnen; Straßen- und Tiefbau 10/1968, S. 761-768.
- [88] Huschek, S.: Polierwiderstand und Griffigkeit- Langzeiterfahrungen; Straße und Autobahn 9/2004 S. 492-498.
- [89] FA 06.070/1999: Entwicklung der Oberflächeneigenschaften auf der Versuchsstrecke Bamberg A70; Fachgebiet Straßenwesen TU Berlin.
- [90] Böhnisch, S.; Wörner, Th.: Untersuchungen zur Qualifizierung von Geräten zur Prognose von Griffigkeitskennwerten – Vorstudie; Schlussbericht zum Forschungsauftrag FGSV-Nr.: 5/2002.
- [91] Sliwa, N.; Marx, U.: Untersuchung und Bewertung von neuartigen Oberflächentexturen auf Betondecken hinsichtlich Griffigkeit und Geräuschreduzierung; Teilbericht Nr.1/2004 Messreihe 1-5; AP-Nr. 04.335/S3; (unveröffentlicht).
- [92] Beckhaus K.: Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von hochfestem Straßenbeton Teile I+II (FA 08.141/1996/LGB); Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung TU München 2002.
- [93] Autobahndirektion Südbayern, 2005.

- [94] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen (FGSV): TP Min-StB Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau Teil 5.5.2: Bestimmung des Polierwertes mit dem Verfahren nach Wehner/Schulze; Ausgabe 1999.
- [95] Hartmann V.: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton; Dissertation an der Universität Essen; 1992.
- [96] Siebel E., Breit W.: Final Report Be-TB-1489-4/1998, Standard Methods for Testing the Resitance of Concrete to Freezing and Thawing; Düsseldorf; 1998.
- [97] Brandes, Chr.: Übertragbarkeit von Frost-Tausalz-Versuchen auf die Praxis; Beitrag zur 6. CDF-/ CIF-Fachtagung, Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton; Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, Heft 10; Essen 2006.
- [98] DIN EN 206: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Ausgabe: August 2001.

ANHANG

ANHANG A: zu Kapitel 2

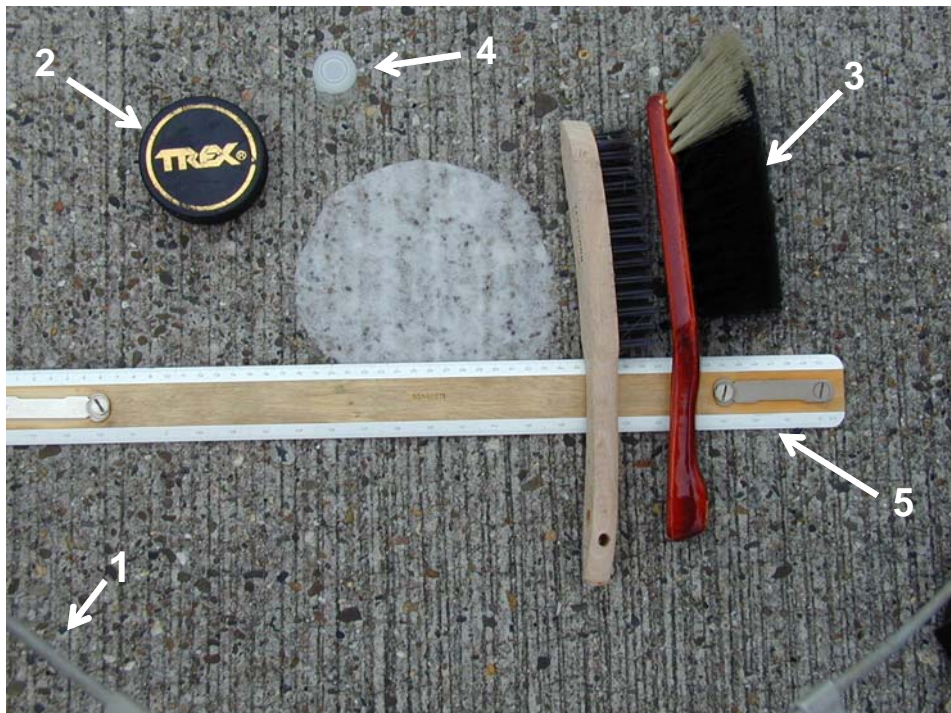


(Quelle: Firma WIRTGEN, 2004)

Bild A 1: Schematischer Aufbau eines modernen Gleitschalungsfertigers für die Herstellung von Betonfahrbahndecken (ohne Nachläufer mit den Texturierungs- und Nachbehandlungskomponenten)

Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe

Die mittlere Oberflächentexturtiefe wird nach DIN EN 13036-1 [53] kann mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens (Sandfleckmethode) bestimmt werden. Dabei wird ein bestimmtes Volumen eines Prüfmediums (hier Glaskugeln $0,18 \text{ mm} < \varnothing < 0,25 \text{ mm}$) mit einem Verteilwerkzeug (Hartgummi-Scheibe mit $\varnothing = 50 \text{ mm}$) auf der Prüfoberfläche zu einer Kreisfläche verteilt. Die mittlere Oberflächentexturtiefe MTD ergibt sich aus dem Quotienten von Volumen und sich ergebender Kreisfläche.



Legende

- 1 tragbarer Windschutz
- 2 Verteilerwerkzeug
- 3 Bürsten zur Reinigung
- 4 zylindrischer Probenbehälter
- 5 Lineal

Bild A 2: Hilfsmittel zur Bestimmung der mittleren Oberflächentexturtiefe [8]

statistische Vorbeifahrtmethode (SPB) [58]

Das Messprinzip beruht auf einer sog. Fernfeldmessung, welche neben der Schallerzeugung infolge des Reifen/Fahrbahnkontaktes auch die Schallausbreitung erfasst. Zur Ermittlung des Vorbeifahrtpegels von Fahrzeugen an einer Straße wird mittels der statistischen Vorbeifahrtmethode der maximale A-Bewertete Schalldruckpegel und die Geschwindigkeit einer statistisch signifikanten Anzahl an Fahrzeugen während ihrer Vorbeifahrt an einem definierten Ort in Straßennähe gemessen (vgl. Bild A 3). Die Schallpegelmessung erfolgt mittels Mikrofonen die einen definierten Abstand von der Fahrbahn in horizontaler und vertikaler Richtung haben (vgl. Bild A 4).

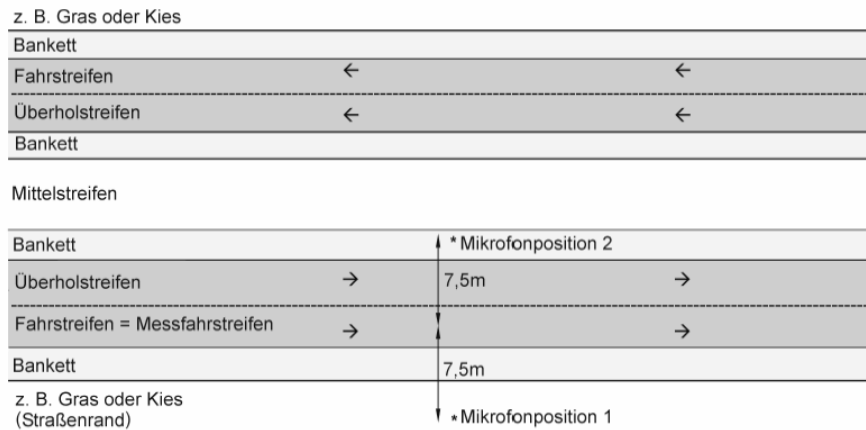


Bild A 3: Beispiel der Mikrofonposition an einer typischen 4 streifigen Straße [58]

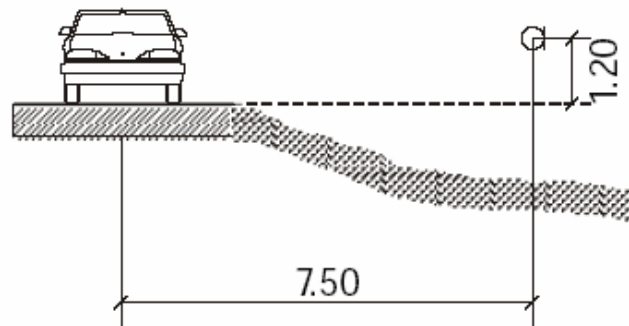
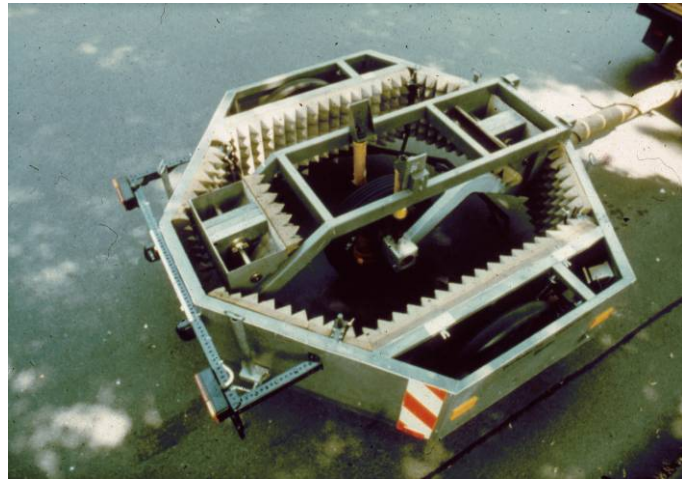
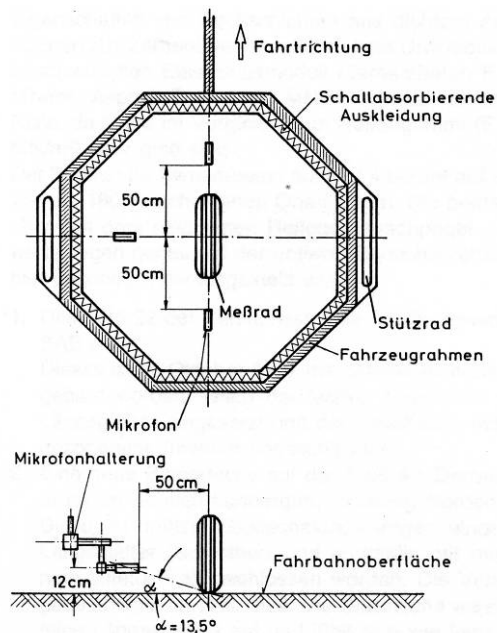


Bild A 4: Geometrie der horizontalen und vertikalen Abstände [in Meter] des Messmikrofons zur Aufnahme des maximalen Vorbeifahrtpegel [57]

Lärmessanhänger

Mit der Verwendung von Lärmessanhängern (Nahfeldmethode) wurde in der Vergangenheit versucht die Aufnahme von Vorbeifahrtpegeln mit der statistischen Vorbeifahrtmethode zu ergänzen oder zu ersetzen. Dies ist vor allem für Stellen sinnvoll, die aufgrund ihrer örtlichen Begebenheiten ein Messen mit der statistischen Vorbeifahrtmethode nicht oder nur mit großem Messaufwand zulassen. So lässt sich beispielsweise die Homogenität der Straßenoberfläche über ein längeres Streckenstück erfassen. [60]

Für die Durchführung von Rollgeräuschmessungen mittels einer Nahfeldmessung werden sog. Geräuschmess- oder Lärmessanhänger verwendet. Bei dieser Meßmethode wird das Abrollgeräusch eines oder mehrerer Messreifen im Inneren des Anhängers mit seitlich in der Nähe der Messreifen angebrachten Mikrofonen erfasst (Bild A 5). In Europa gibt es verschiedene Ausführungen dieser Messeinrichtungen, so wurde z.B. in Deutschland Anfang der 1990er Jahre ein Messgerät an der TU Berlin finanziert vom Bundesministerium für Forschung und Technologie entwickelt (Bild A 5). [61]



(Quelle: TU Berlin)

Bild A 5: links: Prinzipskizze des Lärmmessanhängers der TU Berlin [61]
rechts: Foto des Lärmmessanhängers der TU Berlin (schräge Draufsicht)

SRT-PENDEL

Das SRT-Pendel ist eine stationäre Messeinrichtung, und tragbares Handmessgerät, das an dem Ort der Messung installiert und benutzt wird. Bei der SRT-Messung wird ein Gleitschuh, der an einem Pendel befestigt ist, aus der Horizontalen gestartet und auf etwa 13 km/h beschleunigt. Über eine definierte Kontaktlänge der Fahrbahn- bzw. Prüfoberfläche wird der Gleitschuh je nach Texturwirkung gebremst. Wenn die Oberfläche eine höhere Griffigkeit, d.h. höhere Bremswirkung aufweist, führt dies bei dem durchschlagenden Pendel zu einem geringeren Ausschlag und einem höheren SRT-Wert. Mit dem Pendelgerät lassen sich die Griffigkeitseigenschaften einer Oberfläche vor allem für kleine Geschwindigkeiten abschätzen. Hierbei erfasst das Pendelgerät bei seinen Messungen im Wesentlichen die Wirkung der Mikrorauheit einer Oberfläche, nicht aber deren Makrorauheit. Um diese zusätzlich zu erfassen, wird bei der o.g. kombinierten Prüfmethode gleichzeitig der Ausflussmesser nach Moore eingesetzt. Eine Kombination beider Messungen lässt nun einen Rückschluss auf die Griffigkeit einer Oberfläche für Geschwindigkeiten $V \geq 60 \text{ km/h}$ zu. [66]

Ausflussmesser nach MOORE

Der Ausflussmesser besteht aus einem durchsichtigen, oben offenen Zylinder, der mit einem Gummiring auf der Fahrbahn aufgesetzt wird. Der Zylinder wird mit einer bekannten Wassermenge befüllt, und die Zeit, die das Wasser zum Auslaufen benötigt, gemessen. Besitzt eine Oberfläche eine große Makrorauheit, also ein gutes Drainagevermögen, so ist die Zeitspanne bis zum Leeren des Zylinders klein. [66]

SKM (Seiten-Kraft-Messgerät)

Das SKM verwendet zur kontinuierlichen Messung eines Griffigkeitsbeiwertes des Messprinzip eines gegen die Fahrtrichtung schräggestellten (20° -Winkel) Messrades, das somit unter Seitenschlupf läuft (vgl. Bild A 6). Der Messbereich vor dem Messreifen wird mit einer rechnerischen Wasserfilmdicke von 0,5 mm angenässt. Der Messreifen selbst ist ein profilloser von der PIARC (Permanent International Association of Road Congresses) empfohlener Reifen. Als Kenngröße für die Griffigkeit wird über das Kraftschlussvermögen des unprofilierten Messreifens ein geschwindigkeitsabhängiger Seitenkraftbeiwert als Quotient aus der gemessenen Seitenkraft F_S und der Radlast F_N ($1,96 \text{ kN}$) bestimmt ($\mu_{SKM} = F_S / F_N$). Der Seitenkraftbeiwert wird kontinuierlich bei konstanter Geschwindigkeit über längere Messdistanzen erfasst. Das Messergebnis einer Strecke besteht aus Einzelwerten, welchen ein über 100 m Messpurlänge gemittelter Wert zugrunde liegt. [70]



(Quelle: BAST)

Bild A 6: oben: Messfahrzeug SKM
unten: Detail des schräglaufenden Messrades

Stuttgarter Reibungsmesser (SRM)

Die Messeinrichtung beruht auf dem Prinzip des blockierten Schlepprades, welches die Notfallbremsung eines Kraftfahrzeuges unter definierten Randbedingungen simuliert. Die Randbedingungen der Versuchsdurchführung sind eine definierte Radlast von 3,43 kN, die Annässung der Straßenoberfläche vor dem Messrad mit einer rechnerischen Wasserfilmdicke von 1,0 mm, konstanten Messgeschwindigkeiten (40, 60 und 80 km/h) und einem definierten Messreifen. Die Griffigkeitsmessung erfolgt durch Abbremsen des Messreifens bis zum Stillstand und Messung der während des Bremsvorganges zwischen Reifenaufstandsfläche und nasser Fahrbahnoberfläche wirkende Reibungskraft. Der Gleitbeiwert errechnet sich aus dieser Kraft dividiert durch die statische Auflast (von hier 3,43 kN). [2]



(Quelle: TU Berlin)

Bild A 7: links: Stuttgarter Reibungsmesser (SRM) während der Messfahrt
rechts: Im Detail blockiertes Messrad

Zwischen beiden Verfahren (SCRIM und SRM) besteht bei den gleichen drei Messgeschwindigkeiten (40, 60 und 80 km/h) ein relativ enger korrelativer Zusammenhang, wobei die SCRIM-Werte höher liegen als die vergleichbaren SRM-Werte. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,87 kann mit folgender Umrechnung erfolgen:

$$\mu_{\text{SCRIM}} = 0,072 + 0,895 \cdot \mu_{\text{G}}$$

$$\mu_{\text{G}} = 0,005 + 0,957 \cdot \mu_{\text{SCRIM}}$$

ANHANG B: zu Kapitel 3Funktionsweise des Doppeltriangulationssensor

Im Bild A 8 ist links ein Foto sowie eine Schemaskizze der Funktionsweise eines Doppeltriangulationssensor dargestellt. Der Laserkopf für die Messung der vertikalen z-Koordinaten ist oberhalb eines horizontal verschiebbaren x-y-Tisches an einem Galgen starr befestigt. Dieser Messkopf, arbeitet nach dem (Doppel-) Triangulationsmessprinzip mit zwei symmetrisch angeordneten positionsempfindlichen Detektoren, die auf einen Messbereich von max. $\Delta z = 3$ mm kalibriert sind, womit die maximal aufnehmbare Texturtiefe ebenfalls auf 3 mm beschränkt ist. Der x-y-Tisch, auf dem die Probe fixiert wird, kann in der horizontalen Ebene maximal $100 \times 100 \text{ mm}^2$ (mithilfe eines Schrittmotors) abfahren. Die Aufnahme der Topographie einer texturierten Oberfläche kann mit diesem Messgerät mit einer lateralen Auflösung von $30 \mu\text{m}$ und einer vertikalen Auflösung von $0,3 \mu\text{m}$ erfolgen.

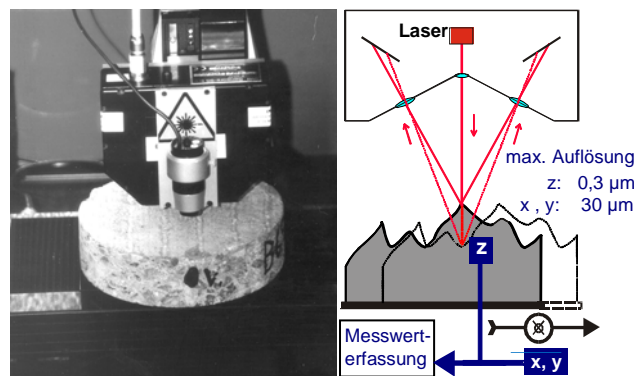


Bild A 8: links: Messkopf eines Doppeltriangulationssensors im Foto (mit Bohrkerneprobe $d/h = 15/4$ [cm])
rechts: Skizze der Funktionsweise [11]

Bei jeder Inbetriebnahme des Gerätes fährt der x-y-Tisch zur Kalibrierung in eine äußere Ecke seines maximalen Messbereichs und setzt diese Position zu seinem Koordinatenursprung, so dass mit ortstreuen Koordinaten gearbeitet werden kann.

Texturmessung einem photooptischen Messgerät (Streifenprojektion)

Im Bild A 8 ist beispielhaft ein photooptisches Messsystem dargestellt. Das Messsystem besteht im Wesentlichen aus einem Messkopf mit dem Mikrospiegelprojektor, einer Digitalkamera zur Bildaufnahme sowie einem Messrechner. Bei dem hier verwendeten Messprinzip der Streifenprojektion projiziert ein Mikrospiegelprojektor die optischen Streifen unter einem bestimmten Triangulationswinkel auf die Oberfläche des Messobjektes und eine Digitalkamera nimmt ein Bild auf. Dann wird das Höhenbild aus der Lage der Streifen und dem Grauwert einzelner Bildpunkte errechnet.



(Quelle: Bundesanstalt für das Straßenwesen (BASt))

Bild A 9: Aufbau eines photooptischen Messsystems: hier das T3D Messsystem der BASt

Bestimmung der Kennwerte aus dem Wellenlängen-Amplituden-Spektrum für die Mikro- und Makrotextur

In Bild A2 werden die Auswerteschritte für ein Verfahren gezeigt, bei dem die Wellenlängen-Amplituden-Spektren getrennt voneinander für die Mikro- und für die Makrotextur bis $\lambda = 10$ mm betrachtet werden.

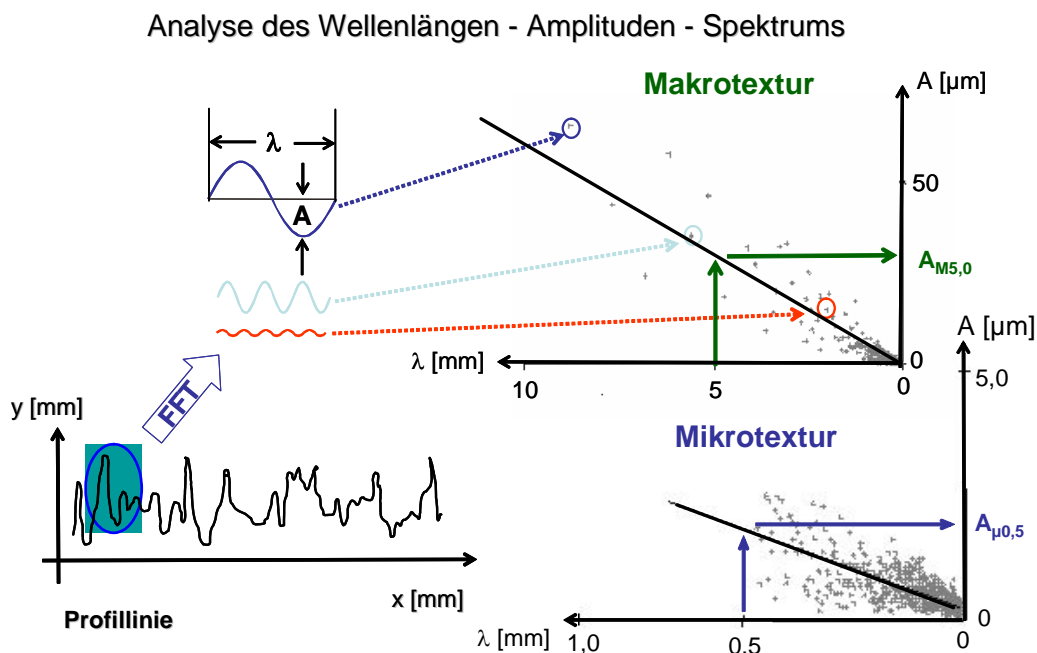


Bild A 10: Arbeitsschritte zur Ermittlung der Kennwerte der Makro- und Mikrotextur [11]

Zuerst wird das Profil gekippt und vertikal verschoben, so dass Anfangs- und Endpunkt die gleiche Höhe (0) besitzen. Anschließend wird mittels der Fast-Fourier-Transformation das

Wellenlängen-Amplituden-Spektrum ermittelt, wobei hier die Amplitudenwerte im linearen Maßstab über die zugehörigen Wellenlängen aufgetragen sind. Die Spektren für die Mikro- und Makrotextrur (nach dem Abtrennen der übrigen Anteile) sind im linearen Maßstab rechts in Bild A 10 gezeigt. Die Regressionsgerade für das jeweilige Spektrum kann eindeutig zum einen über die Steigung y_x der Geraden und zum anderen über eine Kennamplitude A_x beschrieben werden. Für die Mikrotextrur wird die zu der Bezugswellenlänge $\lambda = 0,5$ mm gehörige Kennamplitude $A_{\mu 0.5}$ bestimmt, für die Makrotextrur entsprechend die zu der Bezugswellenlänge $\lambda = 5$ mm gehörige Kennamplitude $A_{M5.0}$. Die Veränderung der Kennamplitudenwerte wird stellvertretend für die Veränderung der Textur und somit als Maß für die Texturbeständigkeit verwendet.

Bestimmung von Kennwerten aus der Materialanteilkurve nach DIN EN ISO 13565 Teil 2 [78]

Bild A 11 zeigt ein Texturprofil (links) und dessen Materialanteilkurve (rechts).

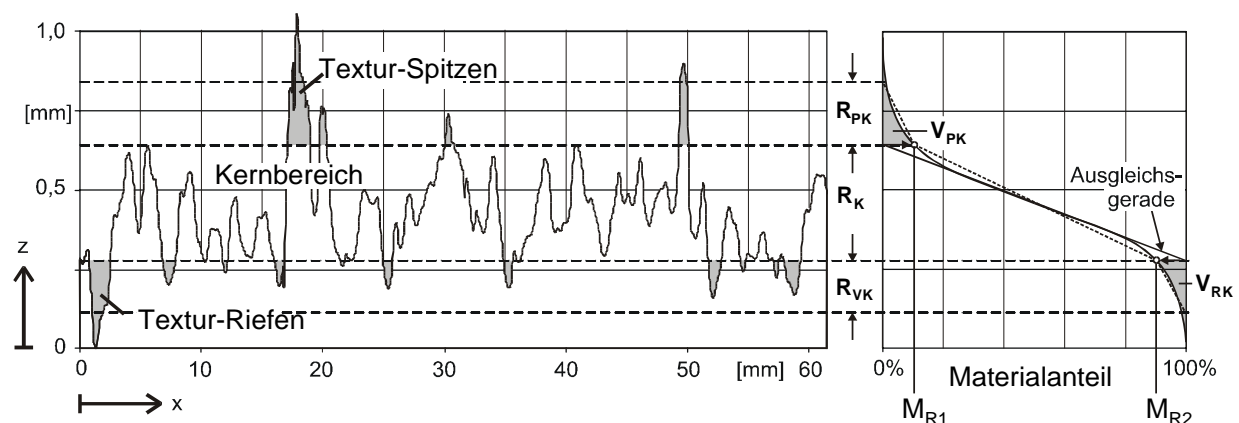


Bild A 11: links: Profilschnitt

rechts: Materialanteilkurve (Abbott-Kurve) mit den für die jeweiligen Profilbereiche charakteristischen Kennwerten, nach [78]

Kennzeichnend für die in Bild A 11 rechts dargestellten drei Bereiche (R_{PK} , R_K , R_{VK}) ist die über die Höhe betrachtet unterschiedlich starke Materialzunahme. Der Kernbereich mit der Höhe R_K , der durch eine Ausgleichsgerade mit der geringsten Neigung über 40 % des Materialanteils definiert wird, zeichnet sich durch die größte Materialzunahme beim tieferen Vordringen in das Profil aus. Je geringer die Neigung dieser Geraden ist, desto widerstandsfähiger ist das Profil gegenüber mechanischen Belastungen und desto kleiner ist die Kernrautiefe R_K . Ober- und unterhalb des Kernbereichs wird ein flächengleiches Dreieck (schraffierte Fläche im Profilverlauf = schraffierte Fläche im Kurvenverlauf) konstruiert, dessen Höhen die sog. reduzierte Spitzenhöhe (R_{PK}) bzw. die sog. reduzierte Riefentiefe (R_{VK}) sind. Durch diese Reduzierung wird erreicht, dass vereinzelt auftretende hohe Spitzen und tiefe Riefen unberücksichtigt bleiben und somit die Auswertung weniger stark beeinflussen. Die maximale Rautiefe der Textur ist demnach größer als die Summe von R_{PK} , R_K und R_{VK} . Die Materialanteile M_{R1} und M_{R2} ergeben sich durch Bestimmen der Schnittpunkte der Materialanteilkurve bei den jeweiligen Schnitthöhen der verlängerten

Ausgleichsgerade. Diese können als zusätzliche Information über die Größe des Materialanteils des Spitzen-, Kern-, und Riefenbereichs verwendet werden. [77], [78]

Das Prallabriebgerät

Im Prallabriebgerät werden Oberflächen durch den Beschuss mit Gummi- oder Stahlkugeln in einer Prallkammer mechanisch beansprucht, vgl. Bild A 12 [33]. Eine Betonscheibe wird auf der horizontalen Grundplatte des Prallabriebgerätes befestigt und mit einem Deckel gegen Probe und Grundplatte verspannt. Die Prallkammer zwischen Probenoberfläche und Deckel wird mit einer definierten Menge an Kugeln (Bild A 12 rechts) gefüllt und über einen Kurbeltrieb in vertikale Schwingungen mit einer Frequenz von 750 pro Minute und einem Hub von 25 mm gebracht.

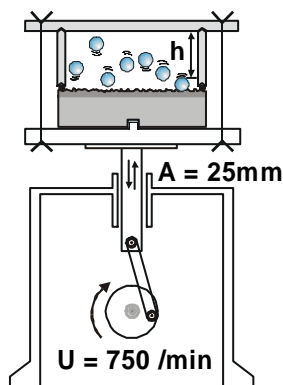


Bild A 12: rechts: Skizze des Prallabriebgerätes [nach 33].

links: Ansicht der zu beprallenden Straßenbeton-Oberfläche mit Gummikugeln

Die Beanspruchung der Oberfläche ist von dem Material und Durchmesser der Kugeln und hier zusätzlich von der Prallhöhe h abhängig. An Betonschnittflächen mit freigelegtem Grobkorn wurde die höchste Polierwirkung bei einer Prallhöhe entsprechend dem 3fachen Kugeldurchmesser festgestellt. [79]

Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes mit dem CDF-TEST

Mineralisch gebundene Baustoffe können auf ihren Frost- oder Frost-Tausalz-Widerstand mit dem sog. CDF-Test (CDF = Capillary Suction of De-icing Chemicals and Freeze-Thaw) nach Setzer geprüft werden [35]. Der Prüfablauf zeichnet sich durch eine hohe Präzision und damit geringe Prüf- und Wiederholstreuung aus. Die Versuchsdurchführung sieht eine Lagerung der Betonproben nach ihrer Herstellung 7 Tage unter Wasser und dann bis zum Alter von 28 Tagen im Klima 20 °C und 65 % r.F. vor. Anschließend werden die seitlich abgedichteten Proben 7 Tage lang mit ihrer Prüfseite 5 mm tief in einer Taumittellösung (i.d.R. 3 %ige NaCl-Lösung) vorgelagert, bevor sie den 28 Frost-Tau-Zyklen ausgesetzt werden. Die Edelstahlbehälter mit den Proben und der Taumittellösung werden in der CDF-Truhe von einer Kühlflüssigkeit umgeben, über die der Boden der Behälter in einem 12-Stunden-Rhythmus innerhalb von 4 Stunden von

+20 °C auf -20 °C abgekühlt und nach 3 Stunden innerhalb von 4 Stunden wieder auf +20 °C erwärmt wird. Gemessen werden die Entwicklung der Abwitterung und die Massezunahme durch das kapillare Saugen während der Vorlagerung und ggf. nach den Frost-Tau-Zyklen. [35], [83], [84]

Der lösende Angriff

Das grundlegende Prinzip des hier verwendeten Laborverfahrens ist es, die Betonproben mit einer Lösung zu beanspruchen, die über den gesamten Versuchszeitraum einen konstanten pH-Wert aufweist. Dies wird durch eine Pufferlösung mit hoher Kapazität erreicht [85]. Die lösende und gleichzeitig puffernde Wirkung wird durch die Essigsäure (CH₃COOH) erreicht, die nur teilweise dissoziiert und so im Laufe des Reaktionsprozesses stetig H⁺-Ionen nachliefern kann. Der pH-Wert wird i.d.R. durch eine Natriumacetat-Lösung gesteuert. Während der gesamten Zeitdauer wird eine Abweichung von höchstens 0,1 vom pH-Sollwert toleriert. Die Homogenität der Lösung von etwa 11 Liter Volumen wird durch die stetige Zirkulation (8 l/min) der Lösung in dem Edelstahlbehälter gewährleistet, so dass an den Oberflächen der Probe keine Abschwächung des lösenden Angriffs auftritt, indem der Beton H⁺-Ionen verbraucht.

Messungen mit der Prüfanlage Wehner/Schulze

Die Prüfanlage Wehner/Schulze besteht aus zwei Einheiten, zum einen aus der Poliereinheit und zum anderen aus der Messeinheit zur Bestimmung des Reibwiderstandes der Oberfläche (Bild A 13). Die Poliereinrichtung simuliert hierbei zeitraffend eine Verkehrseinwirkung auf der Oberfläche des Prüfkörpers, indem drei unter Schlupf (< 1%) laufende, konische Rollen aus Reifengummi über die Oberfläche laufen. Die Gummilaufflächen sind mit Querrillen versehen, um das für den Poliervorgang bedeutende Ausschneiden der Reifenstollen am Riefenauslauf nachzuahmen. Das Polieren wird durch die Zugabe eines Wasser/Quarzmehlgemischs auf die Probenoberfläche, welches als Schmirgel fungiert und die Wirkung des Straßenstaubes simuliert, verstärkt.



Bild A 13: Apparatur Laborgriffigkeitsmessgerät Wehner/Schulze der TU München (neue Generation)

Die Messung des Reibwiderstandes der Oberfläche wird mit der zweiten Geräteeinheit durchgeführt. Das Kernstück ist ein elektronisch auskuppelbarer Messkopf mit drei Messgummis, der auf eine Bahngeschwindigkeit von 100 km/h beschleunigt wird. Anschließend wird dieser ausgekoppelt und unter Zugabe von Wasser auf die Prüfoberfläche abgesenkt. Hierbei findet ein Abbremsvorgang unter nassen Bedingungen des Messkopfes statt. Das durch den Bremsvorgang in der Kontaktfläche zwischen Messgummi und Prüfoberfläche wirkende Moment wird bis zum Stillstand gemessen, woraus der Gleitbeiwert μ in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ermittelt wird. Zur Auswertung wird der bei 60 km/h gemessene Gleitbeiwert herangezogen. Dieser wird als PWS-Wert bezeichnet. [86]

ANHANG C: zu Kapitel 4

Zusammensetzung und Frischbetoneigenschaften des Betons der BAB A44 [92]

Die Rezepturen für den normalfesten Beton B35 (A44_B35) sowie die des hochfesten Betons B65 (A44_B65) sind in Bild A 14 dargestellt. Hierbei ist v.a. zu beachten, dass bei dem normalfesten Straßenbeton, um die geforderte Einbaukonsistenz zu erhalten, im Gegensatz zur Eignungsprüfung der Wassergehalt um 10 l/m^3 und damit der w/z-Wert von 0,44 auf 0,41 reduziert wurde. Der zusätzlich eingesetzte Beton B45 (A44_B45) besaß die Grundrezeptur des normalfesten Betons und wurde wie der hochfeste Beton A44_B65 mit Diabassplitt hergestellt. Der w/z-Wert betrug 0,40 und war dem des eingebauten A44_B35 annähernd gleich. Rechts im Bild ist der Entwicklungsschritt von den Laborbeton-Rezepturen zum A44_B65 mit einem w/b-Wert von 0,34 und 4 % Silikastaub aufgezeigt.

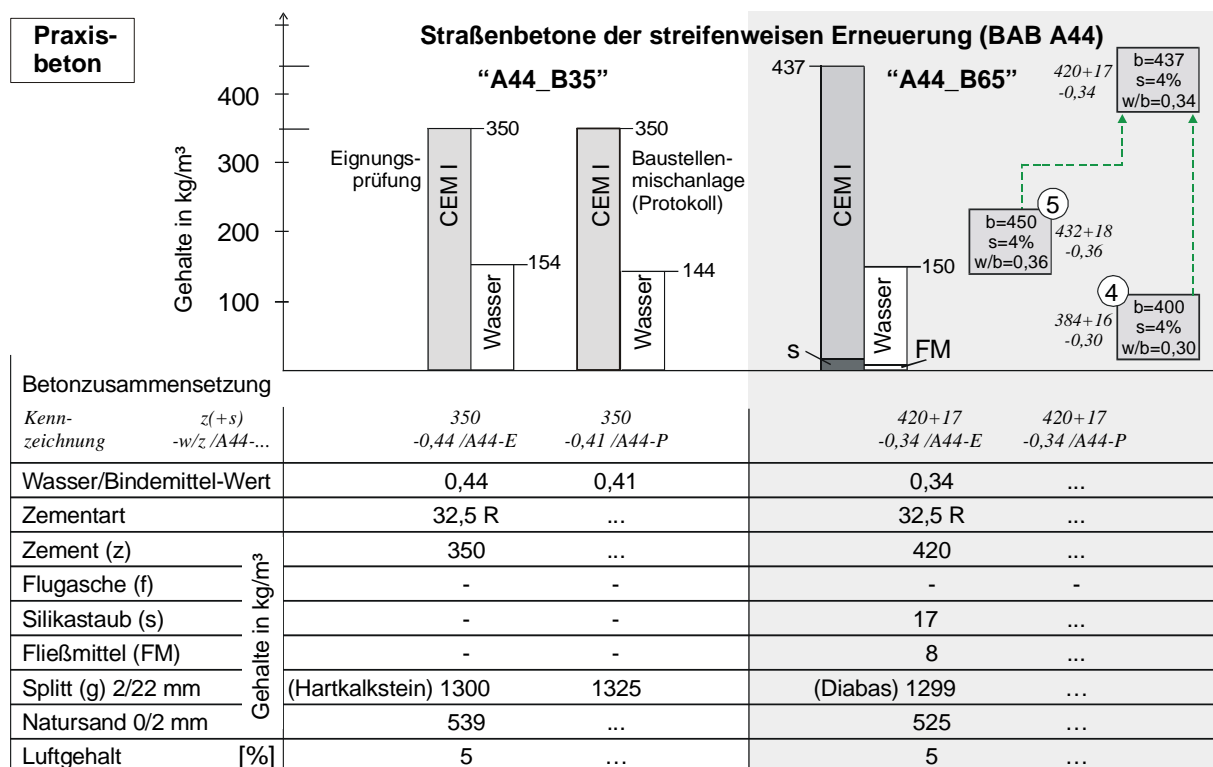


Bild A 14: Zusammensetzungen des in der Praxis eingesetzten hochfesten Straßenbetons A44_B65 und des normalfesten Straßenbetons A44_B35 [92]

Die festgestellten Frischbetonwerte der jeweiligen Betone sind in Bild A 15 dargestellt.

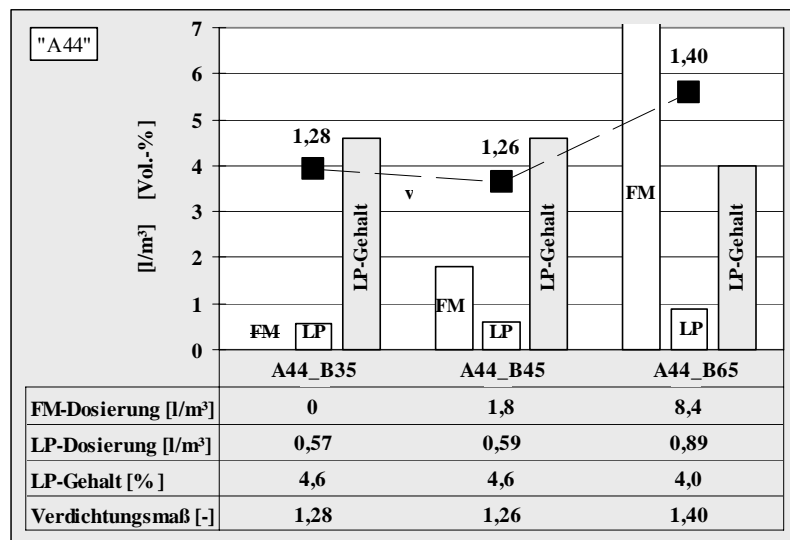


Bild A 15: Zusatzmitteldosierungen und Luftporengehalte der Straßenbetone der Erprobungsstrecke A44 [92]

Der Oberflächenmörtel der jeweiligen Betone wurde baubegleitend hinsichtlich der sich ergebenden rechnerischen Mörtelschichtdicke (Verfahrensbeschreibung vgl. [9]) sowie der Druck- und Biegezugfestigkeit und des sich einstellenden Wassergehaltes untersucht [91]. Die Ergebnisse sind in Tabelle A 1 dargestellt.







Tabelle A 1: Ergebnisse der Mörteluntersuchungen aus [91]

	A44_B35	A44_B45	A44_B65
1	2	3	4
Rechnerische Mörtelschichtdicke [mm]	0,53	0,74	0,45
Wassergehalt [M.-%]	16,5	13,7	15,0
Druckfestigkeit [N/mm²]	30,80	33,35	63,00
Biegezugfestigkeit [N/mm²]	5,1	5,4	9,8



Verwendete Texturen auf der BAB A44

Die Texturierung des Oberflächenmörtels der jeweiligen Versuchsfelder erfolgte direkt hinter dem Fertiger. In der folgenden Tabelle A 2 sind die Texturierungswerkzeuge und die sich daraus ergebende Texturen dargestellt.

Tabelle A 2: links: Texturierungswerkzeuge BAB A44
rechts: entstandene Textur BAB A44; entnommen aus [91]

Texturierungswerkzeug	Entstandene Textur
1	2
 <p data-bbox="416 1084 655 1122">Jutetuchlängsstrich</p>	
 <p data-bbox="344 1469 727 1507">Jutetuchlängsstrich mit Kamm</p>	
 <p data-bbox="429 1868 643 1906">Besenlängsstrich</p>	

Fortsetzung Tabelle A 2

Texturierungswerkzeug	Entstandene Textur
1	2
 <p>Besenquerstrich</p>	

Beschreibung der Messfelder für die von der BAST durchgeführte Untersuchung der Texturen der BAB A44 [91]

In Bild A 16 ist die Einteilung der Erprobungsstrecke in die jeweiligen Messfelder und deren Bezeichnung für das von der BAST durchgeführte Messprogramm dargestellt.

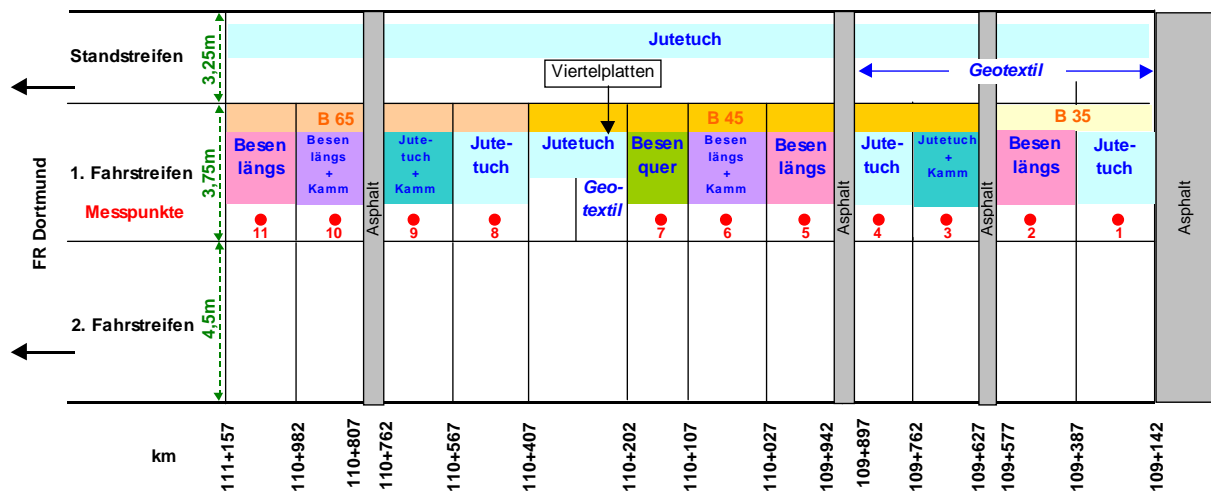


Bild A 16: Skizze der Erprobungsstrecke mit Darstellung der Messfelder (unmaßstäblich) [91]

Der Aufbau eines Messfeldes ist exemplarisch aus der nachfolgenden Zeichnung (Bild A 17) ersichtlich.

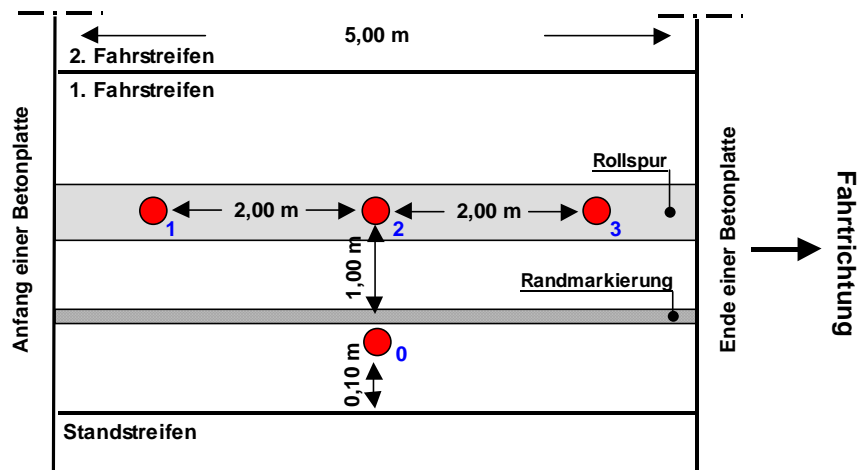
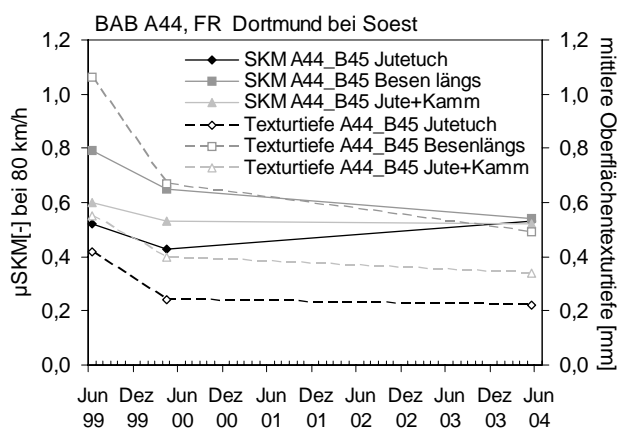
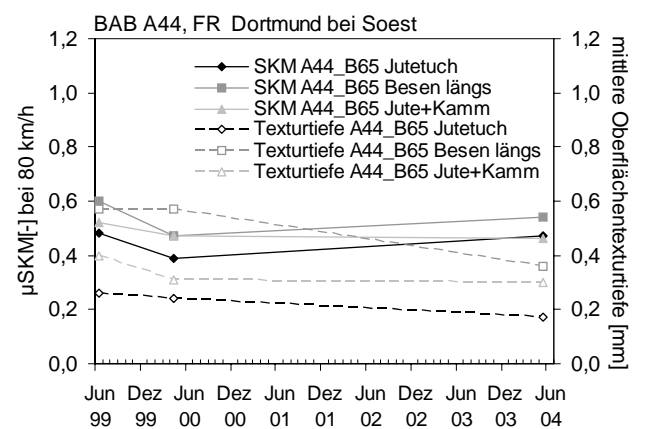


Bild A 17: Aufbau eines Messfeldes (unmaßstäblich) [91]

Die Messpunkte 1 – 3 liegen im Bereich der Rollspur, der mit 0 gekennzeichnete Punkt liegt außerhalb der Rollspur und fließt als Referenzwert in die Betrachtung ein.



Messwerte der Texturen im Beton A44_B45



Messwerte der Texturen im Beton A44_B65

Bild A 18: Entwicklung der Griffigkeitswerte gemessen mit dem SKM (100 Mittelwerte) und der mittleren Oberflächentexturtiefen über den Messzeitraum von Texturen im Bereich des A44_B45 (links) und des A44_B65 (rechts); Messwerte aus [91]

Beschreibung der Entnahmestellen der Bohrkerne für die im Labor durchgeführten Untersuchung der Texturen der BAB A44

In Bild A 19 sind links die Entnahmestellen im Bereich des Fahrstreifens (Rollspur) und des Standstreifens skizziert. Rechts sind die Entnahmestellen skizziert, wenn nur aus dem Fahrstreifen Bohrkerne entnommen worden sind.

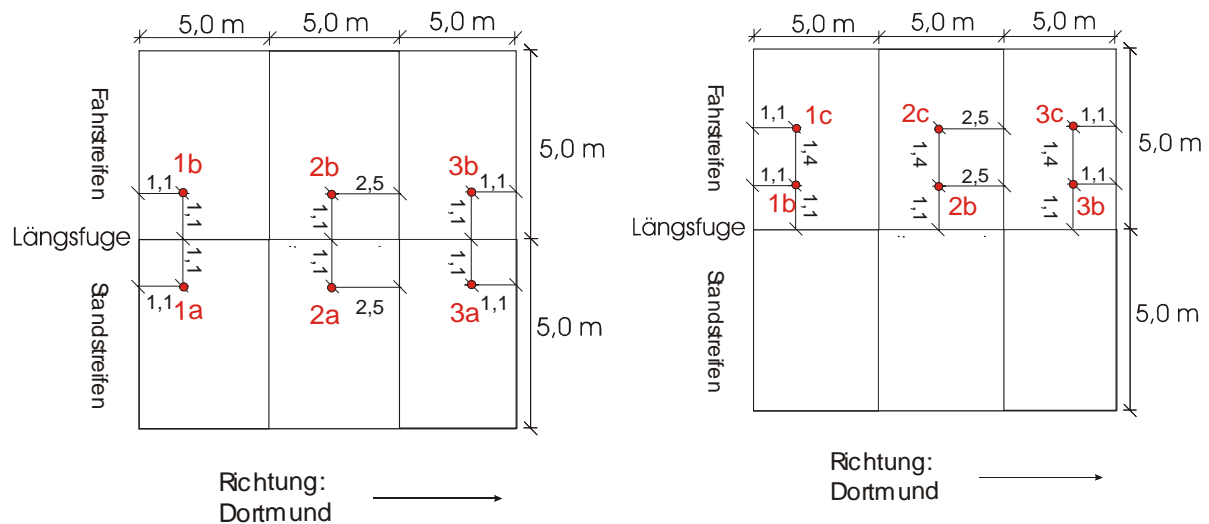


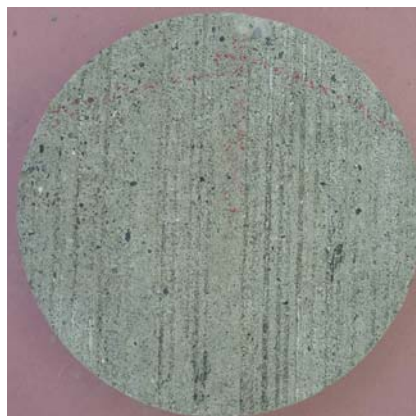
Bild A 19: links: Skizze der Entnahmestellen der Bohrkerne die auf dem Fahrstreifen und des Standstreifens entnommen wurden (unmaßstäblich)
rechts: Skizze der Entnahmestellen der Bohrkerne, die nur auf dem Fahrstreifen in der Rollspur und in der Mitte entnommen worden sind (unmaßstäblich)

Texturprobekörper aus der BAB A44

Im Folgenden sind Fotos der im Labor untersuchten Texturprobekörper aus der BAB A44 enthalten.



Standstreifen 1999



Standstreifen 2004



Rollspur des 1. Fahrstreifens
2004

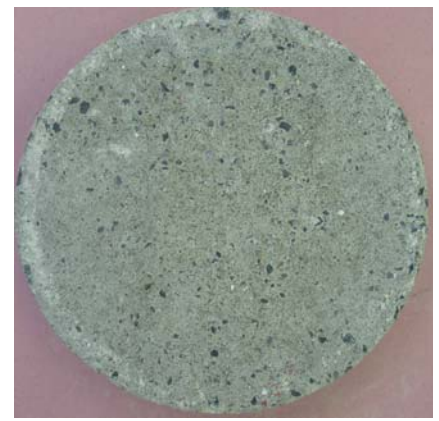
Bild A 20: Oberflächenstrukturen des Besenlängsstrichs des Betons A44_B35 der BAB A44



Standstreifen 1999



Zwischen den Rollspuren des 1. Fahrstreifens 2004



Rollspur des 1. Fahrstreifens 2004

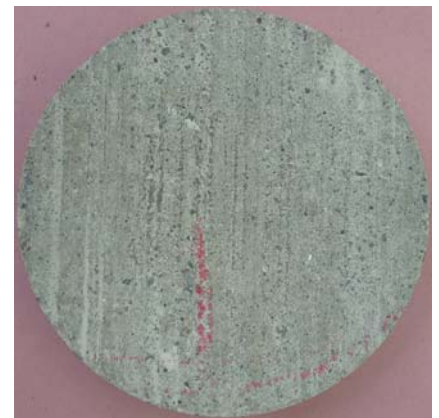
Bild A 21: Oberflächenstrukturen des Jutetuchlängsstrichs des Betons A44_B35 der BAB A44



Standstreifen 1999



Zwischen den Rollspuren des 1. Fahrstreifens 2004



Rollspur des 1. Fahrstreifens 2004

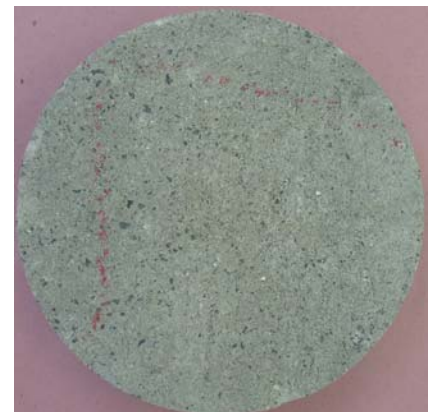
Bild A 22: Oberflächenstruktur des Besenlängsstrichs des Betons A44_B45 der BAB A44



Standstreifen 1999



Standstreifen 2004

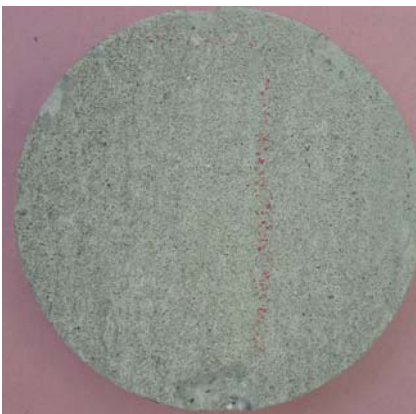


Rollspur des 1. Fahrstreifens
2004

Bild A 23: Oberflächenstruktur des Jutetuchlängsstrichs des Betons A44_B45 der BAB A44



Standstreifen 1999



Standstreifen 2004



Rollspur des 1. Fahrstreifens
2004

Bild A 24: Oberflächenstruktur des Jutetuchlängsstrichs des Betons A44_B65 der BAB A44

Tabelle A 3: Ergebnisse der Bestimmung der primären Kenngrößen der Bohrkernoberflächen (Mittelwerte) an den jeweiligen Entnahmestellen der BAB A44

Entnahmestelle (Plattennummer)	Textur	Entnahmeort/- zeitpunkt	Kennwerte aus der Materialanteilkurve			Mikrokenn- amplitude
			Profil- spitzen	Kern	Profil- riefen	
[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[μ m]
1	2	3	4	5	6	7
A44_B35	Jutetuchlängs- strich	Standstreifen 1999	0,36	0,37	0,42	1,55
		Standstreifen 2004	0,34	0,33	0,31	1,57
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,17	0,34	0,32	1,55
	Besenlängs- strich	Standstreifen 1999	0,43	0,73	0,45	2,35
		zw. den Rollspuren 2004	0,22	1,03	0,70	2,28
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,19	0,70	0,54	1,92
A44_B45	Jutetuchlängs- strich	Standstreifen 1999	0,40	0,61	0,49	2,43
		Standstreifen 2004	0,32	0,37	0,46	2,02
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,20	0,34	0,31	1,58
	Besenlängs- strich	Standstreifen 1999	0,97	0,82	0,44	2,11
		zw. den Rollspuren 2004	0,61	0,87	0,72	2,42
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,31	0,88	0,74	2,56
A44_B65	Jutetuchlängs- strich	Standstreifen 1999	0,25	0,34	0,36	1,76
		zw. den Rollspuren 2004	0,29	0,36	0,47	2,01
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,16	0,22	0,40	1,47
	Besenlängs- strich	zw. den Rollspuren 2004	Oberfläche sehr inhomogen			
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004				

Tabelle A 4: Ergebnisse der Bestimmung der sekundären Kenngrößen der Bohrkernoberflächen (Mittelwerte) an den jeweiligen Entnahmestellen der BAB A44

Entnahmestelle (Plattenummer)	Textur	Entnahmeort/ zeitpunkt	mittlere Ober- flächentexturtiefe	SRT-Einheiten
[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]
1	2	3	4	5
A44_B35	Jutetuchlängs- strich	Standstreifen 1999	0,47	68
		Standstreifen 2004	0,32	64
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,29	59
	Besenlängs- strich	Standstreifen 1999	0,74	68
		zw. den Rollspuren 2004	0,57	63
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,38	59
A44_B45	Jutetuchlängs- strich	Standstreifen 1999	0,58	65
		Standstreifen 2004	0,35	63
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,29	63
	Besenlängs- strich	Standstreifen 1999	0,76	68
		zw. den Rollspuren 2004	0,51	63
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,54	59
A44_B65	Jutetuchlängs- strich	Standstreifen 1999	0,35	68
		zw. den Rollspuren 2004	0,34	62
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004	0,20	59
	Besenlängs- strich	zw. den Rollspuren 2004	Oberfläche sehr inhomogen	
		Rollspur erster Fahrstreifen 2004		

Tabelle A 5: Ergebnisse der Bestimmung der primären Kenngrößen (Mittelwerte) der im Labor hergestellten Texturen

Probekörperbezeichnung	Kennwerte aus der Materialanteilkurve						Mikrokennamplitude	
	Nullmessung			Zyklusende			Nullmessung	Zyklusende
	Profilspitzen	Kern	Profiltriefen	Profilspitzen	Kern	Profiltriefen		
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[μm]	[μm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Jutetuchlängsstrich oN	0,41	0,43	0,35	0,23	0,36	0,28	0,61	1,22
Jutetuchlängsstrich mN	0,67	0,44	0,38	0,20	0,35	0,48	1,27	1,29
Kunstrasenlängsstrich oN	0,73	0,70	0,41	0,58	0,60	0,43	1,04	1,80
Kunstrasenlängsstrich mN	0,98	0,69	0,42	0,54	0,59	0,43	1,34	1,67
Jutetuch + Kamm	0,48	0,58	0,69	0,30	0,58	0,95	0,95	1,74
Besenlängsstrich	1,02	0,78	0,49	0,81	0,70	0,48	1,79	1,80

Tabelle A 6: Ergebnisse der Bestimmung der sekundären Kenngrößen (Mittelwerte) der im Labor hergestellten Texturen

Probekörperbezeichnung	mittlere Oberflächentexturtiefe		SRT-Einheiten	
	Nullmessung	Zyklusende	Nullmessung	Zyklusende
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
Jutetuchlängsstrich oN	0,42	0,45	55	56
Jutetuchlängsstrich mN	0,44	0,40	72	57
Kunstrasenlängsstrich oN	0,86	0,63	63	61
Kunstrasenlängsstrich mN	0,92	0,71	76	62
Jutetuch + Kamm	0,51	0,51	53	59
Besenlängsstrich	1,03	0,83	60	61

ANHANG D: zu Kapitel 5

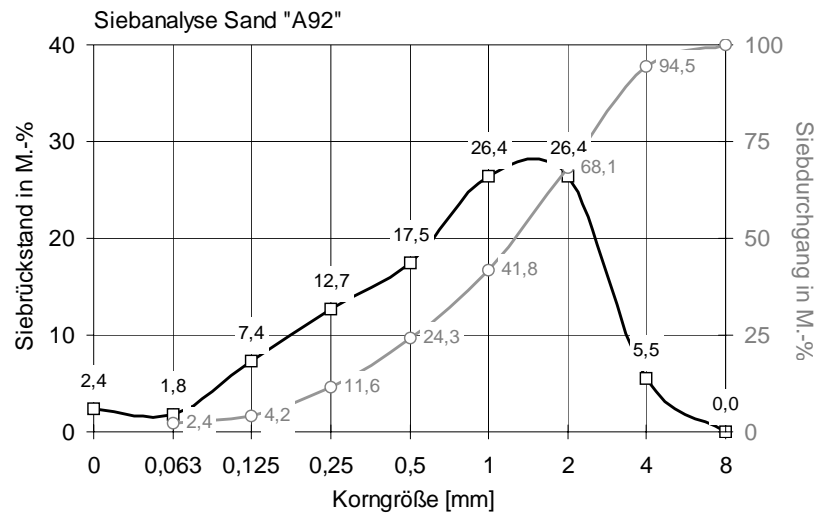
Zusammensetzung des Sandes und des Zements für den Betons der BAB A92

Bild A 25: Zusammensetzungen des Sandes, der bei dem Bau der BAB A92 verwendet wurde

Tabelle A 7: Petrographische Zusammensetzung (Röntgenbeugung) des Sandes BAB A92

Bestandteil	Gehalt
[-]	[Gew.-%]
1	2
Calcit	56,9
Dolomit	29,4
Quarz	13,7

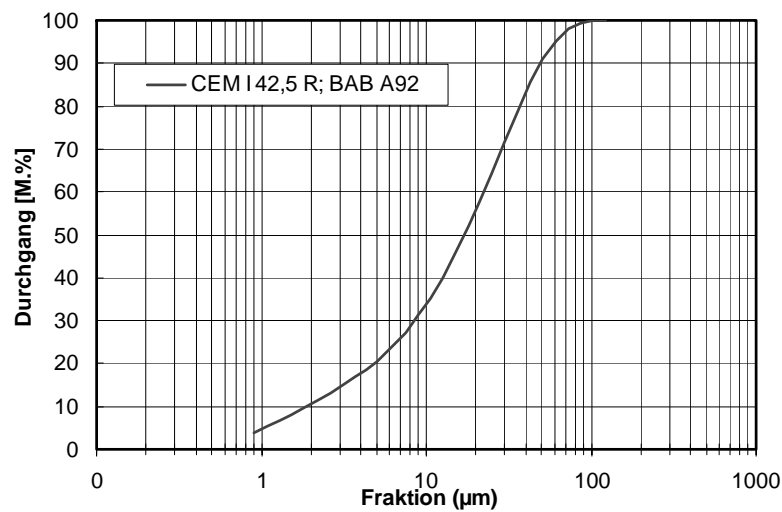


Bild A 26: Zusammensetzungen des Zementes, der bei dem Bau der BAB A92 verwendet wurde

Tabelle A 8: Blaine-Wert und Rohdichte des Zementes (CEM I 42,5 R)

1	2
Blaine-Wert [cm ² /g]	3015 - 3064
Rohdichte [g/cm ³]	3,143

Tabelle A 9: Röntgen-Fluoreszenz Analyse (RFA) des Zementes (CEM I 42,5 R)

1	2	3
Glühverlust	[%]	1,1
SiO ₂	[%]	19,80
TiO ₂	[%]	0,31
Al ₂ O ₃	[%]	5,33
Fe ₂ O ₃	[%]	0,01
MnO	[ppm]	799
MgO	[%]	1,40
CaO	[%]	67,10
Na ₂ O	[%]	0,04
K ₂ O	[%]	0,43
P ₂ O ₅	[%]	0,25
Restliche Bestandteile	[%]	rd. 1,45

Kornzusammensetzung und Zusammensetzung des Betons der BAB A92

Tabelle A 10: Zusammensetzung des Betons der für die Herstellung der BAB A92 verwendet wurde

Bestandteil	-	Werte der Eignungsprüfung
1	2	3
Zementart	[-]	CEM I 42,5 R ¹ (CEM I 32,5 R)
w/z-Wert	[-]	0,40
Zementgehalt	[kg/m ³]	350
Sand 0/4a mm	[kg/m ³]	712
Kies 4/8 mm	[kg/m ³]	211
Edelsplitt 8/16 mm	[kg/m ³]	296
Edelsplitt 16/22 mm	[kg/m ³]	642
Luftgehalt	[Vol.-%]	4,2

¹ Wurde wegen den kalten Umgebungsbedingungen verwendet

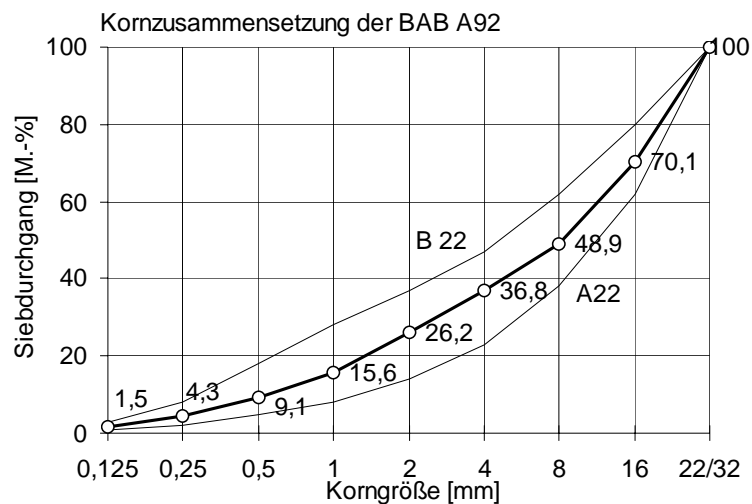


Bild A 27: Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung der BAB A92

Zusammensetzung des Sandes für den Betons der BAB A4 (Kreuz Frechen)

In Bild A 25 sind der Kornanteil und der Siebdurchgang des Sandes dargestellt, der bei der Herstellung des Betons für den Bau der BAB A4 verwendet wurde.

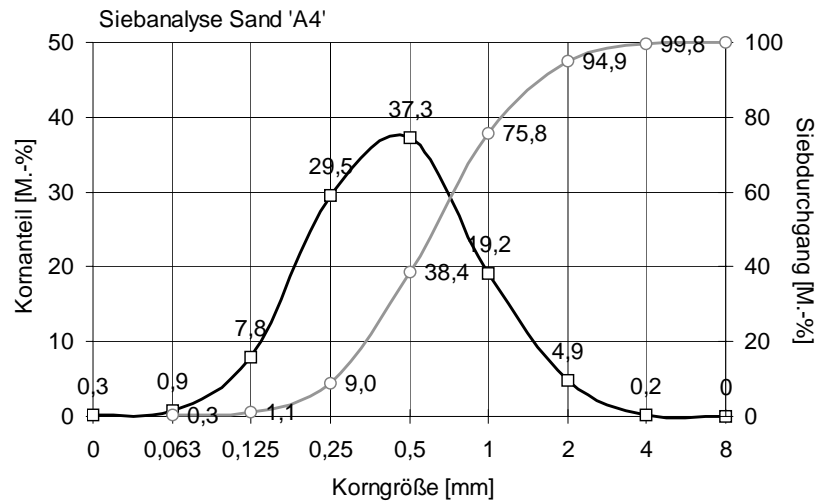


Bild A 28: Zusammensetzungen des Sandes, der bei dem Bau der BAB A4 verwendet wurde

Zusammensetzung des Betons der BAB A4 bei Frechen

Tabelle A 11: Zusammensetzung des Betons der für die Herstellung der BAB A4 verwendet wurde

Bestandteil	-	Werte der Eignungsprüfung
1	2	3
Zementart	[-]	CEM I32,5 R
w/z-Wert	[-]	0,45
Zementgehalt	[kg/m ³]	360
Sand 0/2	[kg/m ³]	561
Kies 2/8	[kg/m ³]	312
Edelsplitt 8/16	[kg/m ³]	441
Edelsplitt 16/22	[kg/m ³]	575
Luftgehalt	[Vol.-%]	4,5

Zusammensetzung des Zements der BAB A4 bei Frechen

Tabelle A 12: Röntgen-Fluoreszenz Analyse (RFA) des Zementes (CEM I 32,5 R)

1	2	3
Glühverlust	[%]	3,1
SiO ₂	[%]	22,20
TiO ₂	[%]	0,25
Al ₂ O ₃	[%]	5,81
Fe ₂ O ₃	[%]	1,89
MgO	[%]	1,05
CaO	[%]	62,30
Na ₂ O	[%]	0,15
K ₂ O	[%]	0,95

Ergebnisse der Untersuchungen zur Betontechnologie auf der BAB A4

Tabelle A 13: Ergebnisse der Bestimmung der Frischbetonkennwerte an den jeweiligen Entnahmestellen (Platten) BAB A4

Entnahmestelle (Plattennummer)	Verdichtungsmaß	LP-Gehalt	Wassergehalt	Frischbetonrohddichte
	[-]	[Vol.-%]	[M.-%]	[kg/m ³]
1	2	3	4	5
1201	1,29	n.b.	n.b.	n.b.
1220	1,31	3,3	n.b.	n.b.
1245	1,35	3,7	n.b.	n.b.
1269	1,33	3,4	n.b.	n.b.
1284	1,32	3,3	7,5	2,43
1303	1,23	3,3	n.b.	n.b.
1329	1,17	4,2	n.b.	n.b.
1347	1,26	n.b.	8,7	n.b.
1527	1,34	3,9	7,5	n.b.
1547	1,29	3,8	n.b.	n.b.
1565	1,24	n.b.	7,81	2,40

n.b.: nicht bestimmt

Tabelle A 14: Ergebnisse der Bestimmung der Kennwerte des frischen Oberflächenmörtels an den jeweiligen Entnahmestellen (Platten) BAB A4

Entnahmestelle (Plattenummer)	Rechnerische Mörtelschichtdicke	Rohdichte des Frishmörtels	Wassergehalt
	[-]	[kg/m ³]	[M.-%]
1	2	3	4
1201	0,86	1,95	n.b.
1220	0,90	1,91	19,9
1245	0,75	1,79	20,4
1269	0,70	1,88	20,8
1284	0,87	1,95	19,5
1303	0,72	1,88	21,1
1329	0,98	1,97	17,7
1347	0,80	1,83	19,5
1527	0,74	1,75	21,1
1547	0,57	1,75	22,6
1565	0,58	1,89	20,3

n.b.: nicht bestimmt

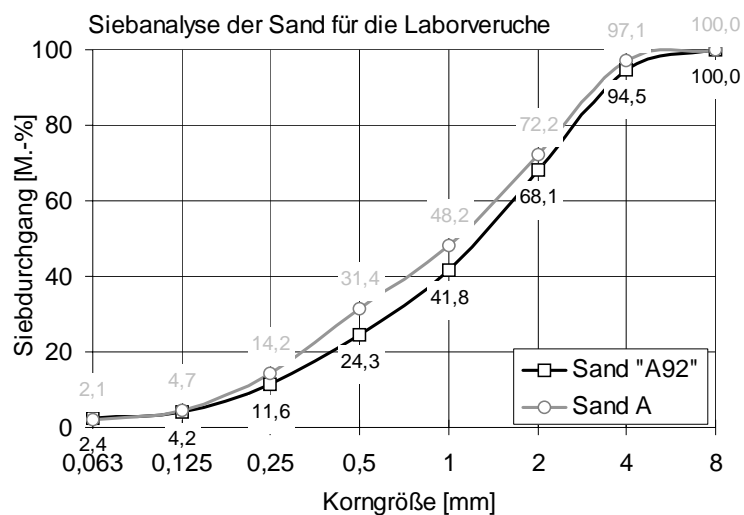
Sieblinien der Betone für die Laborversuche

Bild A 29: Zusammensetzungen der beiden für die Laborversuche verwendeten Sande

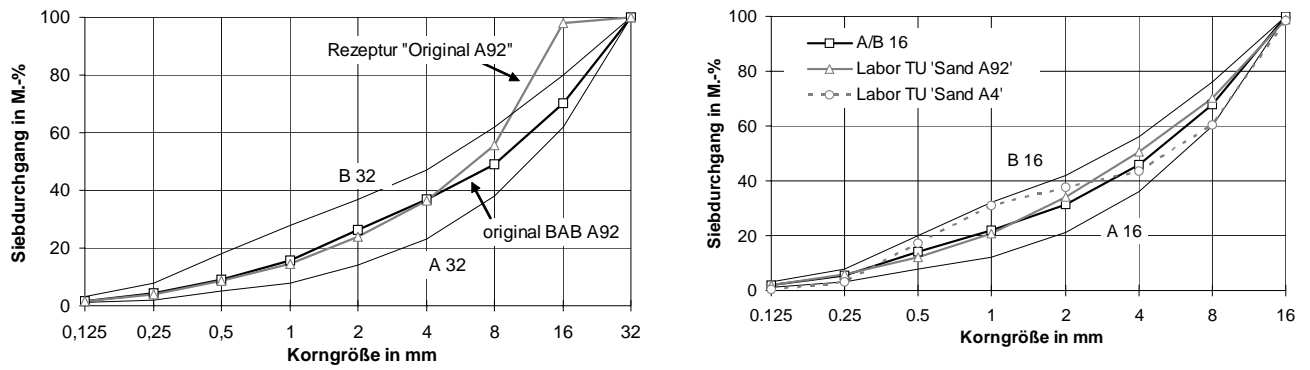


Bild A 30: links: Verwendete Sieblinie der 'Original A92' (grau) und Sieblinie Praxisrezeptur BAB A92 (schwarz)
rechts: Verwendete Sieblinien der Rezeptur 'Labor TU', die sich bei der Verwendung der Sande 'A4' bzw. 'A92' ergaben

Ergebnisse der Untersuchungen zu den Einflüssen auf das Entstehen des Oberflächenmörtels

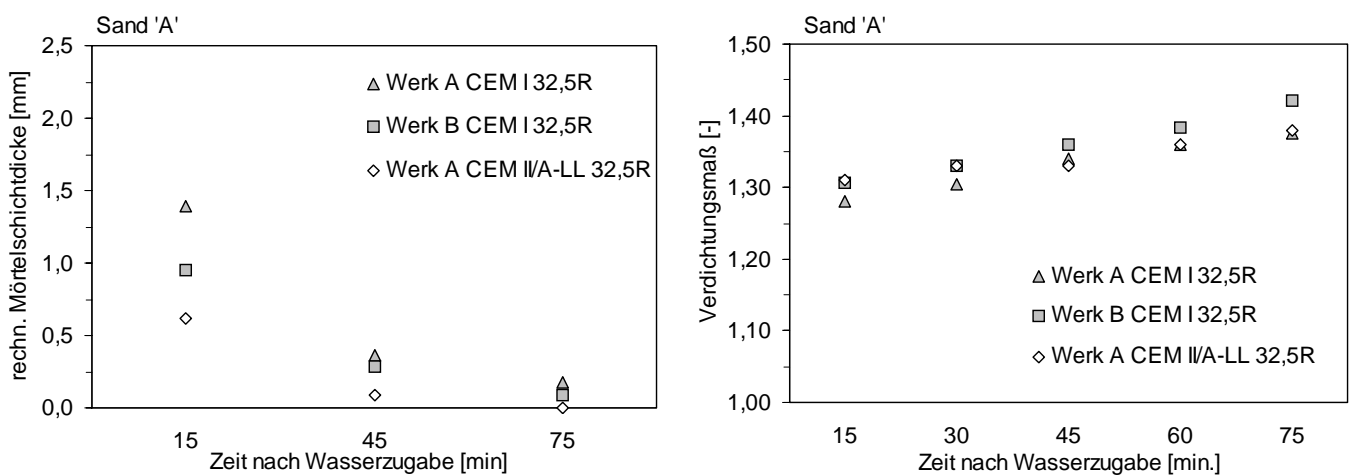


Bild A 31: zeitliche Entwicklung der geprüften Eigenschaften bei Verwendung unterschiedlicher Zemente
links: Entwicklung der rechn. Mörtelschichtdicke
rechts: Verdichtungsmaß des Betons

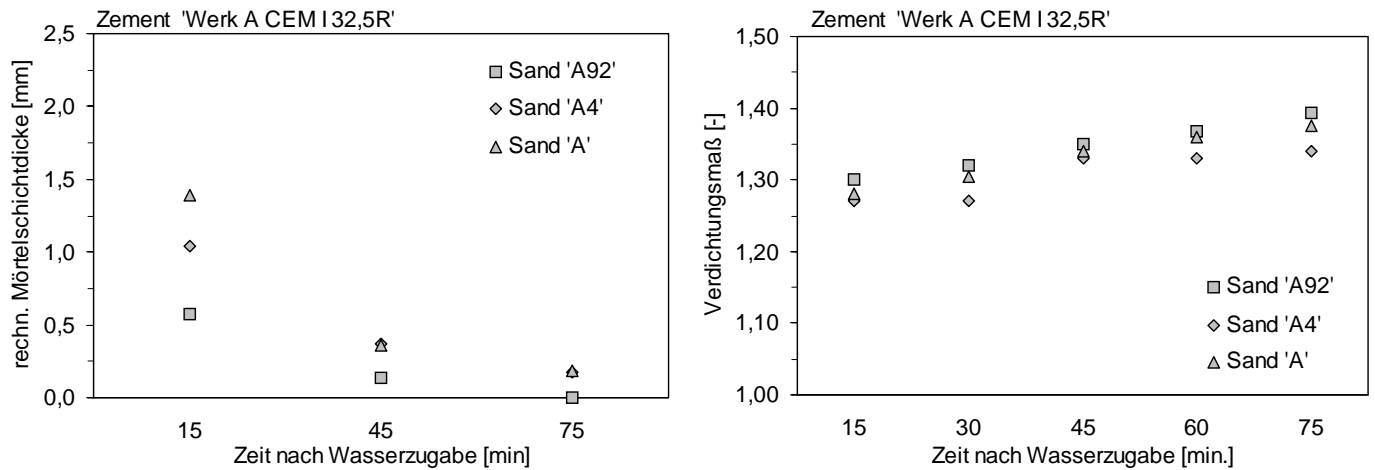


Bild A 32: zeitliche Entwicklung der geprüften Eigenschaften bei Verwendung unterschiedlicher Sande bei Betonen mit dem Zement von Werk 'A'
links: Entwicklung der rechn. Mörtelschichtdicke
rechts: Verdichtungsmaß des Betons

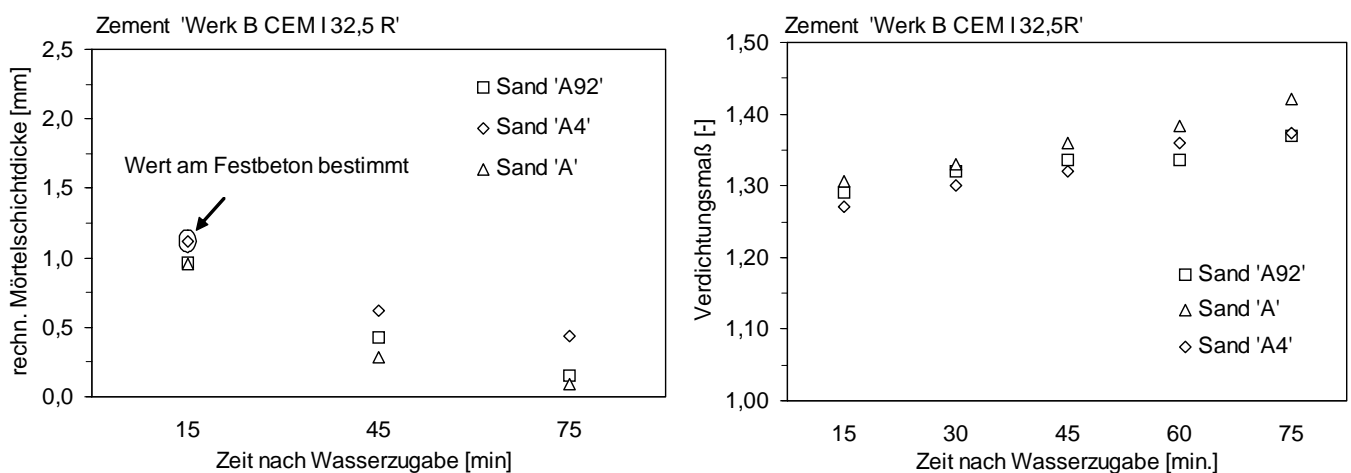


Bild A 33: zeitliche Entwicklung der geprüften Eigenschaften bei Verwendung unterschiedlicher Sande bei Betonen mit dem Zement von Werk 'B'
links: Entwicklung der rechn. Mörtelschichtdicke
rechts: Verdichtungsmaß des Betons

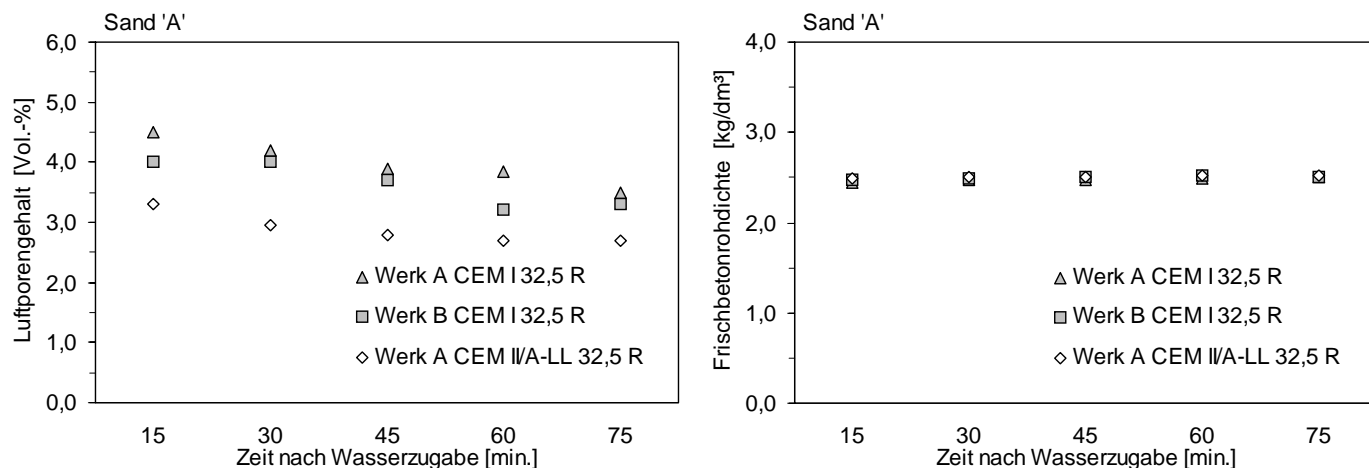


Bild A 34: zeitliche Entwicklung der geprüften Eigenschaften bei Verwendung unterschiedlicher Zemente
 links: Entwicklung des Luftporengehaltes
 rechts: Entwicklung der Frischbetonrohddichte

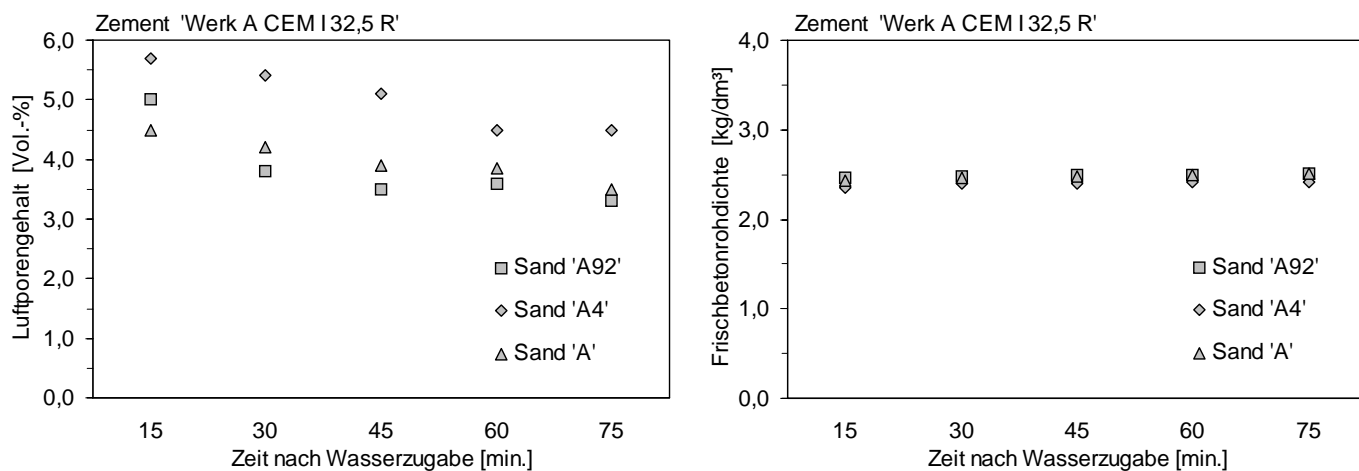


Bild A 35: zeitliche Entwicklung der geprüften Eigenschaften bei Verwendung unterschiedlicher Sande bei Betonen mit dem Zement von Werk 'A'
 links: Entwicklung des Luftporengehaltes
 rechts: Entwicklung der Frischbetonrohddichte

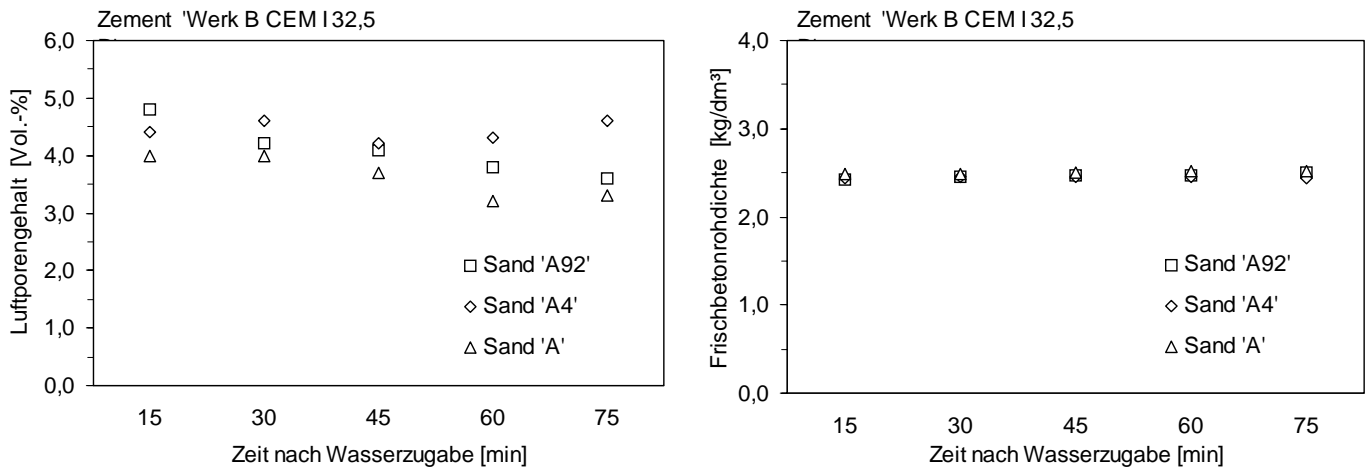


Bild A 36: zeitliche Entwicklung der geprüften Eigenschaften bei Verwendung unterschiedlicher Sande bei Betonen mit dem Zement von Werk 'B'
 links: Entwicklung des Luftporengehaltes
 rechts: Entwicklung der Frischbetonrohddichte

Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss des w/z-Wertes und des Mörtelgehaltes auf die Texturbeständigkeit

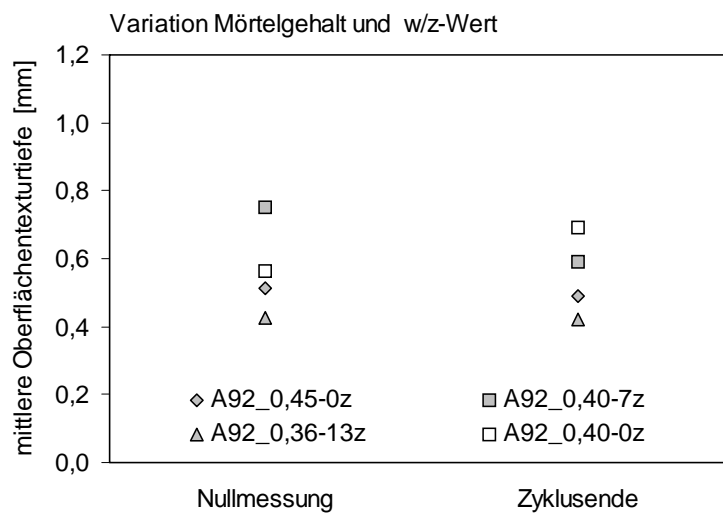


Bild A 37: Mittlere Oberflächentexturtiefen der Texturen vor (Nullmessung) und nach (Zyklusende) dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

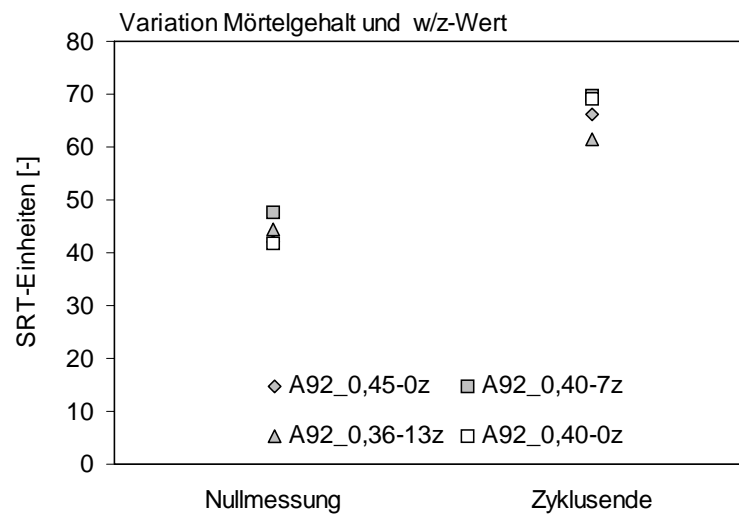


Bild A 38: SRT-Einheiten der Texturen der verschiedenen Betone vor und nach Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Tabelle A 15: Ergebnisse der Bestimmung der primären Kenngrößen der Oberflächen (Mittelwerte)

Probekörper- bezeichnung	Kennwerte aus der Materialanteilkurve						Mikrokennamplitude	
	Nullmessung			Zyklusende			Null- messung	Zyklus- ende
	Profil- spitzen	Kern	Profil- riefen	Profil- spitzen	Kern	Profil- riefen		
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[μ m]	[μ m]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A92_0,45-0z	0,40	0,44	0,30	0,29	0,50	0,41	0,50	1,75
A92_0,40-0z	0,45	0,47	0,33	0,40	0,57	0,64	0,30	1,84
A92_0,40-7z	0,53	0,43	0,28	0,54	0,58	0,62	0,51	2,20
A92_0,36-13z	0,27	0,35	0,20	0,28	0,34	0,28	0,69	1,2

Tabelle A 16: Ergebnisse der Bestimmung der sekundären Kenngrößen der Oberflächen (Mittelwerte)

Probekörper- bezeichnung	mittlere Oberflächentexturtiefe		SRT-Einheiten	
	Nullmessung	Zyklusende	Nullmessung	Zyklusende
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
A92_0,45-0z	0,51	0,49	42	66
A92_0,40-0z	0,57	0,69	42	69
A92_0,40-7z	0,75	0,59	48	70
A92_0,36-13z	0,43	0,42	45	61

Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss des Sandes auf die Texturbeständigkeit

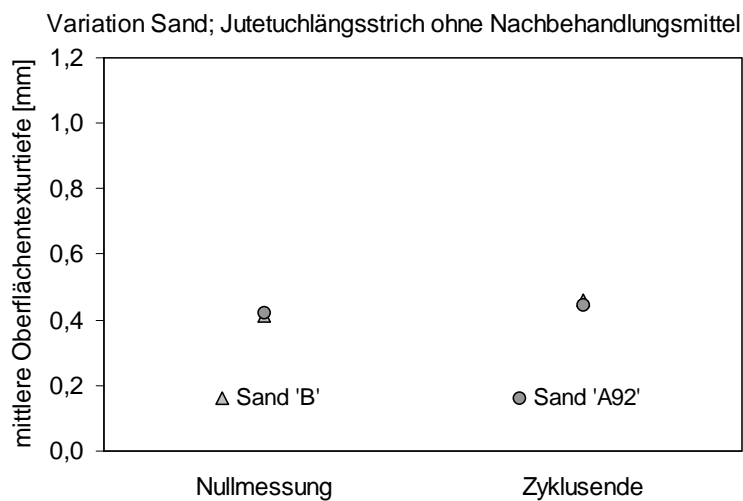


Bild A 39: Mittlere Oberflächentexturtiefen der Texturen vor (Nullmessung) und nach (Zyklusende) dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

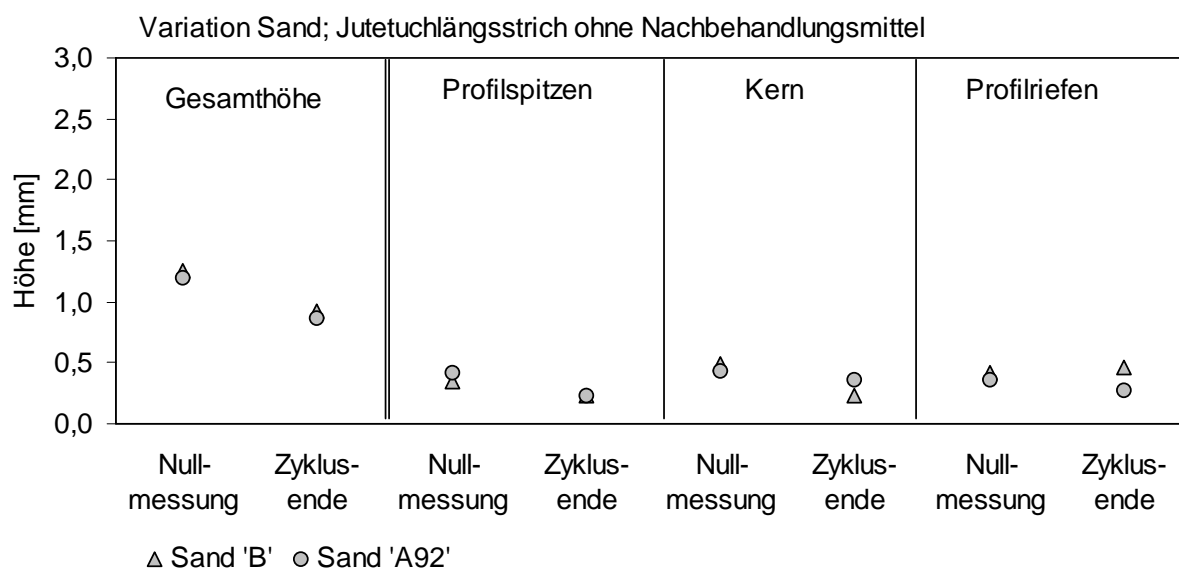


Bild A 40: Aus der Materialanteilkurve bestimmte Kennwerte des Jutetuchlängsstrichs vor (Nullmessung) und nach (Zyklusende) Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Tabelle A 17: Ergebnisse der Bestimmung der primären Kenngrößen der Oberflächen (Mittelwerte)

Probekörperbezeichnung	Kennwerte aus der Materialanteilkurve						Mikrokennamplitude	
	Nullmessung			Zyklusende			Nullmessung	Zyklusende
	Profilspitzen	Kern	Profilriefen	Profilspitzen	Kern	Profilriefen		
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[μ m]	[μ m]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sand 'B' (quarzitisch)	0,34	0,50	0,42	0,23	0,23	0,47	0,97	2,33
Sand 'A92' (kalzitisch)	0,41	0,43	0,35	0,23	0,36	0,28	0,61	1,22

Tabelle A 18: Ergebnisse der Bestimmung der sekundären Kenngrößen der Oberflächen (Mittelwerte)

Probekörperbezeichnung	mittlere Oberflächentexturtiefe		SRT-Einheiten	
	Nullmessung	Zyklusende	Nullmessung	Zyklusende
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
Sand 'B' (quarzitisch)	0,41	0,46	60	54
Sand 'A92' (kalzitisch)	0,42	0,45	55	56

ANHANG E: zu Kapitel 6Ergebnisse zu den Untersuchungen zur Abschätzung und Anpassung des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus

Vor Verkehrsfreigabe;
Standstreifen 22.10.2005



ca. 41 Wochen nach
Verkehrsfreigabe; Rollspur
Laststreifen 02.08.2006

Zwei Wochen nach Verkehrs-
freigabe; Rollspur Laststreifen
09.11.2005



ca. 75 Wochen nach
Verkehrsfreigabe; Rollspur
Laststreifen 04.04.2007

vier Wochen nach Verkehrs-
freigabe; Rollspur Laststreifen
22.11.2005



Bild A 41: Bilder der Probekörperoberflächen, die zu den jeweiligen Entnahmezeitpunkten aus dem Standstreifen sowie aus der rechten Rollspur des 1. Fahrtstreifens der BAB A 4 entnommen wurden

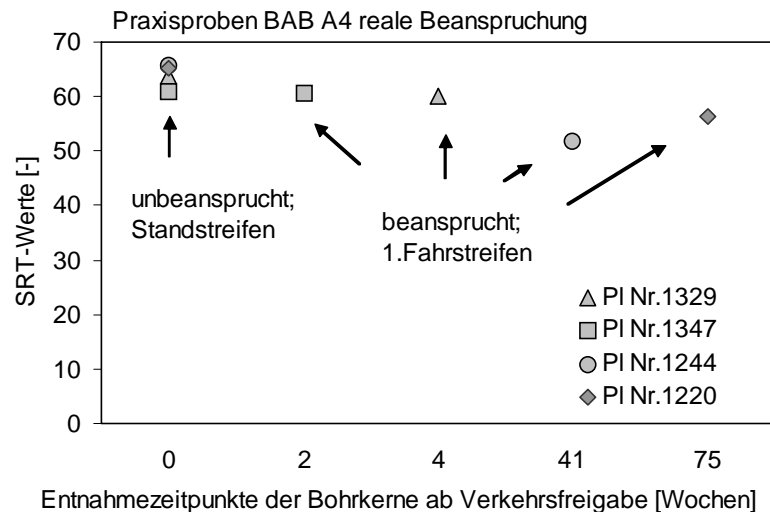


Bild A 42: SRT-Einheiten der einzelnen Oberflächen im Bereich des Standstreifens sowie in der rechten Rollspur des 1. Fahrstreifens zu den jeweiligen Entnahmezeitpunkten

Tabelle A 19: Ergebnisse der Bestimmung der primären Kenngrößen der Bohrkernoberflächen (Mittelwerte) an den jeweiligen Entnahmestellen (Platten) BAB A4 und Entnahmezeitpunkten

Entnahmestelle (Plattennummer)	Entnahmedatum	Entnahmeort	Kennwerte aus der Materialanteilkurve			Mikrokennamplitude
			Profilspitzen	Kern	Profiltriefen	
[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[μm]
1	2	3	4	5	6	7
1220	22.10.2005	Standstreifen	0,38	0,58	0,53	2,07
	04.04.2007	Rollspur erster Fahrstreifen	0,19	0,40	0,64	1,86
1245 bzw. 1244	22.10.2005	Standstreifen	0,27	0,49	0,36	2,13
	02.08.2006	Rollspur erster Fahrstreifen	0,22	0,45	0,69	1,83
1329	22.10.2005	Standstreifen	0,21	0,41	0,48	2,23
	22.11.2005	Rollspur erster Fahrstreifen	0,24	0,56	0,80	2,56
1347	22.10.2005	Standstreifen	0,22	0,37	0,38	2,21
	09.11.2005	Rollspur erster Fahrstreifen	0,21	0,50	0,61	2,37

Tabelle A 20: Ergebnisse der Bestimmung der sekundären Kenngrößen der Bohrkernoberflächen (Mittelwerte) an den jeweiligen Entnahmestellen (Platten) BAB A4 und Entnahmezeitpunkten

Entnahmestelle (Plattenummer)	Entnahmedatum	Entnahmeort	mittlere Oberflächentexturtiefe	SRT-Einheiten
[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]
1	2	3	4	5
1220	22.10.2005	Standstreifen	0,64	65
	04.04.2007	Rollspur erster Fahrstreifen	0,32	56
1245 bzw. 1244	22.10.2005	Standstreifen	0,53	66
	02.08.2006	Rollspur erster Fahrstreifen	0,37	52
1329	22.10.2005	Standstreifen	0,45	64
	22.11.2005	Rollspur erster Fahrstreifen	0,47	60
1347	22.10.2005	Standstreifen	0,48	61
	09.11.2005	Rollspur erster Fahrstreifen	0,45	61

Bild A 43 und Bild A 44 zeigen den Zustand der Bohrkernoberflächen vor Durchlaufen des Laborbeanspruchungszyklus (Nullmessung) sowie zum jeweiligen Zyklusende (PA 120 bzw. PA 180).

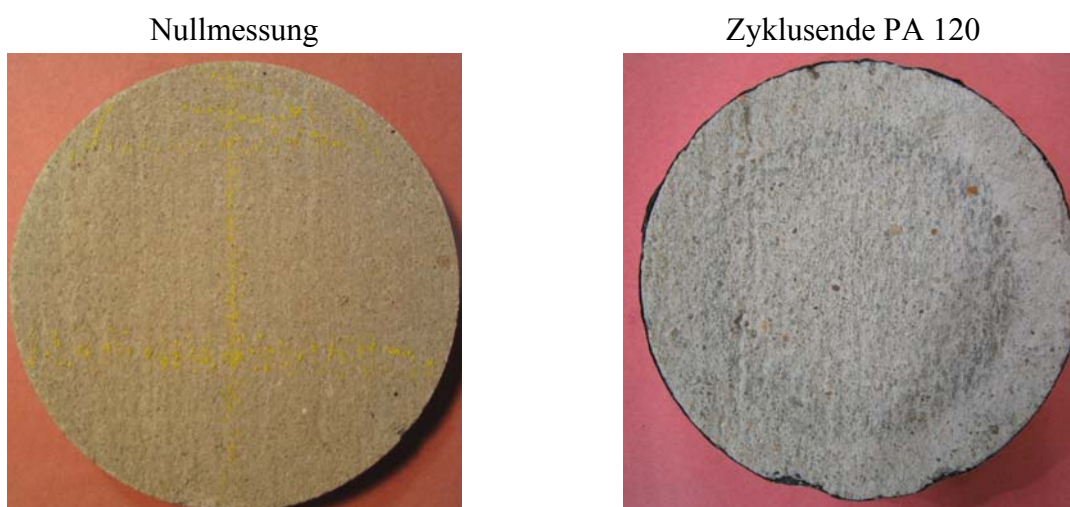


Bild A 43: Bilder einer Bohrkernoberfläche (beispielhaft) vor Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (Nullmessung) und am Zyklusende (hier: PA 120)

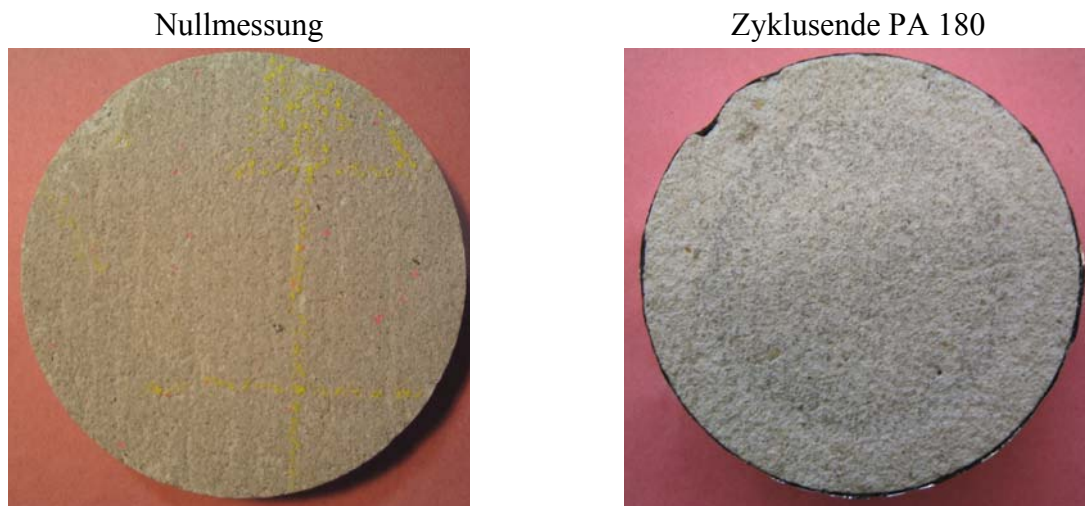


Bild A 44: Bilder einer Bohrkernoberfläche (beispielhaft) vor Durchlaufen des kombinierten Laborbeanspruchungszyklus (Nullmessung) und am Zyklusende (hier: PA 180)

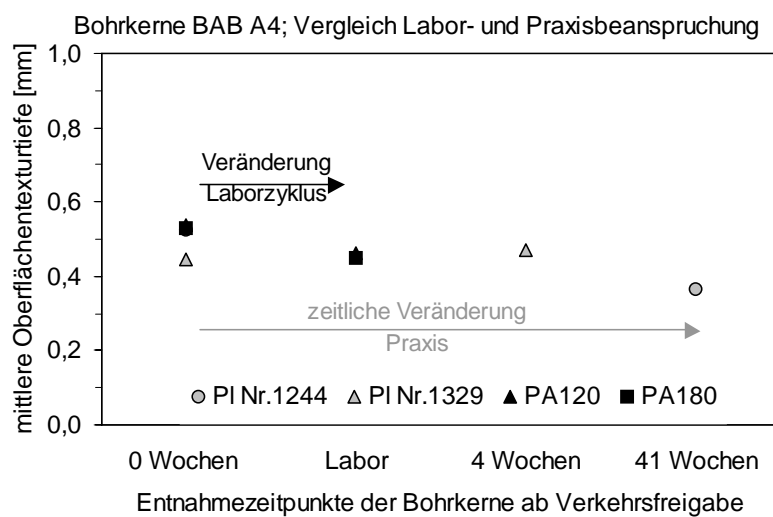


Bild A 45: Mittlere Oberflächentexturtiefen der untersuchten Bohrkernoberflächen aus der BAB A4, die durch reale Einwirkung sowie durch die beiden kombinierten Laborbeanspruchungszyklen beansprucht wurden

Tabelle A 21: Ergebnisse der Bestimmung der primären Kenngrößen der Oberflächen (Mittelwerte)

Probekörper- bezeichnung	Kennwerte aus der Materialanteilkurve						Mikro kennamplitude	
	Nullmessung			Zyklusende			Null- messung	Zyklus- ende
	Profil- spitzen	Kern	Profil- riefen	Profil- spitzen	Kern	Profil- riefen		
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[μ m]	[μ m]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
PA120	0,30	0,50	0,43	0,33	0,49	0,48	2,19	2,35
PA180	0,29	0,48	0,50	0,24	0,43	0,43	2,19	2,41

Tabelle A 22: Ergebnisse der Bestimmung der sekundären Kenngrößen der Oberflächen (Mittelwerte)

Probekörper- bezeichnung	mittlere Oberflächentexturtiefe		SRT-Einheiten	
	Nullmessung	Zyklusende	Nullmessung	Zyklusende
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
1	2	3	4	5
PA120	0,54	0,46	65	55
PA180	0,53	0,45	63	53