

# **Dauerhafte Betondecken**

**Optimierung der  
Fahrbahnoberfläche  
durch Texturierung mittels  
Grinding-Verfahren**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 159**

**bast**

# Dauerhafte Betondecken

## Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

von

Stephan Villaret  
Ralf Alte-Teigeler  
Beate Altreuther  
Thomas Beckenbauer  
Bernd Frohböse  
Christoph Gehlen  
Markus Oeser  
Jens Skarabis  
Ralf Tulke  
Dawei Wang

Villaret Ingenieurgesellschaft mbH  
Hoppegarten

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 159**

**bast**

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

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

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

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

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

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

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 08.0220:**  
Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

**Fachbetreuung**  
Ulrike Stöckert

**Referat**  
Betonbauweisen

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

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-633-7

Bergisch Gladbach, Oktober 2021

## Kurzfassung – Abstract

### **Dauerhafte Betondecken - Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren**

Ziel des Projekts war die Entwicklung einer lärmtechnisch optimalen Grindingtextur auf Grundlage existierender theoretischer Berechnungsmodelle und dem Einsatz optimierter Oberbetone.

Unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus den [FE 08.0210/2010/ORB], [FE 08.0211/2011/OGB], [FE 08.0219/2012/IGB], den zusätzlich zu Testzwecken auf der A 92, der A 93 und der A 13 hergestellten Grinding- und Groovingtexturen, den im Labor für das Grinding entwickelten optimierten Betonrezepturen und den Texturen auf der ersten Erprobungsstrecke auf der A 12 wurden in Computersimulationen mit dem Rechenmodell SPERoN® Grindingtexturen mit optimalen lärmindernden Eigenschaften entwickelt.

Nach kritischer Abwägung der theoretischen Berechnungen hinsichtlich der Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und die zu erzielende Griffigkeit der Texturen wurden für eine zweite Erprobungsstrecke auf der A 5 drei verschiedene Grindingvarianten ausgewählt und auf drei verschiedenen Oberbetonen hergestellt.

In Zusammenarbeit mit der BAST wurden auf allen in die Untersuchungen einbezogenen Grindingabschnitten umfangreiche Untersuchungen zur Bestimmung der

- schalltechnischen Eigenschaften,
- anforderungsgerechten Griffigkeit,
- anforderungsgerechten Ebenheit,
- Dauerhaftigkeit der erzeugten Textur,
- Dauerhaftigkeit hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften des Oberbetons

durchgeführt.

Aus den Ergebnissen aller untersuchten Streckenabschnitte lassen sich folgende Erkenntnisse ziehen:

Eine signifikante Lärminderung durch das Grinding ist bei Einhaltung der vorab definierten Grindingparameter möglich.

Der Einfluss der Oberbetone auf die Lärmentwicklung ist als eher gering einzustufen.

Aus akustischer Sicht verhalten sich die Abschnitte der Erprobungsstrecken mit kombinierten Grinding-Grooving-Texturen neutral.

Der Grindingvorgang sollte nicht zu früh nach der Betonherstellung erfolgen, damit nicht durch die geringe Anfangsfestigkeit des Oberbetons vermehrt Kornausbrüche verursacht werden.

Ein langfristiges Monitoring zur Entwicklung des Lärm- und Griffigkeitsverhaltens und zur Dauerhaftigkeit der erzeugten Texturen ist notwendig.

### **Durable concrete surfaces - optimizing the road surface by texturing with the grinding process**

The aim of the project was to develop a noise optimum technical grinding texture based on existing theoretical calculation models and the use of optimized upper concretes.

Taking into account the conclusions of the [FE 08.0210/2010/ORB], [FE 08.0211/2011/OGB], [FE 08.0219/2012/IGB], the produced addition to testing on the A 92, the A 93 and the A 13 grinding and grooving textures, the optimized concrete recipes developed in the laboratory for grinding surfaces and the textures on the first test sections on the A 12 have been developed grinding textures with optimum noise-reducing properties by computer simulations using the computational model SPERoN®.

After carefully evaluation the theoretical calculations concerning the demands on the durability and the required grip of the textures, three different grinding variations were selected and prepared in three different upper concrete for a second test section on the A 5.

In cooperation with the Federal Highway Research Institute extensive studies to determine were at all involved in the investigation of grinding test sections

- Acoustic properties,
  - Qualifying grip,
  - Qualifying evenness,
  - Durability of texture produced,
  - Durability in terms of mechanical properties of the upper concrete
- performed.

From the results of all investigated sections the following conclusions can be derive:

A significant noise reduction by grinding is possible in compliance with the predefined grinding parameter.

The influence of the upper concrete on the noise level is classified as rather low.

From an acoustic point of view, the sections of the test tracks with combined grinding and grooving textures behave neutrally.

The grinding execution should not be done too soon after the production of concrete, thus not increasing grain outbreaks caused by the low initial strength of the upper concrete.

A long-term monitoring for the development of noise and grip behavior and the durability of the textures generated is necessary.

## Summary

### Durable concrete surfaces - optimizing the road surface by texturing with the grinding process

#### 1 Task

The aim of the project was to develop diamond ground surfaces optimized for long-term noise reduction based on existing theoretical calculation models.

The following development steps were provided:

- Development of a texture manufacturing process to improve the use and the properties of the concrete surface,
- Development of optimal and economical concrete compositions for the manufacturing process, taking into account the properties relating to the structural substance,
- testing the procedure in practice with determination of:
  - the acoustic properties,
  - the required skid resistance,
  - the required flatness,
  - the durability of the texture produced,
  - the durability of the mechanical properties of the upper concrete.

The intention is to produce diamond ground textures with good reproducibility of the noise reducing properties and skid resistance, with a level reduction of - 4 dB against the reference surface according to RLS-90.

The following research areas have been identified:

#### Texture development

In computer simulations, it was determined which geometry grinding textures with optimal noise reducing properties should have. In the case of grinding surfaces, a pronounced anisotropy of the texture exists due to the longitudinal grinding process. For the simulations, a version of the computer simulation model SPERoN® adapted to this particular property of grind sections was used.

Different grinding textures were tested by means of acoustic measurements of the surface properties (3D texture and texture-induced air flow resistance) and the tire-road noise on several test sections with controlled pass-by measurements.

The results were used to calibrate the SPERoN® calculation model.

Based on the simulations, in the laboratory optimized concretes were developed.

#### Development and application of measurement and control technology

The development and the tests in the field of measuring and control systems on the grinding machine for the removal of unflattens on the one hand and for the reduction of overlapping areas on the other hand were provided.

#### Test section

The customer provides a two-lane test section. It was planned to install four optimized concretes (approx. 300 m per concrete composition) on a length of approx. 1.2 km in length. Three different diamond ground textures are applied to each of the 300 m long sections.

For the invitation of tenders, the contractor formulated the specific requirements and a detailed schedule for tests on the test section and provided the contractor with the necessary information.

## 2 Type and scope of investigations

On three motorways in Brandenburg and Bavaria, a number of test routes were set up, on which different diamond ground textures were applied as measures to improve the skid resistance (Table 1).

In addition to the minimum requirements for the restoration of the skid resistance, requirements have been formulated in the construction specifications in order to ensure a high quality of the produced diamond ground textures in terms of flatness, skid resistance and the expected noise reduction. The requirements were constantly adapted in the course of the research project according to the new findings.

BAB	from km	to km	Textur 1		Textur 2		Depth of cut [mm]
			Segment-width	Segment-distance	Segment-width	Segment-distance	
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
A 13, RF Dresden	7,800	16,000	2,8	1,8			
	7,800	8,000	2,8	1,8	2,8	10,0	3,0
	10,450	10,650	2,8	1,8	2,8	15,0	3,0
	14,700	14,900	2,8	1,8	2,8	20,0	3,0
A 13, RF Berlin	16,000	7,800	3,2	2,2			
	16,000	15,800	3,2	2,2	3,2	20,0	3,0
	14,700	14,500	3,2	2,2	3,2	20,0	4,0
	13,025	12,825	3,2	2,2	3,2	25,0	3,0
	10,900	10,700	3,2	2,2	3,2	25,0	4,0
A 92, RF München	17,000	16,500	2,8	2,0	2,8	16,4	3,0
A 93, RF Regensburg	127,400	129,550	2,8	1,6			
	129,350	129,550	2,8	1,6	2,8	13,0	3,0
A 93, RF Hof	129,550	127,400	2,8	1,6			
	129,550	129,350	2,8	1,6	2,8	13,0	3,0

**Table 1:** Texture variants for the calibration of the calculation model SPERoN®

The investigations on the test sections, in each case in the first lane, had the following contents:

- The coarse texture measurement with the ELA-textur device provided the MPD (Mean Profile Depth) and the ETD (Estimated Texture Depth) according to [DIN EN ISO 13473-1].
- The non-contact and non-destructive determination of the surface roughness (macrotecture) with laser profilometer was carried out according to [DIN EN ISO 13473-1].
- The 3D coordinates of the object surface were determined with 3D text mappings.
- Determination of the texture-induced air flow resistance with a measuring system specially developed for in-situ measurements in [LEISTRA]. The measurement method is based on the test rig method for test specimens of [DIN EN 29053].
- The skid resistance measurements according to [TP Griff-StB (SKM)] were carried out as double measurements analogous to building contract measurements.
- The results of BAST drill core tests have been kindly provided to the contractor. The splitting tensile strength was tested according to the specifications of the [AL Sp-Beton].
- The controlled pass-by (CPB) was carried out according to the Statistical Pass-By-Method (SPB) according to [SPB1] or [SPB2].
- The determination of tire-road noise using the Close-Proximity Method (CPX) was carried out according to [ISO / CD 3rd 11819-2].

The development of noise optimized diamond ground textures was carried out using computer simulations using the SPERoN® calculation model.

The adaptation and recalibration of the computer simulation model for anisotropic textures required the following substeps:

- Analysis of controlled pass-by measurements and near-field measurements on the test sections
- SPERoN® calculations with the measured surface profiles. For this purpose, input variables were to be defined and the texture profiles to be included were selected.

The adaptation of the SPERoN® model for anisotropic textures had to be carried out in such a way that the influence of the aerodynamic components were reduced, whereas the weighting of the mechanical parts in the rolling noise generation is intensified.

- During the calibration and verification of the modified calculation model, consideration was given to the cross-joints.
- The mathematical modeling of different noise reducing surface textures was carried out using the idealized textures artificially generated in [FE 08.0211 / 2011 / OGB].
- Variation of models for simulation in practice of deviations from the model texture.

The laboratory tests for the development of concretes suitable for the purpose-oriented texturing by means of diamond grinding were divided into the following test parts:

- Production of standard concrete and the development of optimized concretes with regard to economy and texture durability. The water cement ratio, the maximum grain size and the grading curve of the coarse aggregate were varied. For the characterization of the concretes, their compressive and splitting tensile strengths were determined. The freeze-thaw-de-icing salt resistance was also determined with the CDF test on the optimized concretes.
- The concrete was textured with a diamond grinding machine developed for laboratory tests with practical and noise optimized textures. The diamond ground textures were examined with regard to their depth of textures and their skid resistance (SRT pendulum). To evaluate the noise reducing properties, texture measurements were carried out with a laser profilometer and the texture-induced air flow resistance was determined. Based on these results, the SPERoN® simulation program was used to calculate the expected noise emission of the surfaces.
- Examination of the durability of selected concretes or textures. For this purpose, the freeze-thaw-de-icing salt resistance of the textures was

determined in accordance with the CDF test according to [DIN CEN / TS 12390-9], and the action of acid rain was simulated by an acid attack (pH 4.5). Furthermore, surfaces were mechanically stressed with the Aachen Ravelling Tester (ARTE). Following the mechanical stress with the ARTE test facility, the surface acoustic properties of the textures, which are relevant for acoustics and skid resistance, were recorded and evaluated.

- In addition, it was examined which age of the concrete or which concrete strength must be present at the time of the diamond grinding in order to be able to cut the desired texture geometry reliably into the concrete surface. The influence of the curing on the properties of the binding texture was also investigated.

With 3-D-FEM preliminary examinations and dimensioning calculations for the practical application, it should be calculated which influence conservation cycles, which possibly lead to a further reduction of the cover thickness, have on the structural substance of the total concrete surface.

For the execution of the diamond grinding in practice criteria for the selection and equipment of the machine and cutting technique to be used for the diamond grinding process had to be defined.

The development of measuring and control systems on the diamond grinding machine for the removal of unevenness took place in several steps:

- Creation of a simulation model of the diamond grinding machine for determining the "actual" performance of the diamond grinding machine without flatness control or regulation and for the simulation of a controlled diamond grinding process.
- Conceptual design of the measuring method for application to diamond grinding machines, selection and procurement of suitable components as well as application of the measuring technology to the diamond grinding tool.

During the development of measuring and control systems to avoid overlapping areas during diamond grinding, both mechanical and optical systems were conceivable. Both systems were analysed and evaluated with regard to the mode of operation and the possible applications.

With the Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg an agreement could be reached in coordination with the BAST that within a planned renewal measure on the A 12 a section of km 34,100 to km 35,000 should be produced as a first test section in

a special concrete construction. The tender documents for the test section had to be adapted accordingly.

Figure 1 shows the sections of different upper concretes and textures, and Figure 2 shows the texture geometries.

Section 1 km 34,100 - 34,400 Button concrete GK 22 mm as upper concrete			Section 2 km 34,400 - 34,700 Wash concrete with failure granulation			Section 3 km 34,700 - 35,000 Wash concrete with a continuous sieve line		
100 m	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m
Texture 1	Texture 2	Texture 3	Texture 3	Texture 2	Texture 1	Texture 1	Texture 2	Texture 3

**Figure 1:** Upper concretes and textures of the test track A 12

Texture	Grinding			Grooving		
	Segment width	Segment distance	Dept of cut	Segment width	Segment distance	Dept of cut
Texture 1	2,4 mm	1,8 mm	Cut the	2,8 mm	22,8 mm	3,0 mm
Texture 2	2,4 mm	1,8 mm	gross grain	-	-	-
Texture 3	2,4 mm	1,5 mm	aggregate	2,8 mm	21,0 mm	3,0 mm

**Figure 2:** Texture geometries of the test section A 12

The investigations for the description of the diamond ground textures as well as proof of the homogeneity on the test section of the A 12 included:

- Determination of fresh concrete properties such as temperature, consistency and air pore content,
- Testing the splitting tensile strength on drill cores according to the specifications of [AL Sp-Beton],
- The coarse texture measurement with measuring device ELAtextr according to [DIN EN ISO 13473-1],
- 3D texture measurement to determine the 3D coordinates of the object surface,
- Determination of the texture-induced air flow resistance in accordance with [DIN EN 29053],
- controlled pass-by measurement (CPB) according to the statistical pass-by method (SPB) according to [SPB1] and [SPB2],
- Determination of tire-road noise by the near-field measurement method (CPX) according to [ISO / CD 3rd 11819-2],
- Dynamic skid resistance measurements using the LFC measurement method ViaFriction
- Skid resistance measurements according to [TP Griff-StB (SKM)] from control tests,
- Determination of the freeze-thaw-de-icing resistance of the textures using the CDF test according to [DIN CEN / TS 12390-9],
- wear and / or polishing resistance with the Aachen Ravelling Tester (ARTE)

With the Karlsruhe Government Bureau in Baden-Württemberg an agreement could be reached in coordination with BASt that within the planned renewal measures on the A 5 a section of km 609,400 to km 610,280 is to be produced as a second test track with various concrete constructions and diamond ground textures.

Figure 3 shows the upper concretes and textures and Figure 4 shows the texture geometries of the test section on the A 5.

Section V km 609,400 - 609,500 Round grain GK 32 mm upper and bottom concr.		Section VI km 609,500 - 609,760 Round grain GK 32 mm upper and bottom concrete			Section VII km 609,760 - 610,020 Upper concrete GK 22 mm to 35% broken			Section VIII km 610,020 - 610,280 Round grain GK 16 mm as upper concrete		
100 m	85 m	85 m	90 m	85 m	85 m	90 m	85 m	85 m	90 m	
Texture 1	Texture 1	Texture 2	Texture 3	Texture 3	Texture 2	Texture 1	Texture 1	Texture 2	Texture 3	

**Figure 3:** Upper concretes and textures of the test section A 5

Texture	Grinding			Grooving		
	Segment width	Segment distance	Dept of cut	Segment width	Segment distance	Dept of cut
Texture 1	2,0 mm	1,0 mm	Cut the	-	-	-
Texture 2	2,0 mm	1,0 mm	gross grain	2,4 mm	21,0 mm	3,0 mm
Texture 3	2,4 mm	1,4 mm	aggregate	-	-	-

**Figure 4:** Texture geometry of the test section A 5

The investigations for the description of the diamond ground texture as well as the proof of the homogeneity on the test section of the A 5 included:

Section	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
MPD mean value [mm]	0,74	0,51	0,80	0,90	0,40	0,81	0,85	0,38	0,83
Skid resistance SKM [-]	0,6	0,6	0,61	0,56	0,55	0,58	0,57	0,57	0,59
Skid resistance ViaFriction [-]	0,61	0,49	0,58	0,58	0,52	0,61	0,65	0,54	0,64
Air flow resistance [Pa s / m]	513	9245	510	455	23944	526	426	23849	556
CPX mean value [dB (A)]	98,1	98,6	98,8	98,1	98,1	98,5	98,0	97,8	97,6
L <sub>AF,max</sub> - 120 km/h [dB (A)]	83,8	83,5	83,9	82,9	82,2	82,6	82,5	83,1	82,4

**Table 2:** Test results on the test section A 12

The red border and writing in Table 2 shows the measurement results of section 2.2 of the test section on the A 12 on which the comparatively high noise reduction values were achieved. It is a pure diamond ground texture.

The comparatively lowest pass-by level of 82.2 dB (A) in section 2.2 means a noise reduction value of only approx. -3 dB (A). The reason for this could be that the diamond grinding carried out after approx. 10 days after concreting was too early in connection with the strength development of the concrete. This resulted in partial tearing of the upper rocking grains

- Determination of fresh concrete properties such as temperature, consistency and air pore content,
- Testing the splitting tensile strength on drill cores according to the specifications of [AL Sp-Beton],
- The coarse texture measurement with measuring device ELAtextur according to [DIN EN ISO 13473-1],
- Skid resistance measurements according to [TP Griff-StB (SKM)] from control tests,
- Determination of tire-road noise by the near-field measurement method (CPX) according to [ISO / CD 3rd 11819-2].

Further investigations were not carried out within this project.

### 3 Examination results

In the following tables, the test results are compiled on the test sections of the A 12 (Table 2) and A 5 (Table 3).

Since originally only one test section was planned and calculated, the measurements and evaluations required after the manufacturing of the diamond ground textures on the A 5 could only be carried out partially within the working of this topic.

by the diamond grinding. This aspect has been taken into account when carrying out the diamond ground on the second test section on the A 5.

From the theoretical calculations with SPERoN®, taking into account the results of the skid resistance and noise measurements on the first test section A 12, finer textures were generally selected for the second test section on the A 5. Table 3 gives an overview of the measurements taken.

Test field	V.1	VI.1	VI.2	VI.3	VII.3	VII.2	VII.1	VIII.1	VIII.2	VIII.3
MPD mean value [mm]	0,27	0,28	0,80	0,39	0,41	0,75	0,27	<b>0,28</b>	0,72	0,42
Skid resistance SKM [-]	0,59	0,59	0,61	0,62	0,62	0,61	0,60	<b>0,59</b>	0,59	0,59
CPX mean value [dB (A)] 12/2015	95,9	95,7	95,8	96,0	96,3	95,9	95,6	<b>95,6</b>	95,8	96,2
CPX mean value [dB (A)] 05/2016					95,5	95,0	95,1	<b>94,9</b>	94,8	95,1

**Table 3:** Test results on the test section A 5

Again, the section with the comparatively highest noise reduction values was labeled and surrounded in red. This is also a pure diamond ground texture.

The findings regarding the strength development of the concrete from the test section of the A 12 were taken into account on the A 5 and the diamond grinding took place about 5 weeks after the preparation of the concrete surface. The higher strength of the concrete at this time prevented the tearing of the gross coarse aggregate damage during diamond grinding to a considerable extent.

A controlled or statistical pass-by measurement could not yet be realized due to the winter season. However, due to the CPX measurement results it is probable that a noise reduction of about -5 dB (A) can be achieved in the statistical pass-by measurement. An investigation after the final development of the joints could no longer be carried out within the scope of this FE project.

The results of the study were not able to be generated and evaluated within this research work.

## 4 Conclusions and recommendations

The process developed in this research project is capable of significantly reducing unevenness up to a wavelength of 10 m by means of a newly developed longitudinal scanning system. Thereby two advantages are achieved:

This results in a positive effect on driving comfort by significantly reducing the acceleration values for the load, the vehicle and the driver.

Likewise, a positive effect with regard to the durability of the concrete pavement is created by the significant reduction of the impact factor in the heavy traffic load, which in turn leads to a reduction in the effects of traffic load.

The diamond grinding process has been optimized in this research project. The focus was on acoustic optimization, while the positive effects of the flatness and skid resistance enhancements were not neglected.

On the basis of the theoretical and laboratory tests, practical trials were carried out on the A 13 in which various grindings with and without additional grooving were tested. As a result, in addition to improvements in the flatness and skid resistance, significant noise reductions were also achieved. The acoustic result with the comparatively highest noise reduction value was obtained in a section with combined grinding-grooving texture. During the controlled pass-by measurement, a noise reduction value of approximately -4 dB (A) was achieved with 80.9 dB (A). This noise reduction value is based on the reference surface for SPB measurements (non-corrugated cast asphalt with an emission level of 85.2 dB (A)).

The main objective was the application of the diamond grinding method for new concrete lots to be built, in order to define a further standard texture for noise reduced concrete surfaces in the rules.

The first test section within this research area was the newly built section of the A 12 in the state of Brandenburg in 2014. In this case too, very good longitudinal flatness (planograph measurement as part of a control test) and skid resistance could be achieved. The acoustic effects of all variants of the A 12 resulted in noise reductions, but the reduction values remained below expectations. The result with the comparatively largest noise reduction value of approx. -3 dB (A) was reached in section 2.2 (Table 2), where a pass-by level of 82.2 dB (A) was measured. The primary cause of the less severe than expected noise reduction was the partial tearing of the upper rock grain vibrations by the grinding and the relatively coarse cross-groove formation.

A second test section was required for the evaluation of further upper concretes and to further optimize the grinding texture. In particular, it should be tested whether the use of rounded coarse aggregate used for upper concretes is possible. With regard to the further optimization of the grinding texture, the focus was on very fine textures which, on the one hand, do not leave unbroken and areas after manufacture and on the other hand have many points of contact of the same tread for the tires. This second test section was created in Baden-Württemberg on the A 5 near Bruchsal and realized in 2015.

The diamond ground textures are even finer than those of the first test section and represent limit values for the cutting tools which are currently being produced.

The results of the study were not able to be generated and evaluated within this research work. Skid resistance measurements were carried out in April 2016 and yielded very good results in all test fields. A first CPX measurement took place immediately after production. The results of all sections are relatively close together, and the scattering of the results is very poor. From an acoustical point of view, the comparatively greatest noise reduction values were obtained in test field VIII.1 (Table 3). A controlled or statistical pass-by measurement could not be realized due to the winter season 2016 and the subsequent traffic management (construction of the opposite track). However, due to the CPX measurement results a noise reduction of approx. -5 dB (A) is to be expected. A possible deterioration in the value, possibly due to the final formation of the joints, expansion cut and joint seal, was not confirmed by the results of a second CPX measurement 5 months after the fabrication of the texture.

The results obtained so far show that optimised diamond ground textures provide a significant reduction. The parameters of the diamond ground textures, however, must be strictly prescribed. In the case of required fine binding textures, it is important from today's point of view to determine the requirement value for the polishing resistance of the gross coarseaggregates according to [TL Beton-StB 07] and [TL Gestein-StB 04/07] in order to achieve sufficient skid resistance permanently. The results of the skid resistance development from the test section A 92 indicate that the resistance to polishing the fine aggregate (sands) equally plays an important role if the packing density has not been sufficiently optimized. Further studies on this problem are necessary.

It is probable that fine diamond ground textures will hardly change their macrotecture (texture range with wavelengths between 0.5 and 50 mm) during the service life, since the land areas have already been broken to 100% during production. Thus, the surface properties are likely to change only slightly. Further investigations are necessary to confirm this thesis and to prove its durability.

The following recommendations and findings can be derived from the examinations and results obtained:

An optimization of the joint formation can lead to further noise reduction of the tire / road noise. For this purpose, investigations are required on special requirements for joint design. The minimization of the phases and the filling of the joints (potting or profile)

up to the upper edge of the roadway would be conceivable for a noise reduction.

The influence of the directed texture of the road surface on the driving dynamics generated by the diamond grinding has to be investigated.

Overlapping areas when grinding are to be kept as low as possible from the driving dynamics point of view. The use of the measuring and control system developed within the research project to avoid overlapping areas provides good conditions for this.

A high packing density of the coarseaggregate increases the rock content in the land areas of the diamond ground texture and could thus have a positive effect on the durability of the diamond ground texture.

A long-term monitoring of the development of the noise and skid resistance behavior and the durability of the generated diamond ground textures is necessary.

When diamond grinding newly constructed concrete pavements, large and powerful diamond grinding machines should be used for the large areas to be treated in order to increase the efficiency and precision of the process.

The use of rounded aggregate for the upper concrete is in principle suitable for the production of a grinding-textured concrete surface. The use of broken coarseaggregation required by [ZTV Beton-StB 07] could thus be dispensed with. However, gravel concretes have to be further investigated for their suitability as upper concretes and to optimize their composition.

Compared to the production of an exposed aggregate concrete surface, the process of diamond grinding can be referred to as a semi-industrial production process, with which a much higher degree of precision and uniformity of the produced texture can be achieved.

#### Requirements for the diamond grinding in the course of the new construction of the concrete pavement

The production of the diamond ground surface must already be taken into account in the tender documents. During the construction of the concrete pavement, a high flatness is required when making the texture should be economically produced by diamond grinding. In other cases, a flatness grinding should first be performed before the actual texture can be produced with a noise reducing effect. The upper concrete is to have a homogeneously thin mortar layer in order to be able to cut the gross coarse aggregate without difficulty. Furthermore, it is of advantage if the concrete pavement is built with a thickness reserve, so that the possibility exists that

the diamond grinding may possibly be repeated during the period of use of the concrete pavement.

The practical tests have shown that the upper concrete must have reached a minimum strength before the grinding process can be started. It is recommended to define the minimum strength as a splitting tensile strength according to [TP B-StB]. Depending on the strength of the concrete, the selection of the appropriate cutting blades must be carried out by the contractor. Rotational speed and feed rate must also be selected by the contractor in such a way that a uniform texture is created and a "float" of the grinding shaft during the cutting operation is avoided.

In general, narrower grinding shafts are less suitable, because the number of overlapping areas increases and a more inhomogeneous surface texture results. Furthermore, the manufacturing time increases significantly, so that the traffic management costs increase and the availability of the transport system decreases.

The texture parameters must be defined by the specification of the segment width and the segment spacing. The cutting depth must be adjusted in such a way that the texture resulting from the concrete cover fabrication is completely removed and the gross coarseaggregate is cut. As a result, a greater mortar layer thickness leads to a higher removal depth. For dimensioning-relevant reasons, the total removal depth should not be more than 1 cm.

If the requirements for the flatness of 4 mm, with respect to a measuring base of 4 m, are adhered to in the produced concrete surface, the diamond grinding is possible in one operation. If the irregularities are larger, a flatness grinding must be carried out before the acoustic grinding.

In the context of the possible total removal depths, it is recommended to realize a thickness reserve of at least 1 cm for the new construction.

To avoid damaging the young concrete matrix of the upper concrete, minimum requirements on the strength of the concrete must be met. The latest concrete section must be checked. Grinding work can start from the experience of the trials when:

- The individual value of the splitting tensile strength  $f_{ct,i,core}$  shall be at least 3.0 MPa.
- The average value of the splitting tensile strength  $f_{ct,m,core}$  of three drill core discs of the upper concrete shall be at least 3.3 MPa.
- The concrete to be grouted must have a compressive strength  $f_{c,i,cube}$  of 35 MPa, tested on drill core DN 150 for each individual value.
- The mean value of the compressive strength  $f_{c,m,cube}$  shall be at least 37 MPa, tested on three core cores DN 150.

It is recommended to specify a minimum grinding shaft width from 1.30 m to minimize the number of overlapping areas. Furthermore, the sum of the width of the overlapping regions should be defined over the cross-section. The overlapping areas in the main track should not be arranged in the rolling tracks.

The disk section of the diamond grinding wave should be designed in such a way that the tolerances in the dimensions of the same cutting disks are minimized.

The diamond grinding is to be done after the kerf cut and before expansion cut of the cross joints.

The diamond grinding machine must be equipped with a device for the direct suction of the material which is produced during the cutting process so that no slurry can reach the roadway. New technologies allow the processing of the sludge.

#### Diamond grinding requirements for conservation measures on existing concrete pavement

If the flatness, the skid resistance and / or the noise behavior are to be improved during maintenance measures on existing tracks, some adjustments have to be made in the invitation to tender.

First of all, the suitability of the section and especially of the upper concrete shall be checked:

- strength of the upper concrete,
- mortar layer thickness of the upper concrete,
- polishing resistance of rough and fine coarseaggregates,
- Unflatness before diamond grinding.

It is also recommended to carry out a joint repair after diamond grinding.

The following aspects must also be considered:

- The flatness of the roadway following the diamond grinding must comply with the requirements of the [TP Eben]. Unflatness of  $\leq 4$  mm, based on a measuring base of 4 m, shall be permitted.
- If necessary, a flatness grinding must be connected before the actual grinding in order to eliminate large unflatness.
- The depth of removal must not exceed 10 mm in the context of the total top thickness, in order not to reduce the thickness of the concrete pavement so far as to result in consequential damage. If this value is exceeded, the concrete pavement must be calculated in advance in order to calculate the remaining useful life.
- Due to the age-related increased strength of the concrete, the selection of suitable cutting tools must be taken into consideration when designing the grind.

- As a function of the strength of the concrete, the segment contact pressure and the advancing speed must be selected in such a way that a "float" is avoided.
- In the transition areas to the existing concrete pavement, the cutting depth must be adapted in such a way that no steps or warping occur.
- The existing gradient and transverse inclination must be maintained.

All other requirements are the same as the diamond grinding of a new concrete pavement.

## Literature

- [FE 08.0211/2011/OGB], Villaret, Alber, Bckenbauer, Frohböse, Skarabis: Akustische Optimierung von Betonoberflächen mit verbesserten Grinding-Verfahren
- [LEISTRA], Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr - Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche" der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), BASt-Bericht S37, 2005
- [AL Sp-Beton], Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen, Ausgabe 2006
- [ISO/CD 3rd 11819-2], Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method. Entwurf, Arbeitsvorlage vom 20.04.2009
- [DIN CEN/TS 12390-9], Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung, Ausgabedatum: 2006-08
- [DIN EN ISO 13473-1], Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe, Ausgabedatum 2004-07
- [DIN EN 29053] - Akustik; Materialien für akustische Anwendungen; Bestimmung des Strömungswiderstandes (ISO 9053:1991); Deutsche Fassung, Ausgabedatum 1993-05
- [SPB1] Verfahren zur Messung der Geräuschemission von Straßenoberflächen (GStrO), herausgegeben durch den Bundesminister für Verkehr, Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 16/1992, Bonn, 1992
- [SPB2] DIN EN ISO 11819-1: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic. Part 1. Statistical Pass-By method. September 1997
- [TP B-StB], Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen, Ausgabe 2015, FGSV, Köln
- [TP Eben], Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen, Ausgabe 2009, FGSV, Köln
- [TP Griff-StB (SKM)], Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), Ausgabe 2007, FGSV, Köln

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung .....</b>	<b>17</b>	4.1.1	Allgemeines .....	49
1.1	Gesamtziel .....	17	4.2	Anpassung und Rekalibrierung des Rechenmodells für anisotrope Texturen .....	50
<b>2</b>	<b>Methodik des Vorgehens .....</b>	<b>17</b>	4.2.1	Analyse der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen und Nahfeldmessungen .....	50
2.1	Stand der Technik und Erkenntnisse aus Forschung und Straßenbaupraxis .....	18	4.2.2	SPERoN®-Berechnungen mit gemessenen Oberflächenprofilen .....	52
2.1.1	Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 08.0210/2010/ORB .....	19	4.2.3	Implementierung dreidimensionaler Texturmodelle .....	53
2.1.2	Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 08.0211/2011/OGB .....	20	4.2.4	Kalibrierung und Überprüfung des modifizierten Rechenmodells .....	54
2.1.3	Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 08.0219/2012/IGB .....	21	4.3	Mathematische Modellbildung verschiedener geräuschmindernder Oberflächentexturen .....	57
2.1.4	Relevante Grindingprojekte im Ausland ..	22	4.4	Variation der Modelle zur Simulation in der Praxis auftretender Abweichungen von der Modelltextur .....	58
<b>3</b>	<b>Erprobung unterschiedlicher Grindingtexturen auf Versuchsstrecken.....</b>	<b>28</b>	<b>5</b>	<b>Laborversuche.....</b>	<b>60</b>
3.1	Variation der Texturparameter .....	28	5.1	Vorgehen .....	60
3.2	Vorbereitung der Ausschreibung der Grindingmaßnahmen .....	29	5.2	Betone .....	60
3.3	Fachliche Begleitung der Grin- dingmaßnahmen vor Ort .....	29	5.2.1	Ausgangsstoffe .....	60
3.3.1	Grindingmaßnahme A 93 .....	29	5.2.2	Standardbetone .....	61
3.3.2	Grindingmaßnahme A 92 .....	30	5.2.3	Optimierte Betone .....	62
3.3.3	Grindingmaßnahme A 13 .....	32	5.2.4	Beton- und Probekörperherstellung .....	63
3.4	Oberflächentextur .....	34	5.2.5	Betonprüfungen .....	64
3.4.1	Messungen mit ELAtextur .....	34	5.2.6	Eigenschaften der Standardbetone und der optimierten Betone .....	64
3.4.2	Texturmessung mit Laserprofilometer ...	35	5.3	Grinding im Labor .....	65
3.4.3	3D-Texturmessung .....	37	5.3.1	Grindingmaschine .....	65
3.4.4	Messung des texturinduzierten Strömungswiderstandes .....	39	5.3.2	Sägeblätter und Distanzscheiben .....	66
3.5	Längs- und Querebenheit .....	41	5.4	Bestimmung der Textureigenschaften ...	67
3.6	Griffigkeitsmessungen und Ergebnisse ..	41	5.5	Probekörperuntersuchungen .....	70
3.7	Spaltzugfestigkeiten und Deckendicken ..	43	5.5.1	Vorgehen .....	70
3.8	Geräuschemission .....	43	5.5.2	Einfluss der Texturgeometrie .....	70
3.8.1	SPB-Messungen .....	43	5.5.3	Einfluss der Betoneigenschaften .....	77
3.8.2	Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen .....	45	5.5.4	Zeitpunkt des Grindings .....	83
3.8.3	CPX-Messungen .....	47	5.5.5	Einfluss Nachbehandlung .....	86
<b>4</b>	<b>Computersimulationen zu lärmoptimierten Grindingtexturen mit SPERoN® .....</b>	<b>49</b>	5.6	Änderung der akustischen Eigenschaften .....	87
4.1	Beschreibung des Simulationstools SPERoN® .....	49	5.6.1	Methodik .....	87
			5.6.2	Simulationsergebnisse .....	87
			5.6.3	Diskussion der Simulationsergebnisse ...	87
			5.6.4	Schlussfolgerungen für akustisch günstige Grinding-Texturen .....	88

<b>6</b>	<b>3-D-FEM-Voruntersuchungen und Dimensionierungsberechnungen für den praxisrelevanten Einsatz..... 88</b>	7.3	Entwicklung von Mess- und Steuerungssystemen zur Vermeidung von Überlappungsbereichen während des Grindings..... 107
6.1	Analyse der effektiven Querschnittsschwächung infolge Grinding ..... 89	7.3.1	Stand der Technik..... 107
6.1.1	Definition eines FEM-Modells zur Spannungsanalyse im gegrindeten Querschnitt..... 89	7.3.2	Entwicklung und Programmierung des Messalgorithmus ..... 108
6.1.2	Ansatz der Belastungen..... 90	7.3.3	Beschaffung geeigneter Messtechnik... 109
6.1.3	Ansatz der Materialparameter..... 90	7.3.4	Erprobung der Messtechnik ..... 110
6.1.4	Berechnungsprogramm ..... 91	7.4	Entwicklung und Herstellung von Diamantscheiben mit einer Breite von < 2,8 mm ..... 111
6.1.5	Berechnungsergebnisse ..... 91	7.4.1	Einfluss der Rillenbreite auf die Stegfläche ..... 111
6.1.6	Hinweise für die Dimensionierung..... 92	7.4.2	Beschreibung des Entwicklungs- und Herstellungsprozesses der Scheiben ... 112
6.2	Analyse der mechanischen Widerstandsfähigkeit der Grindingtextur 92	<b>8</b>	<b>Erprobungsstrecken..... 113</b>
6.2.1	Spannungen infolge Radlast..... 92	8.1	Vorgehen..... 113
6.2.2	Empfehlungen zur Festlegung der Grindingtextur..... 93	8.2	Erprobungsstrecke A 12 ..... 114
<b>7</b>	<b>Maschinentechnik Grinding..... 93</b>	8.2.1	Allgemeines..... 114
7.1	Auswahl und Ausrüstung der für das Grindingverfahren anzuwendenden Maschinen- und Schneidtechnik ..... 93	8.2.2	Modifizierung der Vergabeunterlagen und Erstellung eines detaillierten Ablaufplanes..... 115
7.2	Entwicklung von Mess- und Steuerungssystemen an der Grindingmaschine zur Beseitigung von Unebenheiten..... 93	8.2.3	Bauberatung zur Ausführung der Betondecke und des Grindings ..... 116
7.2.1	Erstellung eines Simulationsmodells der Grindingmaschine ..... 94	8.2.4	Probekörperherstellung und Frischbetonprüfung..... 116
7.2.2	„Ist“-Performance der Grindingmaschine ohne Ebenheitssteuerung bzw. -regelung ..... 97	8.2.5	Herstellung zielsicherer Texturen mit optimierten Gebrauchs- und Substanzeigenschaften..... 116
7.2.3	Konzeption des Messverfahrens zur Anwendung an Grindingmaschinen ..... 99	8.2.6	Festbetonprüfungen an Würfeln und Zylindern ..... 118
7.2.4	Auswahl und Beschaffung geeigneter Komponenten der Messtechnik..... 99	8.2.7	Beschreibung der Grindingtexturen sowie Nachweis der Homogenität auf der Erprobungsstrecke..... 118
7.2.5	Schnittstellenanalyse für die Verwendung der Ebenheitsinformation im Grindingprozess ..... 100	8.2.8	Bohrkernuntersuchungen..... 127
7.2.6	Simulation eines geregelten BumpCutting-Prozesses ..... 100	8.2.9	Grinding im Labor mit Baustellenbeton. 138
7.2.7	Vergleich zwischen geregeltem und ungeregeltem BumpCutting ..... 101	8.3	Erprobungsstrecke A 5 ..... 140
7.2.8	Anwendung des manuellen Betriebes.. 103	8.3.1	Allgemeines..... 140
7.2.9	Einfluss der Sensorreferenz..... 104	8.3.2	Theoretische Vorgabe für die Grinding-Parameter..... 141
7.2.10	Einfluss des Steueralgorithmus..... 104	8.3.3	Modifizierung der Vergabeunterlagen und Erstellung eines detaillierten Ablaufplanes ..... 141
7.2.11	Fazit der Simulationsrechnungen..... 105	8.3.4	Probekörperherstellung und Frischbetonprüfung..... 144
7.2.12	Applikation der Messtechnik an das Grinding-Arbeitsgerät ..... 106	8.3.5	Herstellung zielsicherer Texturen mit optimierten Gebrauchs- und Substanzeigenschaften..... 145

---

8.3.6	Festbetonprüfungen an Würfeln und Zylindern .....	146
8.3.7	Beschreibung der Grindingtexturen sowie Nachweis der Homogenität auf der Erprobungsstrecke .....	147
<b>9</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse .....</b>	<b>153</b>
<b>10</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>159</b>
<b>11</b>	<b>Empfehlungen für die Praxis .....</b>	<b>161</b>
11.1	Grindingoberfläche im Zuge des Neubaus der Betondecke .....	161
11.2	Grindingoberfläche im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen am Bestandsbeton .....	162
	<b>Literatur.....</b>	<b>163</b>
	<b>Verwendete Regelwerke .....</b>	<b>164</b>
	<b>Bilder .....</b>	<b>165</b>
	<b>Tabellen.....</b>	<b>175</b>

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.



# 1 Aufgabenstellung

Auf den hochbelasteten Straßen in Deutschland nehmen der Schwerverkehrsanteil und der Lastkollektivquotient weiterhin kontinuierlich zu. Die Folge ist eine deutlich erhöhte mechanische Beanspruchung des Oberbaus, insbesondere der Fahrbahn-deckschichten, was wiederum zu einer dauerhaften Verringerung der akustischen Lebensdauer geräuschmindernder Fahrbahnbeläge führt.

Mit der Schaffung lärmarmen Texturen im Betondeckenbau könnte es erstmals im Straßenbau möglich werden, lärmindernde Oberflächen so dauerhaft herzustellen, dass eine signifikante lärmindernde Wirkung über die Lebensdauer der Betondecke erhalten bleibt. Weitere Maßnahmen zur Erzielung einer Lärminderung sind dann nicht notwendig.

Das innerhalb dieses Forschungsthemas behandelte Verfahren eignet sich zudem auch für Erhaltungsmaßnahmen, ohne dass die Betondecke erneuert werden muss.

Die Betonzusammensetzung des Oberbetons kann in diesem Zusammenhang neu überdacht werden und zu qualitativ hochwertigen Decken führen, die ggf. wirtschaftlicher als die heute üblichen Decken sind.

Im Ergebnis dieses Vorhabens besteht eine große Chance, lärmindernde Betondecken zu kreieren, die die positiven dauerhaften Eigenschaften einer Betondecke behalten und wirtschaftlicher als bisherige Decken sind.

## 1.1 Gesamtziel

Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer lärmtechnisch optimalen Grindingtextur auf Grundlage existierender theoretischer Berechnungsmodelle. Es sind folgende Entwicklungsschritte vorgesehen:

- Entwicklung eines Texturerstellungsverfahrens zur Verbesserung der Gebrauchs- und Substanzeigenschaften der Betonoberfläche,
- Entwicklung von optimalen und wirtschaftlichen Betonzusammensetzungen für das Herstellungsverfahren unter Berücksichtigung der Eigenschaften in Bezug auf die strukturelle Substanz,
- Erprobung des Verfahrens in der Praxis mit Bestimmung
  - der schalltechnischen Eigenschaften,
  - der anforderungsgerechten Griffigkeit,
  - der anforderungsgerechten Ebenheit,
  - der Dauerhaftigkeit der erzeugten Textur,
  - der Dauerhaftigkeit hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften des Oberbetons.

Das Vorhaben zielt ab auf die Herstellung von Grindingtexturen mit guter Reproduzierbarkeit der schall- und griffigkeitstechnischen Eigenschaften, wobei eine Pegelminderung von -4 dB(A) gegenüber dem Referenzbelag nach RLS-90 angestrebt wird.

## 2 Methodik des Vorgehens

Für die akustische Optimierung von Betonfahrbahn-decken wurden folgende Forschungsschwerpunkte identifiziert:

### 1. Texturentwicklung

In Computersimulationen zur Geräuschprognose wird im ersten Schritt ermittelt, welche Geometrie Grindingtexturen mit optimalen lärmindernden Eigenschaften haben sollen. Während die meisten Oberflächen geräuschmindernder Fahrbahnbeläge isotrope Texturen aufweisen, die in Längs- und Querrichtung selbstähnlich sind, besteht bei Grindingoberflächen durch die längsgerichtete Bearbeitung des Oberbetons eine ausgeprägte Anisotropie der Textur. Für die Simulationen soll eine an diese besondere Eigenschaft von Grindingstrecken angepasste Version des Rechenmodells SPERoN® eingesetzt werden. Im Rahmen des Vorhabens soll die Anwendung des modifizierten Rechenmodells auf Grindingoberflächen durch entsprechende akustische Messungen der Oberflächeneigenschaften (3D-Textur und texturinduzierter Strömungswiderstand) und des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs anhand kontrollierter Vorbeifahrtmessungen auf mindestens vier Grindingstrecken getestet werden.

Für die Texturentwicklung wird auf bereits in einem vorangegangenen Forschungsvorhaben [FE 08.0211/2011/OGB] gewonnene Erkenntnisse zurückgegriffen. Aufbauend auf den Simulationen werden im Labor Betone entwickelt, denen zielsicher die gewünschte Grindingtextur eingeschnitten werden kann. Dabei kann ebenfalls auf Erkenntnisse aus [FE 08.0211/2011/OGB] zurückgegriffen werden.

### 2. Entwicklung und Einsatz von Mess- und Steuerungstechnik

Für Grindingmaschinen sollen Geräte zur Ebenheitsmessung entwickelt werden. Des Weiteren soll ein Maschinensteuerungssystem zur Reduzierung der Überlappungsbereiche eingebaut und getestet werden. Im Vorhaben soll außerdem erstmals eine Ermittlung und Analyse der Betriebsschwingungen der Grindingmaschine und deren Einfluss auf die Texturentwicklung unter Berücksichtigung des Verschleißes der Schneidscheiben stattfinden.

### 3. Erprobungsstrecke

Der Auftraggeber stellt ein zweistreifiges Baulos als Erprobungsstrecke zur Verfügung. Es ist vorgesehen, im Rahmen des Forschungsvorhabens auf einer Strecke von ca. 1,2 km Länge und in gesamter Breite vier optimierte Betone einzubauen (pro Betonrezeptur ca. 300 m). Auf jedem der 300 m langen Abschnitte werden 3 verschiedene Grindingtexturen eingeschnitten.

Aufgrund der hohen Investitionskosten von Diamantwerkzeugen für optimierte Texturen war davon auszugehen, dass das gesamte Baulos in Grinding ausgeschrieben und im Rahmen der Baumaßnahme vom Auftraggeber finanziert wird. Bei Entfall einer Waschbetonoberfläche ist gegenüber einer herkömmlichen Betondecke mit einer Kostenersparnis von 2,50 EUR/m<sup>2</sup> zu rechnen. Dieses wurde bei der Angebotserstellung bereits berücksichtigt.

Hinsichtlich der Ausschreibung wird der Auftragnehmer die speziellen Anforderungen sowie einen detaillierten Ablaufplan für Versuche an der Erprobungsstrecke formulieren und dem Auftraggeber zur Verfügung stellen.

## 2.1 Stand der Technik und Erkenntnisse aus Forschung und Straßenbaupraxis

An Fahrhandecken werden zunehmend erhöhte Anforderungen an die Lärminderung bei anforderungsgerechter Griffigkeit der Oberfläche gestellt. Betondecken sind bei regelgerechter Ausführung sehr dauerhaft, ihr Potential hinsichtlich der Lärminderung wird zurzeit jedoch bei Weitem nicht ausgeschöpft.

Unterschiedliche Belastungen aus Verkehr und Witterung führen nicht nur zu differenzierten Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen, klimatischen und chemischen Belastungen, sondern auch zu unterschiedlichen Anforderungen an Geometrie, Ebenheit und Gestalt einer lärmindernden Fahrhandtextur. Gleichzeitig müssen diese Anforderungen langfristig erfüllt werden.

Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Betondecken ist die rechnerische Dimensionierung nach dem Verfahren der [RDO Beton] Stand der Technik. Dabei spielt das Zusammenwirken von Ober- und Unterbeton hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften eine wesentliche Rolle. Bei der Konzipierung neuartiger Oberbetone, welche sich besonders gut für eine Texturierung eignen, sind demzufolge die mechanischen Zusammenhänge zu beachten.

Bislang sind keine Betonoberflächen gezielt herstellbar, deren Lärminderung über einen  $D_{\text{Stro}}$ -

Wert von -2 dB(A) hinausgeht. Durch eine Optimierung des Texturierungsverfahrens der Fahrhandoberfläche sind jedoch aufgrund bisheriger Erkenntnisse auch bei dichten Betonbelägen Lärminderungen von -5 dB(A) dauerhaft möglich.

Als Alternative zur Texturierung des Frischbetons steht die gezielte Texturierung des vollständig erhärteten Festbetons im neuen oder gebrauchten Zustand im Raum.

Die Untersuchung existierender Grindingoberflächen mit Liegedauern von bis zu 12 Jahren zeigt, dass dieses Texturierungsverfahren grundsätzlich geeignet ist, eine sehr dauerhafte langlebige Oberflächentexturierung, verbunden mit einer deutlichen Lärminderung zu erreichen [FE 08.0210/2010/ORB]. Allerdings stellt sich diese Textur derzeit teilweise in Abhängigkeit von verschiedenen Randparametern wie Betonzusammensetzung und Dicke der Mörtelschicht, Diamantscheibenabstand, Schwingungseigenschaften der Diamantscheiben etc. frei ein. Die klassische Grindingoberfläche wird gegenwärtig nur in den Texturtälern definiert erzeugt, während die Steghöhe wie auch die Textur auf den Stegen sich in Abhängigkeit der oben genannten Randbedingungen eigenständig einstellt. Unter Umständen findet, insbesondere bei ungleichmäßiger Oberfläche, auch unter fahrendem Verkehr ein weiteres Brechen der Stege und damit eine Veränderung der Textur statt. Die Grindingtextur wird daher derzeit nur zum Teil definiert erzeugt, zum Teil ist sie aber auch noch sehr unzulänglich bekannten weiteren Einflüssen unterworfen, die neben der Griffigkeit das endgültige dauerhafte Erscheinungsbild und die akustische Wirkung maßgeblich mitbestimmen.

Unter der Zielvorgabe einer lärmtechnisch wie griffigkeitstechnisch optimalen Oberflächentextur muss jedoch das Erscheinungsbild in seiner gesamten Ausprägung definiert erzeugt werden können. Dazu sind verschiedene Untersuchungen erforderlich, die Gegenstand dieses Forschungsvorhabens sind.

Unabhängig von der Bauweise lassen sich drei Merkmale zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften von Fahrhandbelägen angeben: Fahrhandrauhigkeit, Offenporigkeit und Nachgiebigkeit [BECKENBAUER I]. Der geräuschmindernde Einfluss von Offenporigkeit und Elastizität der Fahrhanddeckschicht spielt im Kontext dieses Projekts, in dem es ausschließlich um die Texturoptimierung von starren Betondeckschichten geht, keine Rolle. Texturen von Fahrhanddeckschichten setzen sich aus der Überlagerung von Rauheitswellen eines kontinuierlichen Spektrums zusammen. Bedeutsam für die Akustik sind Wellenlängen der Textur im Bereich zwischen etwa 1 mm und 250 mm, die ungefähr mit den Abmessungen des Reifen-Fahrhand-

Kontaktes und der Reifenprofilelemente übereinstimmen. Die Textur der Fahrhahnoberfläche und damit auch die mechanische Anregung des Reifens zu Schwingungen hängen sowohl von der Materialauswahl und Mischgutzusammensetzung als auch vom Herstellverfahren ab. Eine weitere wichtige Kenngröße, der texturinduzierte Strömungswiderstand einer Fahrhahnoberfläche, der auch messtechnisch ermittelt werden kann, ist ein Maß dafür, inwieweit es gelingt, Luft durch den Reifen-Fahrhahn-Kontakt hindurchzupressen, genauer gesagt, welcher Überdruck notwendig ist, um im Reifen-Fahrhahn-Kontakt eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit der Luft aufrecht zu erhalten. Damit stellt der Strömungswiderstand eine wichtige texturbezogene Größe dar, die Einfluss hat auf die aerodynamische Geräusentstehung im Reifen-Fahrhahn-Kontakt.

Der Einfluss der Fahrhahnoberflächentextur auf die Rollgeräusentstehung lässt sich heute mit sehr weit entwickelten Rechenmodellen für die Vorhersage der Reifen-Fahrhahn-Geräusche untersuchen. Das in dem hier vorgesehenen Projekt zur Prognose der theoretisch entworfenen und im Labor hergestellten Grindingtexturen vorgesehene Rechenmodell SPERoN® zählt zu den anwendungsreifen validierten Simulationsverfahren [BECKENBAUER II] [BE/AN/BÜ] [BE/KR].

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Fahrhahnoberflächen, die mit dem Grindingverfahren hergestellt wurden und Oberflächen anderer Deckschichten besteht in der unterschiedlichen Isotropie. Während die meisten Oberflächen geräuschemindernder Fahrhahnbeläge isotrope Texturen aufweisen, also Texturen, die in Längs- und Querrichtung selbstähnlich sind, besteht bei Grindingoberflächen durch die längsgerichtete mechanische Bearbeitung des Oberbetons eine ausgeprägte Anisotropie der Textur. SPERoN® ist in der bislang verfügbaren Version nur für isotrope Fahrhahntexturen validiert. Eine Einschränkung der Gültigkeit der Messergebnisse besteht jedoch nur bezüglich des aerodynamischen Geräuschteils. Die Berechnung der mechanischen Geräusentstehung baut auf der Schwingungsanregung des Reifens durch die dynamischen Kräfte im Reifen-Fahrhahn-Kontakt auf. Dabei kommt es wesentlich darauf an, zu welchem Zeitpunkt die Lauffläche bzw. das Laufflächenprofil des Reifens an welchen Stellen der Textur mit der Fahrhahnoberfläche in Kontakt ist und wie sich die Kräfte auf die Kontaktpunkte verteilen. Es ist dabei unerheblich, ob es sich um isotrope oder anisotrope Texturen handelt. Im Vorhaben muss aus den genannten Gründen dennoch auf die Anisotropie von Grindingoberflächen Rücksicht genommen werden.

### 2.1.1 Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 08.0210/2010/ORB

Im Zuge des Forschungsvorhabens [FE 08.0210/2010/ORB] sollten vorhandene Grindingstrecken auf ihre lärm-mindernde Wirkung hin untersucht werden. Dabei wurde aus einer Vielzahl von Strecken eine Auswahl getroffen, bei denen einerseits eine Mindestlänge einer Grindingoberfläche vorhanden war und andererseits zumindest der Hauptfahrstreifen der relevanten Richtungsfahrhahn nach Aktenlage komplett gegrindet wurde. Im Ergebnis wurden 7 Strecken in die Untersuchung aufgenommen. Bei allen Strecken wurde das Grindingverfahren im Nachgang als Erhaltungsmaßnahme durchgeführt, d.h., es wurden Ebenheits- oder Griffigkeitsdefizite behoben. Lärm-mindernde Aspekte waren zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Maßnahmen nicht ausschlaggebend. Die Art der Ausführung des Grindings richtete sich dabei an dem zu behebbenden Defizit aus. Bei griffigkeitsverbessernden Maßnahmen wurde ein Konstantabtrag vorgesehen, bei dem eine relativ konstante Grindingtextur an der Oberfläche entsteht, aber vorhandene Unebenheiten in Quer- und Längsprofil so gut wie nicht beseitigt werden. Bei ebenheitsverbessernden Maßnahmen entsteht keine gleichmäßige Grindingtextur an der Oberfläche, da ausschließlich Kuppen von Unebenheiten beseitigt werden. Die Ergebnisse der vorhandenen Grindingoberflächen waren hinsichtlich ihrer lärm-mindernden Eigenschaften demzufolge auch nicht konstant zu erwarten, was die Streuung in den akustischen Eigenschaften bzw. Pegelminderungswerten erklärt.

Trotz der vorgefundenen Randbedingungen waren die Ergebnisse vielversprechend und deuten darauf hin, dass mit einheitlichen Zielvorgaben deutlich bessere Ergebnisse zu erwarten sind.

Aus den Untersuchungen konnten im Einzelnen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Obwohl die Strecken aus Ebenheits- oder Griffigkeitsgründen gegrindet wurden, sind aus den SPB-Messungen auch Pegelminderungen gegenüber dem Referenzwert ermittelt worden.
- Die Pegelminderungswerte konnten nur teilweise direkt durch SPB-Messungen normgemäß ermittelt werden, wobei diese einer deutlichen Streuung unterworfen sind. Die Pegelminderungswerte bewegen sich zwischen  $-2,2$  dB(A) und  $+0,4$  dB(A).
- Die Schalldruckpegel aller Messabschnitte aus den  $CPX_{P_{kw}}$ -Messungen lagen zwischen  $97,7$  dB(A) und  $99,7$  dB(A) und damit durchschnittlich höher als die Ergebnisse von CPX-

Messungen der Bundesanstalt für Straßenwesen auf 12 neu erbauten Streckenabschnitten mit Waschbetonoberfläche, veröffentlicht in „Straße und Autobahn“ Nr. 3/2011 [ST/WIE], Diese ergaben Messwerte zwischen 96,3 dB(A) und 98,6 dB(A) und lagen damit um ca. 3 bis 6 dB(A) unter dem dort für CPX-Messungen herangezogenen Vergleichswert (Betonoberfläche mit Stahlbesenstruktur in Querrichtung) von 102,2 dB(A).

- Die Festigkeit des Oberbetons spielte zwar hinsichtlich der erreichbaren Lärminderung keine direkte Rolle, war jedoch sehr wahrscheinlich für die Langlebigkeit der Textur (Abriebfestigkeit der Oberfläche) und somit für eine dauerhafte Lärminderung verantwortlich.
- Die gegriindeten Oberflächen zeigten hohe bis sehr hohe Griffigkeitswerte, die anscheinend altersunabhängig Bestand haben. Es ist davon auszugehen, dass die Festigkeit des Oberbetons (insbesondere die Abriebfestigkeit) dabei eine große Rolle spielt.
- Die Texturkenngößen haben den größten Einfluss auf die erzielbare Lärminderung. Direkte Zusammenhänge zwischen den hier ermittelten Kenngrößen und den Pegelminderungswerten waren jedoch für die untersuchten Fälle und anhand des hier gewählten Messverfahrens nicht nachweisbar.
- Insgesamt wurde festgestellt, dass die Oberflächen die Anfangseigenschaften wie Festigkeit, Griffigkeit und Lärminderung dauerhaft behalten haben. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf die A 24 und die A 115 verwiesen, die bereits seit 10 bzw. 7 Jahren gegriindete Oberflächen besaßen.

### 2.1.2 Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 08.0211/2011/OGB

Ziel des Forschungsvorhabens [FE 08.0211/2011/OGB] war, den Einfluss verschiedener Parameter auf die Geräuschemission von Betonfahrbahndecken mit Grindingtextur zu untersuchen. Die Untersuchung erfolgte auf Grundlage existierender theoretischer Berechnungsmodelle. Das Grindingverfahren sollte gezielt weiterentwickelt werden, so dass geräuschkindernde, reproduzierbare Texturen entstehen, die auch eine anforderungsgerechte Griffigkeit und hohe Dauerhaftigkeit gewährleisten. Des Weiteren war vorgesehen, anhand von Texturkennwerten, die mit einem einfach handhabbaren Texturmessgerät ermittelt werden sollen, eine Aussage im Hinblick auf die zu erwartenden Lärminderungseigenschaften der Oberfläche zu treffen. Zu Beginn des Vorhabens

wurde in einer Recherche erfasst, mit welchen Werkzeugen bzw. Scheibenbesätzen in der Praxis Texturierungen mittels Grinding möglich sind. Dazu gehörte z.B. die minimal herstellbare Segmentbreite. Die aus der Recherche abgeleiteten Randbedingungen wurden in Simulationsrechnungen und in den Laborversuchen berücksichtigt. Zur Ermittlung einer im Hinblick auf die Lärmeigenschaften optimierten Textur wurden in Simulationsrechnungen Rillenbreite, Stegbreite und Rillentiefe systematisch variiert. Für die Laborversuche wurde im ersten Schritt ein Laborgrindinggerät entwickelt. Ziel war es, auf kleinformatigen Betonoberflächen mit maximal 400 mm x 400 mm Grindingtexturen herzustellen, deren Stege und Rillen von bisher praxisüblichen Breiten bis hin zu maximal bzw. minimal möglichen Breiten das gesamte Spektrum realisierbarer Grindingtexturen abdecken. Die Herstellung kleinformatiger Probestplatten ermöglichte dabei neben der Variation der Grindingtexturen auch den Einfluss verschiedener Betone auf die Realisierbarkeit der jeweiligen Grindingtextur systematisch untersuchen zu können. Im ersten Teil der Laborversuche wurden auf Grundlage der Simulationsrechnungen systematisch verschiedene Grindingtexturen erzeugt. Diese Untersuchungen wurden an Probestplatten aus Mörtel durchgeführt, um den Einfluss grober Gesteinskörnung auf die Gestalt der Grindingtextur auszuschließen. In der zweiten Versuchsreihe wurden drei verschiedene Betone getestet, die als Oberbetone in Frage kommen könnten. Dabei handelte es sich um einen Waschbeton, einen Oberbeton, der bislang für die Texturierung mit Besenstrich verwendet werden konnte und einen Beton, der als Unterbeton zum Einsatz kommen könnte. Die Betone wurden mit unterschiedlichen Kombinationen aus Segmentbreiten und Distanzscheibenbreiten texturiert. An den hergestellten Probestplatten wurden Texturmessungen sowie Messungen des texturinduzierten Strömungswiderstands durchgeführt. Diese dienten als Eingangsparemeter zur Berechnung der Vorbeirollpegel mit dem Simulationsprogramm SPERoN®. Des Weiteren wurde die Griffigkeit der Oberflächen mit dem SRT-Pendelgerät bestimmt. Die Untersuchungen ergaben, dass sich die hergestellten Grindingtexturen in drei Kategorien unterteilen lassen:

1. Bei sehr geringen Distanzscheibenbreiten von 1,0 mm bis 2,0 mm, wurde der Beton unabhängig von der gewählten Segmentbreite gleichmäßig abgeschnitten. Der Beton zwischen den Segmenten ist vom Schneidvorgang unmittelbar betroffen, so dass als Folge Stege mit geringer Höhe und einer sehr homogenen Geometrie entstehen. Aufgrund der hohen Strömungswiderstände und der Homogenität dieser Texturen wiesen sie die vergleichsweise höchsten Lärm-

minderungswerte auf. Hinsichtlich der Praxisanwendung ist jedoch fraglich, ob Oberflächen mit dieser Texturierung ausreichende Griffigkeiten aufweisen, da die Texturtiefen (ETD-Werte) weniger als 0,6 mm betragen.

2. Bei Distanzscheibenbreiten zwischen 3,0 mm und 5,0 mm wurde weniger Beton zwischen den Segmenten abgetragen. Als Folge verblieben an der Oberfläche Stege, die teilweise brachen und so zu einem inhomogenen Texturbild führten. Aufgrund der Stegbildung nahm die Texturtiefe dieser Oberflächen zu, die Lärminderungseigenschaften nehmen jedoch infolge des höheren Vibrationsanteils ab.
3. Bei Distanzscheibenbreite von mehr als 5,0 mm wurde der Beton zwischen den Segmenten nicht mehr abgeschnitten. Es entstanden Stege, deren Höhe der Schneidtiefe entsprach. Ein Brechen der Stege fand nicht mehr statt.

Eine geringe Stegbreite führte zu sehr geringen Strömungswiderständen und damit verbunden zu hohen Geräuschemissionen. Bei zunehmender Stegbreite nahm der Strömungswiderstand zu, was in einer besseren Lärminderung resultierte. Aufgrund der ausgeprägten Stege der Oberflächen betrug die Texturtiefe (ETD-Werte)  $\geq 1$  mm. Da die Oberfläche der Stege der Oberfläche des geglätteten Betons entsprach, war die Feinrauheit dieser Oberflächen sehr gering, was zu verminderten Griffigkeiten bei der Anwendung in der Praxis führen kann.

Die gewählten Texturgeometrien zeigten einen signifikanten Einfluss auf die berechneten Vorbeirollpegel. Diese lagen für die hier mittels SPERoN® berechneten Fälle zwischen 76,4 dB(A) und 83,8 dB(A). Bei sehr geringen Distanzscheibenbreiten kam es zu einem nahezu vollflächigen Betonabtrag. Bei diesen Texturen wurde kein Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Textureigenschaften festgestellt. Bei zunehmenden Distanzscheibenbreiten beeinflusste die Betonzusammensetzung die Steggeometrie. Bei einer um rd. 12 MPa höheren Betondruckfestigkeit wurde hier bei einer Distanzscheibenbreite von 5,0 mm eine homogenere Steggeometrie als bei geringerer Betondruckfestigkeit festgestellt. Ein vermehrtes Brechen der Stege führte zu deutlich höheren Vorbeirollpegeln, da der Vibrationsanteil zunahm. Für die hier untersuchten Probelplatten stieg der Vorbeirollpegel eines Betons, dessen Stege nicht gebrochen waren im Vergleich zu einem Beton, dessen Stege zu einem großen Anteil gebrochen waren, um rd. 5 dB(A) an.

Der Beton, der mit gerundeter Gesteinskörnung hergestellt wurde, wies im Vergleich zu den Beto-

nen, die mit gebrochener Gesteinskörnung hergestellt wurden, vergleichbare Texturen und Textureigenschaften auf.

Orientierend wurde an einem Beton mit Grindingtextur der Frost-Tausalz-Widerstand untersucht. Hier zeigte sich, dass hauptsächlich die Stege aufgrund ihrer Geometrie und des empfindlicheren Oberflächenmörtels angegriffen werden. Die mit der Abwitterung verbundene Texturveränderung kann zu einer deutlichen Verringerung der Lärminderungseigenschaften führen.

Für ein Kontrollmessverfahren zur Beurteilung der Grindingtextur wurde der Einsatz des Messgerätes ELAtextur untersucht. Hier lieferten die Texturkennwerte mittlere Profiltiefe MPD und geschätzte Texturtiefe ETD sehr gute Korrelationen zum texturinduzierten Strömungswiderstand und zum berechneten Vorbeirollpegel.

Aus dem Forschungsvorhaben leitete sich folgender Ausblick ab:

Aufbauend auf den hier durchgeführten Simulationsrechnungen sind Texturgeometrien mit optimalen lärmindernden Eigenschaften festzulegen. Des Weiteren sind im Labor Betone zu entwickeln, denen zielsicher die gewünschte Grindingtextur eingeschnitten werden kann. Gleichzeitig ist die Texturdauerhaftigkeit hinsichtlich mechanischer Einwirkung (Verschleiß) und Frost-Tausalz-Angriff zu optimieren, um eine dauerhaft hohe Lärminderung sicherzustellen. Zur Realisierung optimierter Grindingtexturen in der Praxis sind Geräte zur Textur- und Ebenheitsmessung und ein Maschinensteuerungssystem zu entwickeln. Zusätzlich sind Mess- und Steuerungssysteme zur Vermeidung von Überlappungsbereichen während des Grindings zu entwickeln. Weitere Untersuchungen sollten die Gebrauchstauglichkeit des Messgerätes ELAtextur hinsichtlich der Abschätzung lärmtechnischer Parameter der erzeugten Grindingtextur prüfen. Abschließend sollten die Erkenntnisse in einer Erprobungsstrecke zur Anwendung kommen. Dabei sollten unterschiedliche Betonzusammensetzungen sowie verschiedene Texturgeometrien verwendet werden.

### 2.1.3 Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 08.0219/2012/IGB

Ziel des Forschungsvorhabens [FE 08.0219/2012/IGB] war es, auf Basis von zwei verschiedenen Oberbetonen (Waschbeton mit stetiger und unstetiger Sieblinie) eine Erhaltungsmaßnahme mit Grinding im Feldversuch durchzuführen. Hierbei sollte neben den Eigenschaften Ebenheit und Griffigkeit gezielt eine Lärminderung angestrebt werden. Die Konzipierung der Oberfläche, die

Ausführung der Texturierung und die Ergebnisprüfung waren Bestandteil des Vorhabens, wobei hinsichtlich der Ebenheit und Griffigkeit auf die Kontrollprüfungsergebnisse zurückgegriffen werden sollte. Es sollte geprüft werden, ob mit der zielsicheren Herstellung dauerhafter Grindingtexturen zukünftig eine Erhaltungsmaßnahme bereitgestellt werden kann, die über eine lange Restnutzungsdauer im Hinblick auf die Lärminderung, Ebenheit und Griffigkeit die Anforderungen erfüllt.

Die in [FE 08.0211/2011/OGB] gewonnenen Erkenntnisse aus den durchgeführten Simulationsrechnungen bildeten die Grundlage für die Auswahl einer geeigneten Textur, die entsprechende Lärminderungseigenschaften erwarten ließ. Das Schneidwerkzeug war hinsichtlich der Schneidtiefe, Steg- und Rillenbreite auf die erforderliche Texturgeometrie anzupassen.

#### 2.1.4 Relevante Grindingprojekte im Ausland

Das Grinding (Schneiden) und Grooving (Rillenschneiden) von Betonfahrbahndecken wird in den USA seit Jahrzehnten eingesetzt, um die Griffigkeit und den Wasserabfluss der Oberfläche zu verbessern. In den vergangenen Jahren wurden beide Verfahren für unterschiedlichste Anwendungsfälle modifiziert. Im Folgenden sind die Oberflächentypen, die mittels Grinding/Grooving hergestellt werden, beschrieben.

##### Konventionelles Grinding:

Seit Anfang der 1960er Jahre kommt das Grinding auf Straßen und Flughäfen zum Einsatz. Durch das Grinding können die Griffigkeit sowie die Ebenheit der Oberfläche verbessert werden. Beim Grinding werden Diamantschneidscheiben, die im Abstand von max. 3 mm auf einer rotierenden Welle angeordnet sind (Abbildung 1), über die Oberfläche geführt. Der Abstand der Schneidscheiben zueinander wird über Distanzscheiben, die sich zwischen den Schneidscheiben befinden, bestimmt (Abbildung 2). Die Schneidtiefe beträgt in der Regel wenige Millimeter.



Abbildung 1: Grindingwelle (Breite: 1,20 m)

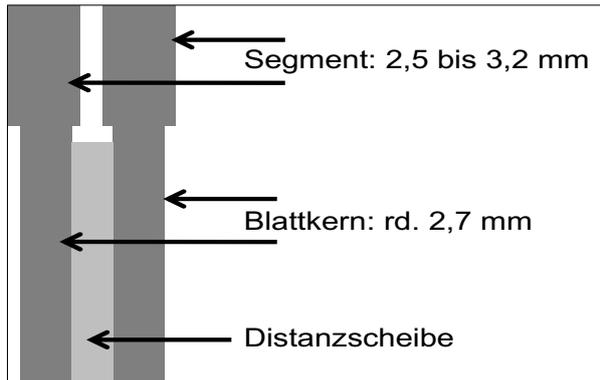


Abbildung 2: Schneidscheibe (links) mit Distanzscheibe (rechts)

Die Schneidscheiben bestehen aus einem rd. 2,7 mm dicken Blattkern, auf den diamantbesetzte Schneidsegmente angeschweißt sind. Die Schneidsegmente haben eine Dicke zwischen 2,5 und 3,2 mm (Abbildung 3 und Abbildung 4).



Abbildung 3: Diamantbesetzte Schneidsegmente



**Abbildung 4:** Prinzipskizze der Anordnung von Schneidscheibe und Distanzscheibe

Der Grindingvorgang erfolgt in Längsrichtung. In Abbildung 5 ist die Betonoberfläche unmittelbar nach dem Grinding dargestellt. Zwischen den Schneidsegmenten bilden sich beim Grinding die sogenannten Stege, deren Breite neben der Segmentbreite im Wesentlichen von der Dicke der Distanzscheiben bestimmt wird. Die Geometrie der Stege wird von der Schneidtiefe und von der Festigkeit groben Gesteinskörnung sowie der Festigkeit der umgebenden Zementsteinmatrix bestimmt.



**Abbildung 5:** Betonoberfläche unmittelbar nach dem Grindingvorgang

Aus Abbildung 6 wird ersichtlich, dass im Bereich der groben Gesteinskörnung das Stegbruchverhalten im Vergleich zur umgebenden Matrix sehr unterschiedlich sein kann. In diesem Beispiel verbleiben in vereinzelt groben Gesteinskörnern ausgeprägtere Stege. Diese brechen durch den späteren Verkehr, wodurch die Oberfläche homogener wird. Zwischen den Stegen befinden sich die Rillen, deren Breite sich aus der Breite des Schneidsegments ergibt.

Die Textur, die sich durch das Grinding ergibt, wird zum einen von dem Wellenbesatz (Segmentdicke und Distanzscheibendicke) sowie von den Eigenschaften des Betons, wie Festigkeit und Petrographie der groben Gesteinskörnung bestimmt. Abbildung 6 zeigt den Einfluss des Wellenbesatzes auf

die Grindingtextur der Fahrbahndecke. Bei 60 Schneidscheiben auf einer Breite von 30,5 cm (60 Blades/Foot) ist die Oberfläche wesentlich homogener als bei 52 Schneidscheiben. Bei einer Anzahl von 60 sind die Schneidscheiben so dicht angeordnet, dass kaum Stege an der Oberfläche entstehen. Bei einer Anzahl von 52 ist der Abstand der Schneidscheiben größer, so dass deutlich mehr Stege an der Oberfläche verbleiben.



**Abbildung 6:** Einfluss der Anzahl an Schneidscheiben auf die sich ergebende Grindingoberfläche

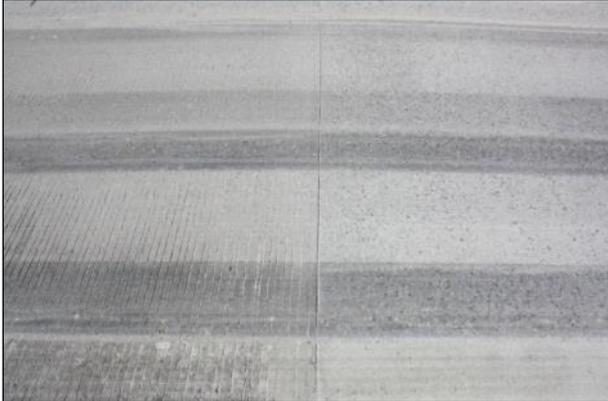
Neben der Verbesserung der Griffbarkeit und der Ebenheit wird das Grinding auch bei Betonfahrbahndecken eingesetzt, bei deren Herstellung noch keine Dübel verwendet wurden und infolgedessen es zu einer Stufenbildung der Platten gekommen ist (Abbildung 7). Die Stufenbildung wird durch den Grindingvorgang abgeschnitten. In diesem Fall kann der Betonabtrag beim Schneidvorgang auch mehrere Zentimeter betragen.



**Abbildung 7:** Stufenbildung von Betonplatten, die ohne Dübel hergestellt wurde

Abbildung 8 zeigt von links nach rechts den Übergang von einer mittels Kamm quer zur Fahrtrichtung texturierten Oberfläche und einer Grindingtextur. Das Texturieren des frischen Oberflächenmörtels mittels Kamm quer zur Fahrtrichtung ist weit verbreitet und führt zu einer hohen Griffbarkeit. Gleichzeitig ist mit diesen Texturen ein hochfrequentes Reifen/Fahrbahngeräusch verbunden, das sowohl

im Fahrzeug als auch in der Umgebung als sehr störend empfunden wird. In Regionen mit zunehmenden Anforderungen an den Lärmschutz werden diese Oberflächen häufig mittels Grinding texturiert, um die Lärminderung zu verbessern.



**Abbildung 8:** Übergang zwischen „alter“ Textur (links: Kamm quer zur Fahrtrichtung) und neu hergestellter Grindingtextur (rechts)

#### Grooving:

Wie auch das Grinding wird das Grooving seit Anfang der 1960er Jahre auf Straßen und Flughäfen eingesetzt. Im Unterschied zum Grinding beträgt der Abstand der Schneidscheiben beim Grooving jedoch mehr als 10 mm (Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Groovingwelle

Die Herstellung der Oberfläche erfolgt analog zum Grindingverfahren. Im Unterschied zum Grinding kann das Grooving jedoch sowohl in Längsrichtung

(Straßen) als auch zur Verbesserung des Wasserabflusses in Querrichtung (Flughäfen) ausgeführt werden.

#### Grinding und Grooving:

Die Verfahren Grinding und Grooving können auch kombiniert ausgeführt werden, wobei der Herstellvorgang in zwei Arbeitsschritten erfolgt. Im ersten Schritt wird ein konventionelles Grinding ausgeführt, auf das ein Grooving folgt. Abbildung 10 zeigt die Oberfläche nach einer solchen Bearbeitung.



**Abbildung 10:** Textur Grinding und Grooving

Die Kombination aus Grinding und Grooving kommt zum Einsatz, wenn der Beton mit polieranfälliger Gesteinskörnung hergestellt wurde. Die Rillen, die beim Grooving in den Beton geschnitten werden, erhöhen in diesem Fall dauerhaft die Griffbarkeit der Oberfläche.

#### Texturgrinding:

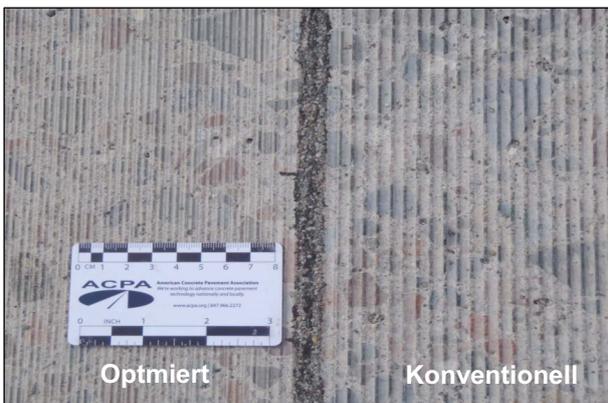
Beim Texturgrinding liegt der Fokus ausschließlich auf der Verbesserung der Griffbarkeit. Die Ebenheit der Oberfläche ist in diesem Fall nicht relevant. Im Vergleich zum konventionellen Grinding ist der Abstand der Schneidscheiben etwas größer, so dass kein vollflächiger Abtrag der Oberfläche mehr stattfindet. Somit ist eine Verbesserung der Ebenheit nicht möglich, da weder eine Stufenbildung von Platten noch lokale Unebenheiten abgeschnitten werden können. Das Grinding folgt somit den Konturen der Fahrbahnoberfläche (Abbildung 11). Dabei wird lediglich die Makrotextur zur Verbesserung der Griffbarkeit erhöht.



**Abbildung 11:** Oberfläche eines Texturgrindings

#### Optimierte Textur für Stadtstraßen:

Speziell für Stadtstraßen, die mit geringen Geschwindigkeiten befahren werden, wurde eine Grindoberfläche entwickelt, die sich durch eine hohe Gleichmäßigkeit mit einer sehr geringen Anzahl unkontrolliert gebrochener Stege auszeichnet. Dies verringert die Verletzungsgefahr bei Freizeitaktivitäten wie Fahrradfahren, Rollschuhlaufen usw. Dieses Grinding wird mit einer speziellen Schneidscheibe hergestellt, durch die eine cordartige, wenig ausgeprägte Textur entsteht (Abbildung 12). Die Oberfläche ist dauerhaft, eben und sicher.



**Abbildung 12:** Optimierte Textur für Stadtstraßen: oben: Grindingvorgang, unten: Vergleich der optimierten Textur mit einer konventionellen Grindoberfläche

#### Next Generation Concrete Surface (NGCS):

Mit dem Ziel, lärmindernde Texturen zu entwickeln und den Einfluss der Fugen auf die Geräuschemission zu untersuchen, begann im Jahr 2005 ein dreijähriges Forschungsvorhaben [SCOFIELD]. Im Labor der Purdue University wurden in einem Reifen/Fahrbahn-Versuchsstand (Tire Pavement Test Apparatus, TPTA) Betonprobekörper befestigt (Abbildung 13) und mit einer speziellen Grindvorrichtung texturiert (Abbildung 14). Dabei wurden unterschiedliche Wellenbesätze der Grindvorrichtung unter Variation der Segmentbreite und der Distanzscheibenbreite verwendet.



**Abbildung 13:** Versuchsstand [SCOFIELD]



**Abbildung 14:** Grindvorrichtung [SCOFIELD]

An den Grindoberflächen wurde anschließend das Reifen/Fahrbahngeräusch (Abbildung 15) gemessen. Zur Oberflächencharakterisierung wurden Lasermessungen durchgeführt (Abbildung 16).



**Abbildung 15:** Messung der Reifen/Fahrbahngeräusche im Labor, [SCOFIELD]

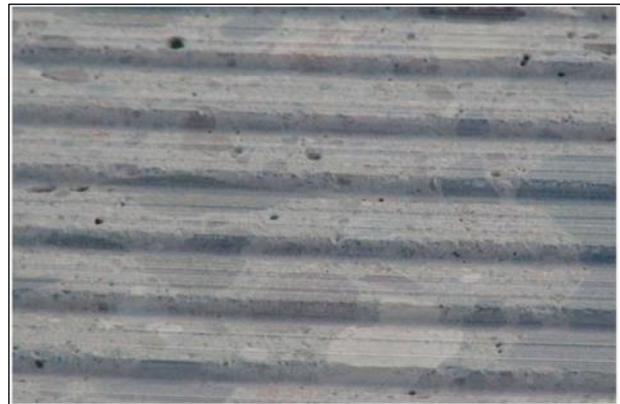


**Abbildung 16:** Lasermessung der Oberfläche im Labor, [SCOFIELD]

Die Untersuchungen ergaben, dass ein unkontrollierter Stegbruch (Abbildung 17), wie er beim herkömmlichen Grinding häufig auftritt, das Reifen/Fahrbahngeräusch signifikant erhöhte. Daher wurde eine Oberfläche mit definierter Texturgeometrie entwickelt, bei der es unabhängig von der Betonzusammensetzung zu keinem unkontrollierten Stegbruch kommt. Diese Oberfläche besteht aus 12,5 mm breiten Stegen, auf deren Oberfläche sich sehr feine Rillen befinden (Abbildung 18). Mit dieser Oberfläche, die als Next Generation Concrete Surface (NGCS) bezeichnet wird, wurden die geringsten Reifen/Fahrbahngeräusche erzielt.



**Abbildung 17:** Konventionelle Grindingoberfläche



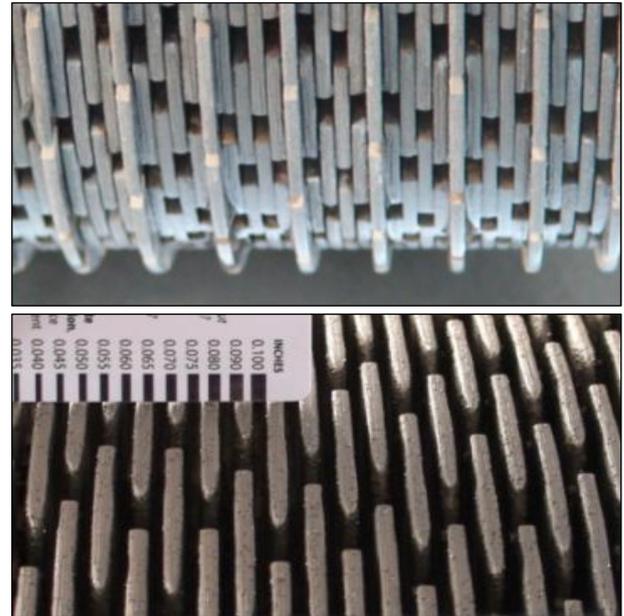
**Abbildung 18:** Next Generation Concrete Surface NGCS

Auf dem Forschungsgelände MnROAD des Departments of Transportation in Minnesota (Abbildung 19) wurden anschließend Testfelder mit unterschiedlichen Grindingoberflächen hergestellt. Das Forschungsgelände MnROAD existiert seit 1993 und besteht aus einem 5,6 km langen Hauptfahrstreifen der Interstate 94 und einem 4 km langen Rundlauf, der ausschließlich mit einem Fahrzeug definierter Last befahren wird (Abbildung 19). Auf dem Gelände werden Fahrbahnaufbauten, Baustoffe und Texturen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit, Griffbarkeit und Lärminderungseigenschaften untersucht.



**Abbildung 19:** Forschungsgelände MnROAD (Bild Mitte), entnommen aus [MnROAD] mit NGCS-Testfeld (unten)

In Abbildung 19 unten ist das Testfeld der NGCS auf dem MnROAD-Gelände dargestellt. Die NGCS kann sowohl in einem als auch in zwei Arbeitsgängen hergestellt werden. Zur Herstellung in einem Arbeitsgang besteht der Wellenbesatz aus Schneidscheiben mit unterschiedlichem Durchmesser (Abbildung 20 oben). Die im Radius ca. 2 mm kleineren Schneidscheiben sind über minimale Distanzscheiben dicht an dicht angeordnet. Sie schneiden die feinen Rillen auf die breiten Stege der Oberfläche. Mit den größeren Schneidscheiben, deren Abstand rd. 12,5 mm beträgt, werden die zum Wasserabfluss nötigen Rillen in die Oberfläche geschnitten. Der Vergleich der Wellenbesätze für eine NGCS (bei einem Arbeitsgang) und eine herkömmliche Grindoberfläche ist in Abbildung 20 dargestellt.



**Abbildung 20:** Wellenbesatz für NGCS bei einem Arbeitsgang (oben), Wellenbesatz bei konventioneller Grindtextur (unten)

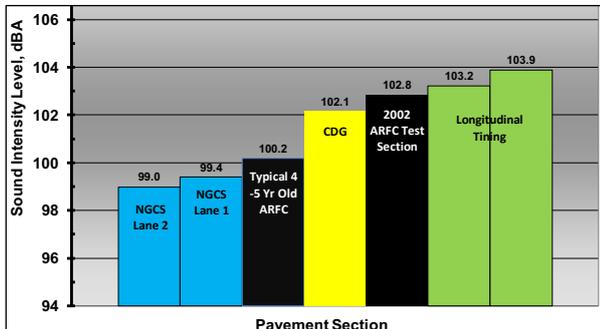
Bei der Herstellung der NGCS in zwei Arbeitsgängen wird zunächst mit den dicht angeordneten Schneidscheiben die Feintexturierung der Oberfläche erzeugt. Anschließend werden analog zum Groovingverfahren die Rillen in die Oberfläche geschnitten.

Auf den Testfeldern des MnROAD-Geländes wurde die Geräuschemission der Oberflächen mit dem OBSI-Verfahren (OBSI: On-Board Sound Intensity) gemessen (Abbildung 21). Das OBSI-Verfahren ist, wie auch das in Deutschland eingesetzte CPX-Verfahren (CPX: Close-Proximity Method), eine Nahfeldmethode, mit der das Reifen/Fahrbahngeräusch an einem genormten Reifen gemessen wird. Die Ergebnisse beider Verfahren lassen sich jedoch nicht aufeinander übertragen, da unter anderem eine unterschiedliche Anordnung der Mikrophone vorliegt. Beim OBSI-Verfahren fehlt darüber hinaus die beim CPX-Anhänger vorhandene Schallisolierung.



**Abbildung 21:** OBSI-Verfahren

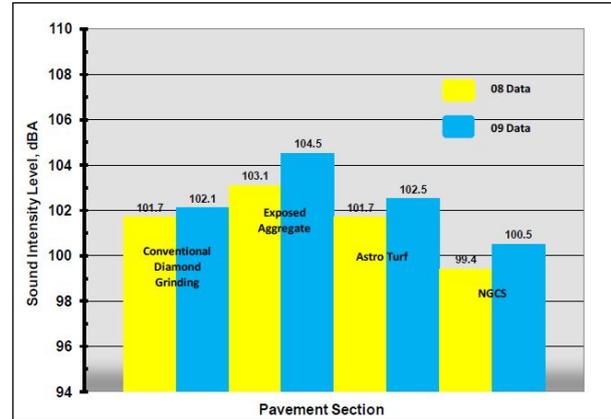
Die an der NGCS ermittelten Geräuschemissionen wurden den Messungen von Testfeldern mit anderen Texturen gegenübergestellt und sind in Abbildung 22 dargestellt.



**Abbildung 22:** Ermittelte Geräuschemissionen (OBSI-Verfahren) der unterschiedlichen Testfelder; Anmerkung: ARFC: offenporiger Asphalt, CDG: konventionelles Grinding, Longitudinal Tining: Texturierung mittels Kamm in Längsrichtung [FRENTRESS]

Mit im Mittel 99,2 dB(A) wurde bei der NGCS die geringste Geräuschemission erzielt. Sie ist um rd. 3 dB(A) niedriger als bei der konventionellen Grindingoberfläche (CDG). Auch mit dem hier verwendeten offenporigen Asphalt (ARFC = Asphalt Rubber Friction Course) war die Geräuschemission höher als bei der NGCS. Dies könnte zum einen an dem Alter der Asphaltstrecken liegen. Strecke 1 (100,2 dB(A): war zum Prüfzeitpunkt 4 - 5 Jahre und Strecke 2 (102,8 dB(A)) ca. 6 Jahre alt. Mit zunehmendem Alter verschmutzen die Poren offenporiger Asphalte, so dass die Lärminderung abnimmt. Ein weiterer Grund könnte das Messen der Geräuschemission mit einer Nahfeldmethode sein. Hier wird generell das Absorptionsverhalten offenporiger Strukturen nur in geringem Maße erfasst. Die höchsten Geräuschpegel wurden bei den mit einem Kamm in Längsrichtung texturierten Oberflächen (Longitudinal Tining) gemessen.

Auf einer Erprobungsstrecke in Kansas wurden zum Vergleich der Lärminderungseigenschaften unterschiedliche Texturen auf einer Betonfahrbahndecke hergestellt. Die Geräuschemission wurde im Jahr der Herstellung (Abbildung 23, 08 Data) und nach einem Jahr unter Verkehr (Abbildung 23, 09 Data) gemessen.



**Abbildung 23:** Ergebnisse der Geräuschemissionsmessungen auf einer Erprobungsstrecke in Kansas [SCOFIELD]

Auch hier zeigte sich, dass mit der NGCS die geringste Geräuschemission erzielt werden konnte. Nahezu gleich sind die Ergebnisse der konventionellen Grindingoberfläche und die der kunststrasentexturierten Oberfläche (Astro Turf). Am schlechtesten waren die Lärminderungseigenschaften beim Waschbeton (Exposed Aggregate). Unabhängig von der Textur erhöhte sich die Geräuschemission aller Oberflächen nach einem Jahr unter Verkehr um rd. 1 dB(A).

### 3 Erprobung unterschiedlicher Grindingtexturen auf Versuchsstrecken

Grundlage für die in Kapitel 4.2 beschriebene Kalibrierung des Rechenmodells SPERoN® auf anisotrope Texturen war die Erprobung unterschiedlicher Grindingtexturen mit einem möglichst breiten Spektrum an Steg- und Rillenbreiten einerseits und den Kombinationsmöglichkeiten von Grinding- und Groovingtexturen andererseits.

Auf drei Autobahnen in Brandenburg und Bayern konnten im Zuge von griffigkeitsverbessernden Maßnahmen mehrere Versuchsstrecken eingerichtet werden, auf denen unterschiedliche Grindingtexturen aufgebracht wurden. Aus den Ergebnissen von Textur-, Ebenheits-, Lärm- und Griffigkeitsmessungen sollen Rückschlüsse zur Realisierbarkeit optimierter Grindingtexturen auf der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens einzurichtenden Erprobungsstrecke zu ziehen sein.

#### 3.1 Variation der Texturparameter

Der Besatz der Grindingwelle mit Segmenten und Distanzscheiben unterschiedlicher Breite bietet die Möglichkeit der Variation von unterschiedlichen

Steg- und Rillenbreiten. Durch Überlagerung von Texturen unterschiedlicher Ausprägung (siehe Tabelle 1) konnten neue, in Deutschland bisher nicht gebräuchliche Texturen hergestellt werden, die den in Kapitel 2.1.4 beschriebenen NGCS-Texturen ähneln.

BAB	von km	bis km	Textur 1		Textur 2		
			Segment-	Segment-	Rillen-		
			breite	ab-		breite	ab-
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
A 13, RF Dresden	7,800	16,000	2,8	1,8			
	7,800	8,000	2,8	1,8	2,8	10,0	3,0
	10,450	10,650	2,8	1,8	2,8	15,0	3,0
	14,700	14,900	2,8	1,8	2,8	20,0	3,0
A 13, RF Berlin	16,000	7,800	3,2	2,2			
	16,000	15,800	3,2	2,2	3,2	20,0	3,0
	14,700	14,500	3,2	2,2	3,2	20,0	4,0
	13,025	12,825	3,2	2,2	3,2	25,0	3,0
	10,900	10,700	3,2	2,2	3,2	25,0	4,0
A 92, RF München	17,000	16,500	2,8	2,0	2,8	16,4	3,0
A 93, RF Regensburg	127,400	129,550	2,8	1,5			
	129,350	129,550	2,8	1,5	2,8	13,0	3,0
A 93, RF Hof	129,550	127,400	2,8	1,5			
	129,550	129,350	2,8	1,5	2,8	13,0	3,0

**Tabelle 1:** Texturvarianten zur Kalibrierung des Rechenmodells SPERoN®

### 3.2 Vorbereitung der Ausschreibung der Grindingmaßnahmen

Zusätzlich zu den Mindestanforderungen zur Wiederherstellung der Griffigkeit wurden in die Baubeschreibungen Forderungen formuliert, um eine hohe Qualität der erzeugten Grindingtexturen in Bezug auf Ebenheit, Griffigkeit und der zu erwartenden Lärminderung zu gewährleisten. Zu den Forderungen, die im Verlaufe des Forschungsvorhabens entsprechend den neuen Erkenntnissen angepasst wurden, gehörten folgende Punkte:

- Die Schneidtiefe war so anzupassen, dass die vorhandene Besenstrichtextur vollständig beseitigt wurde.
- In den Übergangsbereichen zum Bestand war die Schneidtiefe derart anzupassen, dass keine Stufen und Verwerfungen entstehen.
- Die vorhandene Gradienten- und Querneigung war beizubehalten.
- Zur Reduzierung der Anzahl von Überlappungsbereichen musste die Grindingmaschine über eine Wellenbreite von mindestens 1,00 m verfügen.
- Die an den Rändern der einzelnen Arbeitsspuren in Längsrichtung auftretenden Überlappungsbereiche sollten 5,0 cm nicht überschreiten.

- Überlappungsbereiche in den Rollspuren des ersten Fahrstreifens waren nicht zulässig.
- Die Grindingmaschine musste mit einer Vorrichtung zur Direktabsaugung des beim Schneidvorgang anfallenden Materials ausgerüstet sein, so dass keine Schneidschlämme auf die Fahrbahn des öffentlichen Verkehrs gelangen konnten.
- Zur genauen Kontrolle der Schneidtiefe musste das Grindinggerät über eine seitliche Abtastung verfügen.
- Die mittlere Profiltiefe (MPD) nach dem Grinding musste mindestens 0,4 mm betragen.
- Mit dem Grinding der Betonoberfläche sollten Verbesserungen der akustischen Eigenschaften erreicht werden. Mindestanforderung war eine Lärminderung von -2 dB(A).

Zur Vorbereitung der Baubeschreibungen wurden Streckenbefahrungen und -begehungen unternommen, um festzustellen, wo Standorte für die SPB- und Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen möglich sind. Die Bereiche für die Sondertexturen sollten an diesen Standorten in einer Länge von 200 m vorgeesehen werden.

Die Leistungsverzeichnisse für die Baumaßnahmen wurden dem nunmehr erforderlichen Leistungsspektrum entsprechend angepasst.

### 3.3 Fachliche Begleitung der Grindingmaßnahmen vor Ort

Die Einhaltung der vereinbarten Texturparameter ist für den weiteren Fortgang des Forschungsvorhabens von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grunde wurden die Grindingmaßnahmen fachlich begleitet. Mit Hilfe der Texturmessung mit dem Messgerät ELAtextur war eine ständige Einflussnahme auf das ausführende Personal im Hinblick auf die in der Baubeschreibung vereinbarten Qualitätskriterien möglich.

#### 3.3.1 Grindingmaßnahme A 93

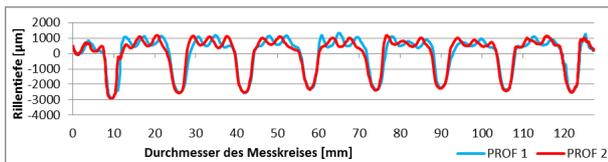
Auf einem nahe einer Ortschaft liegenden Teilstück der A 93 zwischen km 127,4 und 129,55 mit Besenstrichtextur wurde auf beiden Richtungsfahrbahnen eine lärmindernde Maßnahme notwendig. Das dafür vorgesehene Grinding der Fahrbahnoberfläche fand im August 2013 statt.

In einem ersten Grindingvorgang sollte die Betonoberfläche auf der gesamten Länge mit einer Segmentbreite von 2,8 mm und einem Segmentabstand 1,5 mm geschnitten werden. Die Schneidtiefe war so anzupassen, dass die vorhandene Besenstrichtextur vollständig beseitigt wird. Abbildung 24 zeigt die Fahrbahnoberfläche nach dem ersten Grindingvorgang.



**Abbildung 24:** Grindingtextur nach erstem Schneidvorgang auf der A 93

In einem zweiten Grindingvorgang (Grooving) war die Betonoberfläche auf 200 m Länge mit einer Segmentbreite von 2,8 mm und einem Segmentabstand von 13,0 mm mit einer Schneidtiefe von 3,0 mm zu grinden. Ein Laserprofil und ein Foto der fertigen Grindingtextur sind in Abbildung 25 und Abbildung 26 zu sehen.



**Abbildung 25:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 93, RF Hof, km 129,410



**Abbildung 26:** Grindingtextur nach zweitem Schneidvorgang auf der A 93

Am 30. und 31. Oktober 2013 fanden in situ Messungen der Fahrbahnoberflächentextur (Laserprofilometer- und 3D-Messung) und des texturinduzierten Strömungswiderstands sowie Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen auf dem oben beschriebenen Grindingabschnitt statt. Tabelle 2 gibt Auskunft über den Ablauf der akustischen Messungen. Die in situ und CPB-Messungen wurden auf dem rechten Fahrstreifen jeweils in der rechten Radrollspur

durchgeführt. Die Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen wurden mit Geschwindigkeiten von 80 km/h und 100 km/h mit den Reifen EcoContact und PremiumContact vorgenommen. Aufgrund der vorliegenden Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h konnten in diesem Abschnitt aus Sicherheitsgründen keine Messfahrten mit 120 km/h durchgeführt werden.

Abschnitt	Koordinaten der Messstelle	Messung	Messzeit
FR Nord zw. AS Wernberg/Köblitz und AS Luhe-Wildenau, km 129+370	Breite: 49.577922° Länge: 12.126216°	in situ	30.10.2013 08:45-13:00h
		CPB Conti Premium-Contact	30.10.2013 19:10-20:25h
		CPB Conti EcoContact	31.10.2013 10:10-12:10h
FR Süd zw. AS Luhe-Wildenau und AS Wernberg/Köblitz, km 129+370	Breite: 49.577981° Länge: 12.12598°	in situ	30.10.2013 13:00-16:40h
		CPB Conti Premium-Contact	30.10.2013 19:10-20:25h
		CPB Conti EcoContact	31.10.2013 10:10-12:10h

**Tabelle 2:** Akustische Messungen auf dem Abschnitt der Grindingmaßnahme A 93



**Abbildung 27:** Aufstellung der Messsysteme für die Texturmessung: 3D-Kamera (hinten) und Laserprofilometer (vorne)

### 3.3.2 Grindingmaßnahme A 92

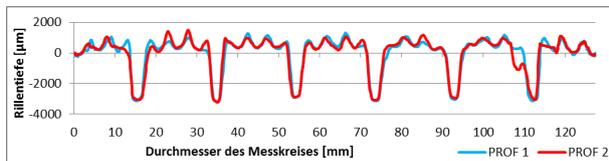
Ebenfalls im Ergebnis der ZEB 2013 wurde auf der A 92 in Fahrtrichtung München zwischen km 17,0 und km 16,5 zur Verbesserung der Griffigkeit eine Grindingmaßnahme notwendig. Das Grinding der vollen Fahrbahnbreite fand im November 2013 statt.

Nach den an diese spezielle Maßnahme angepassten Vergabeunterlagen sollte die Betonoberfläche in einem ersten Grindingvorgang mit einer Segmentbreite von 2,8 mm und einem Segmentabstand 2,0 mm geschnitten werden. Die Schneidtiefe war

so anzupassen, dass die vorhandene Besenstrich-  
textur vollständig beseitigt wird.

In einem zweiten Grindingvorgang (Grooving) sollte mit einer Segmentbreite von 2,8 mm und einem Segmentabstand von 15,0 mm mit einer Schneid-  
tiefe von 3,0 mm geschnitten werden.

Die Bestückung der Welle mit Schneidscheiben unterschiedlichen Durchmessers ermöglichte die Herstellung beider Texturen in einem Arbeitsgang und schuf im Ergebnis eine sehr einheitliche Struktur beider überlagerter Texturen (Abbildung 28 und Abbildung 29). Der Segmentabstand der Schneid-  
scheiben größeren Durchmessers betrug geräte-  
spezifisch 16,0 mm.



**Abbildung 28:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 92, RF München, km 16,8



**Abbildung 29:** Grindingtextur auf der A 92, RF München, km 16,8

Die Anzahl der Überlappungsbereiche konnte weiter reduziert werden, weil die eingesetzte Grinding-  
maschine über eine Wellenbreite von 1,40 m verfügte.

Unebenheiten in Längs- und Querrichtung im nachträglich angebauten Hauptfahrstreifen und Seitenstreifen sowie der Höhenversatz zum Bestand (Abbildung 30) führten in diesen Bereichen zum Teil zu einer unregelmäßigen Textur (Abbildung 31). Bei den folgenden Untersuchungen war dies zu berücksichtigen.



**Abbildung 30:** Unebenheiten im nachträglich angebauten Hauptfahrstreifen und Seitenstreifen A 92, RF München, km 16,7



**Abbildung 31:** Unregelmäßige Textur im nachträglich angebauten Hauptfahrstreifen und Seitenstreifen A 92, RF München, km 16,7

Die in situ-Messungen der Fahrbahnoberflächen-  
textur (Laserprofilometer- und 3D-Messung) und des texturinduzierten Strömungswiderstands auf der A 92 wurden am 25. März 2014 durchgeführt. Die Messungen der kontrollierten Vorbeifahrt auf dem oben beschriebenen Grindingabschnitt fanden in der Nacht 03./04. April 2014 statt. Tabelle 3 gibt Auskunft über den Ablauf der akustischen Messungen. Die in situ und CPB-Messungen wurden auf dem rechten Fahrstreifen jeweils in der rechten Radrollspur durchgeführt (Abbildung 32). Die Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen wurden mit Geschwindigkeiten von 80, 100 und 120 km/h mit den Reifen EcoContact, PremiumContact und Winter-  
Contact vorgenommen.

Abschnitt	Koordinaten der Messstelle	Messung	Messzeit
Fahrtri. Berlin, km 16+850	Breite: 48.331743° Länge: 11.664368°	in situ	25.03.2014 10:45-14:00h
		CPB	03.04.2014 21:00-03:00h

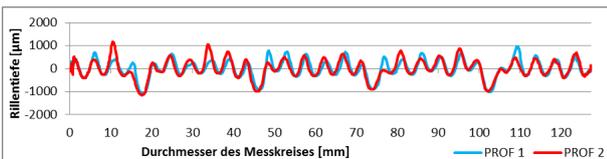
**Tabelle 3:** Akustische Messungen auf dem Abschnitt der Grindingmaßnahme A 92



**Abbildung 32:** Abschnitt der Grindingmaßnahme A 92 während der Durchführung der in situ-Messungen (ca. km 16,75)

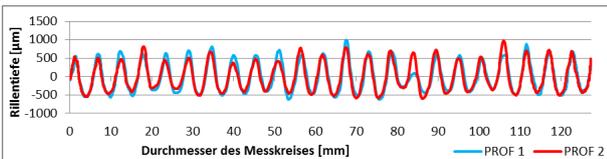
### 3.3.3 Grindingmaßnahme A 13

Auf der A 13 sollte zur Wiederherstellung der Griffigkeit von km 7,8 bis km 16,0 auf der Richtungsfahrbahn Dresden im ersten Fahrstreifen eine Grindingtextur mit einer Stegbreite von 1,8 mm und einer Rillenbreite von 2,8 mm aufgebracht werden. Die Schneidtiefe wurde so angepasst, dass die bestehende Jutetuchtextur vollständig beseitigt wurde. Abbildung 33 zeigt ein Laserprofil der Grindingtextur bei km 8,2. Deutlich erkennbar ist die Bestückung der Grindingwelle mit unterschiedlich abgenutzten Schneidscheiben, so dass bei jeder siebenten Rille ein leichter Grooving-Effekt entstanden ist.



**Abbildung 33:** Laserprofil der Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 8,2

Auf der Richtungsfahrbahn Berlin wurde im ersten Fahrstreifen von km 16,0 bis km 7,8 eine Grindingtextur mit einer Stegbreite von 2,2 mm und einer Rillenbreite von 3,2 mm aufgebracht. Abbildung 34 zeigt das Laserprofil und Abbildung 35 einen Überlappungsbereich der entstandenen Textur.



**Abbildung 34:** Laserprofil der Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 15,6

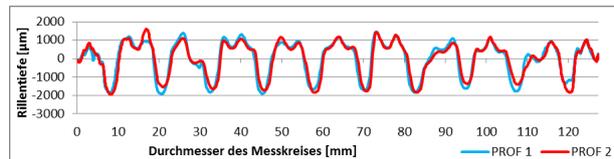


**Abbildung 35:** Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 10,5

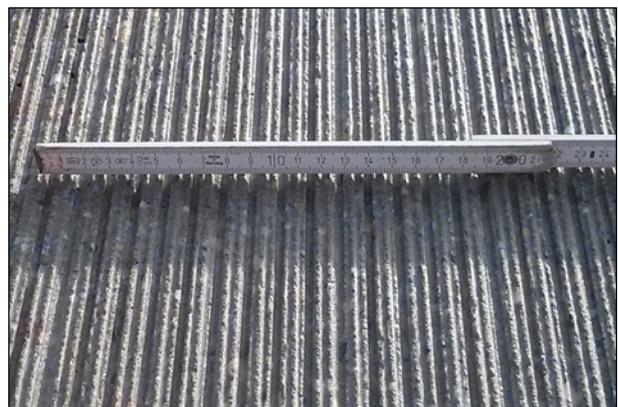
Auf 7 Teilabschnitten von jeweils 200 m Länge wurden Sondertexturen derart aufgebracht, dass die „normal“ ge grindete Oberfläche in einem zweiten Grindingvorgang (Grooving) mit einem Segmentabstand zwischen 10 und 25 mm und einer Schneidtiefe zwischen 3 und 4 mm bearbeitet wurde. Die Vergabeunterlagen wurden entsprechend den Anforderungen angepasst.

#### A 13, RF Dresden, von km 7,8 bis km 8,0

Der zweite Grindingvorgang (Grooving) zwischen km 7,8 bis km 8,0 auf der Richtungsfahrbahn Dresden wurde mit einer Segmentbreite von 2,8 mm und einem Segmentabstand von 10,0 mm bei einer Schneidtiefe von 3,0 mm vorgenommen (Abbildung 36 und Abbildung 37).



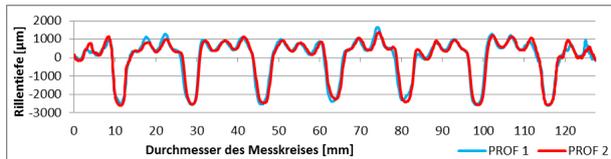
**Abbildung 36:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Dresden, km 7,9



**Abbildung 37:** Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 7,9

### A 13, RF Dresden, von km 10,45 bis km 10,65

Die Sondertextur zwischen km 10,45 bis km 10,65 auf der Richtungsfahrbahn Dresden wurde mit einer Segmentbreite von 2,8 mm und einem Segmentabstand von 15,0 mm bei einer Schneidtiefe von 3,0 mm geschnitten. Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen ein Laserprofil und ein Foto der fertigen Grindingtextur.



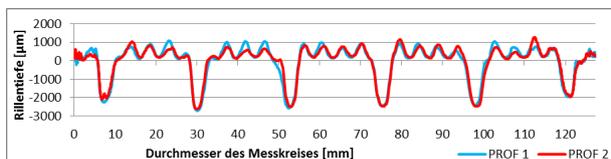
**Abbildung 38:** Laserprofil der Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 10,5



**Abbildung 39:** Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 10,5

### A 13, RF Dresden, von km 14,7 bis km 14,9

Das Grooving wurde hier mit einer Segmentbreite von 2,8 mm und einem Segmentabstand von 20,0 mm bei einer Schneidtiefe von 3,0 mm durchgeführt (Abbildung 40 und Abbildung 41).



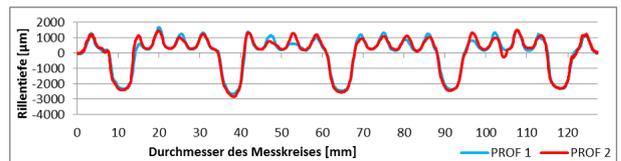
**Abbildung 40:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Dresden, km 14,8



**Abbildung 41:** Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 14,8

### A 13, RF Berlin, von km 10,9 bis km 10,7

Der Groovingvorgang fand mit einer Segmentbreite von 3,2 mm und einem Segmentabstand von 25,0 mm bei einer Schneidtiefe von 4,0 mm statt (Abbildung 42 und Abbildung 43).



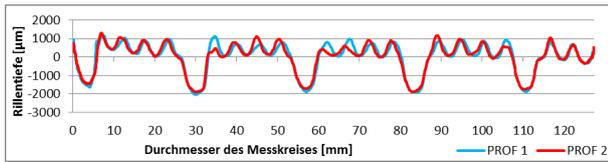
**Abbildung 42:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Berlin, km 10,8



**Abbildung 43:** Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 10,8

### A 13, RF Berlin, von km 13,025 bis km 12,825

Der zweite Grindingvorgang (Grooving) wurde hier mit einer Segmentbreite von 3,2 mm und einem Segmentabstand von 25,0 mm bei einer Schneidtiefe von 3,0 mm durchgeführt (Abbildung 44 und Abbildung 45).



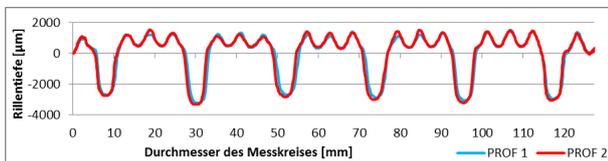
**Abbildung 44:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Berlin, km 12,95



**Abbildung 45:** Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 12,95

#### A 13, RF Berlin, von km 14,7 bis km 14,5

Hier wurde das Grooving mit einer Segmentbreite von 3,2 mm, einem Segmentabstand von 20,0 mm und einer Schneidtiefe von 4,0 mm vorgenommen (Abbildung 46 und Abbildung 47).



**Abbildung 46:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Berlin, km 14,6

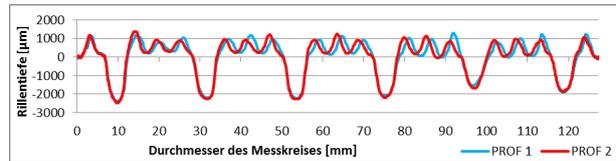


**Abbildung 47:** Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 14,6

#### A 13, RF Berlin, von km 16,0 bis km 15,8

Der zweite Grindingvorgang (Grooving) wurde mit einer Segmentbreite von 3,2 mm und einem Segmentabstand von 20,0 mm bei einer Schneidtiefe

von 3,0 mm vorgenommen (Abbildung 48 und Abbildung 49).



**Abbildung 48:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Berlin, km 15,9



**Abbildung 49:** Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 15,9

## 3.4 Oberflächentextur

### 3.4.1 Messungen mit ELAtextur

#### 3.4.1.1 Messmethode

Mit dem Messgerät ELAtextur wird die Grobtextur von Fahrhahnoberflächen charakterisiert. Der kreisende Lasersensor des Messgeräts tastet die Fahrhahnoberfläche mit einer horizontalen Auflösung von 30 µm und einer vertikalen Auflösung von 0,3 µm ab (Abbildung 50).

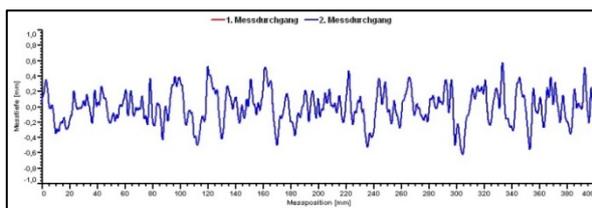


**Abbildung 50:** Texturmessung mit ELAtextur

Der Umfang der Kreisbahn beträgt entweder 400 mm (in Anlehnung an die Sandfleck-Methode) oder optional 200 mm (in Anlehnung an den Durchmesser des Prüfummis des Ausflussmessers nach Moore). Die ermittelte Oberflächenkurve ermöglicht die Berechnung des MPD- und ETD-Werts auf der Basis von Kreissegmenten der Textur gemäß [DIN EN ISO 13473-1]. In dieser Norm wird als Bezugsmaß für die Berechnung der mittleren Profiltiefe eine Grundlinie von 100 mm gewählt. Während der Lasersensor die Kreisbahn abtastet, werden so 4 (bei Kreisbahnumfang von 400 mm) bzw. 2 (bei Kreisbahnumfang von 200 mm) voneinander unabhängige MPD-Werte ermittelt und bereits in der Messelektronik automatisch in einen mittleren MPD-Wert der Messung der Kreisbahn umgerechnet. Aus dem mittleren MPD-Wert ergibt sich nach [DIN EN ISO 13473-1] der ETD-Wert zu:

$$\text{ETD} = 0,2 \text{ mm} + 0,8 \text{ MPD}$$

Der ETD-Wert ist nach [DIN EN ISO 13473-1] mit der aus dem sog. Sandfleckverfahren ermittelten mittleren Oberflächentexturtiefe MTD (MTD = Mean Texture Depth) vergleichbar. Das Abtasten der Kreisbahn und die Berechnung der zugehörigen MPD- und ETD-Werte erfolgen während der Messung zweimal. Aus den Werten beider Messungen wird erneut der Mittelwert gebildet, der dann das endgültige Messergebnis darstellt. Die in [DIN EN ISO 13473-1] geforderte Gesamtprüflänge von 1 m für einen Prüfabschnitt wird durch dreimaliges Wiederholen der Prüfung (bei Kreisbahnumfang von 400 mm) unter leichtem Versatz des Messgeräts erreicht. Mit einer speziellen Software können anschließend die Messdaten auch graphisch ausgewertet werden (s. Abbildung 51).



**Abbildung 51:** Profillinie einer (Doppel)-Messung mit ELAtextur

### 3.4.1.2 Durchführung der Messungen und Messergebnisse

Die Messungen der Mittleren Profiltiefe mit dem Messgerät ELAtextur erfolgten jeweils auf den für die Messung der Lärminderung vorgesehenen Streckenabschnitten mit Sondertextur.

Auf der A 93 wurde die Texturmessung mit dem Messgerät ELAtextur von der Autobahndirektion Nordbayern selbst durchgeführt. Die Ergebnisse für

die RF Hof wurden uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Die Messungen auf der A 92 und der A 13 wurden nach folgendem Schema durchgeführt:

- Messung im Bereich der SPB-Standorte auf 200 m Streckenlänge (Ausnahme A 92: 500 m)
- Messung in jeder Grindingspur
- Jede fünfte Platte eine Messung

Im Einzelnen wurden die in Tabelle 4 aufgeführten statistischen Kennwerte der MPD-Messungen erzielt:

Strecke	FR	Btriebskilometer	∅	S	V	Min	Max
			[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
A 13	Süd	7,8 - 8,0	1,53	0,18	11,73	1,09	1,9
A 13	Süd	10,45 - 10,65	1,26	0,18	13,97	0,91	1,83
A 13	Süd	14,7 - 14,9	0,91	0,18	19,78	0,53	1,23
A 13	Nord	10,9 - 10,7	1,31	0,13	10,18	1,07	1,75
A 13	Nord	13,025 - 12,825	1,56	0,15	9,91	1,3	1,95
A 13	Nord	14,7 - 14,5	1,56	0,15	9,91	1,3	1,95
A 13	Nord	16,0 - 15,8	1,32	0,16	11,99	1,06	1,86
A 92	West	17,0 - 16,5	1,33	0,24	17,89	0,65	1,86
A 93	Nord	129,535 - 129,260	1,24	0,17	13,52	1,02	1,67
A 93	Süd	129,300 - 129,500	-	-	-	-	-

**Tabelle 4:** Ergebnisse der Texturmessungen auf den Versuchsstrecken

In allen Fällen ist die mittlere Profiltiefe sehr hoch, was auf die 3 – 4 mm tiefen Groovingrillen zurückzuführen ist.

## 3.4.2 Texturmessung mit Laserprofilometer

### 3.4.2.1 Messmethode

Fahrbahntexturen setzen sich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Rauigkeitswellenlängen mit unterschiedlichen Amplituden zusammen, die in Texturspektren zusammengefasst werden können. Diese Texturspektren weisen typischerweise ausgeprägte Maxima auf. Die Wellenlänge  $\lambda_{\max}$  und die Rauigkeitstiefe  $R_{\max}$  im Maximum des Texturspektrums charakterisieren die Fahrbahnrauigkeit.

Das von Müller-BBM eingesetzte berührungslose Messverfahren mit Laserprofilometer ermöglicht eine zerstörungsfreie Ermittlung der Oberflächenrauigkeit (Makrotextur) von Fahrbahndeckschichten im fertig eingebauten Zustand.

Die Messung und Beschreibung der Oberflächenrauigkeit erfolgt nach [DIN EN ISO 13473-1].

Die Fahrbahnoberfläche wird mit einem Triangulationslasermesssystem über eine Länge von 2,0 m abgetastet. Es werden üblicherweise 6 parallele Spuren in einem Abstand von 20 mm gemessen. Je nach Erfordernis können die Anzahl und der Abstand der zu messenden Texturprofile jedoch auch anders festgelegt werden.

Vor den Messungen erfolgt jeweils eine gründliche, trockene Reinigung des Fahrbahnbelages an der Messstelle. Bohrkernentnahmen sind zur Durchführung der Texturmessungen nicht erforderlich.

Eine Schemaskizze befindet sich in Abbildung 52. Abbildung 53 zeigt das Messgerät im Einsatz.

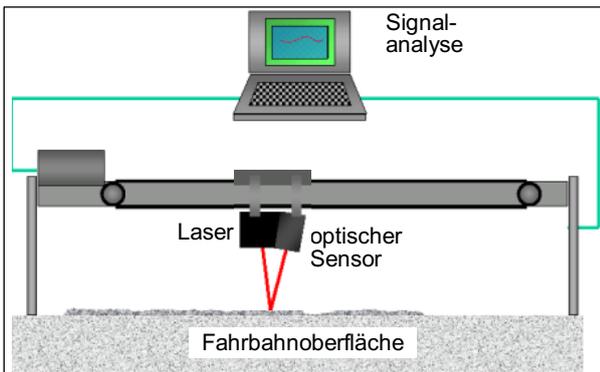


Abbildung 52: Prinzipskizze des Laserprofilometers



Abbildung 53: Laserprofilometer im Einsatz (A 13, MQ2)

Die Auflösung des verwendeten Messsystems beträgt  $200\ \mu\text{m}$  horizontal und  $8\ \mu\text{m}$  vertikal. Aus dem aufgenommenen Fahrprofil wird durch Fourieranalyse (FFT) die Rauigkeitstiefe als Funktion der Texturwellenlänge berechnet. Die effektive Rauigkeitstiefe  $R_{\text{eff}}$  ist der Effektivwert der Profiltiefe im jeweiligen Wellenlängenband.

### 3.4.2.2 Durchführung der Messungen

Die Texturmessungen erfolgen auf trockener Fahrbahn mit einem Laserprofilometer über eine Länge von zwei mal 2,0 m, wobei die beiden Messungen

mit einem Überlappungsbereich von ca. 5 cm unmittelbar aneinander anschließen. Die Texturprofile wurden in Fahrtrichtung aufgenommen, die Messung wurde jeweils in der rechten Rollspur des ersten Fahrstreifens durchgeführt. Pro Einzelmessung wurden insgesamt 190 Spuren im Abstand von 1 mm aufgenommen, womit sich quasi eine 3D-Abtastung ergibt.

Zusätzlich erfolgte an jedem Messquerschnitt eine Messung in Querrichtung, bei der 6 Spuren im Abstand von 20 mm aufgenommen wurden.

### 3.4.2.3 Auswertung

Als wesentliche Grundlage für die Bewertung der Ergebnisse erfolgen bei isotropen Oberflächen die schmalbandige Spektralanalyse der gemessenen Texturprofile und die Darstellung der Ergebnisse in Form von Wellenlängenspektren in Terzbandbreite. Für die Wellenlängen von 1 mm bis 500 mm werden die mittleren Effektivwerte der Rauigkeitstiefe  $R_{\text{eff}}$  in Form eines Rauigkeitsspektrums angegeben.

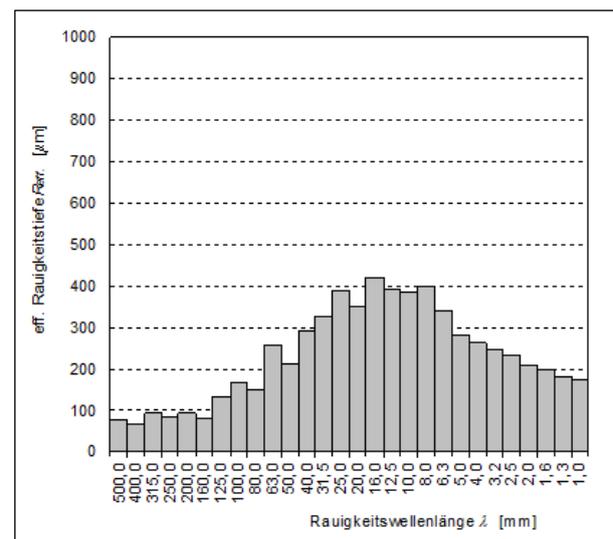


Abbildung 54: Beispiel für ein Texturspektrum

Außerdem werden für isotrope Oberflächen üblicherweise folgende Texturkennwerte pro Messstelle angegeben:

- mittlere Profiltiefe MPD
- geschätzte Texturtiefe ETD
- Effektivwert der Profiltiefe  $R_{\text{eff}}$  (Breitbandwert)
- Gestaltfaktor  $g$

Diese Kenngrößen sind jedoch ausschließlich für isotrope Oberflächen definiert. Im hier vorliegenden Fall anisotroper Oberflächen ist die Angabe der o. g. Kennwerte nicht zielführend, da sich hieraus aufgrund der speziellen Textur mit Groovingrillen keine adäquaten Rückschlüsse auf die akustischen

Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen ziehen lassen.

#### 3.4.2.4 Messergebnisse

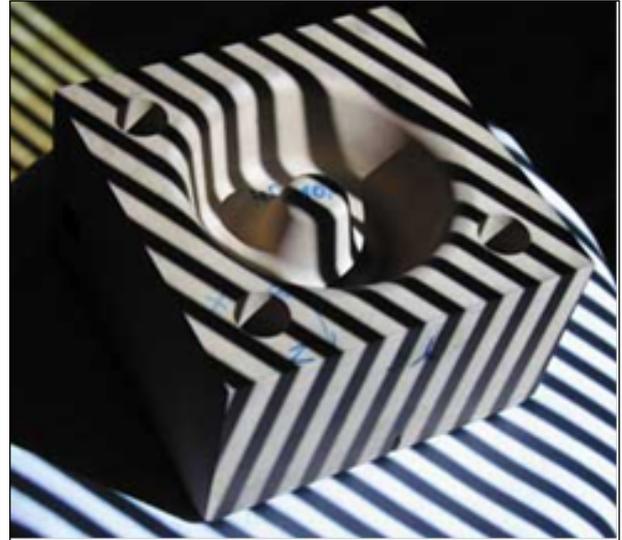
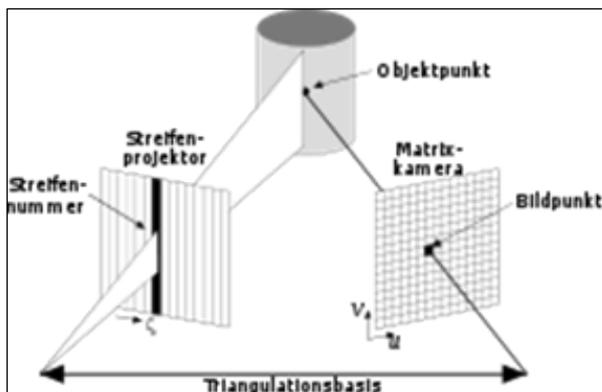
Ausgehend von der Annahme, dass das Rollgeräusch auf den Grindingoberflächen im Wesentlichen von der Textur auf den Stegen der Oberfläche bestimmt wird, weil nur diese mit dem Reifen in Kontakt kommen, wurden hier auf 6 Spuren auf den Stegen jeder Oberfläche ausgewählt, die für die Berechnung des jeweils zu erwartenden Vorbeirollpegels mit dem Rechenmodell SPERoN® herangezogen wurden. Die Ergebnisse der entsprechenden SPERoN®-Berechnungen sind in Kapitel 4.2.2 dargestellt.

### 3.4.3 3D-Texturmessung

#### 3.4.3.1 Messmethode

Das von Müller-BBM eingesetzte Verfahren zur 3D-Texturmessung beruht auf dem Verfahren der Streifenprojektion.

Streifenprojektion bezeichnet die flächenhafte Projektion von Streifenmustern auf einem Objekt, die Aufzeichnung des Schnittlinienbilds der Intensitätsverteilung mit der Objektoberfläche mittels eines flächenhaften Detektors und hierüber die bildhafte Triangulation der gesamten Messszene zur Bestimmung der 3D-Koordinaten der Objektoberfläche. Das Objekt bewirkt im Strahlengang eine Phasenmodulation des Streifenmusters.



**Abbildung 55:** Prinzip der Streifenprojektion. Die Intensitäten der projizierten Streifen werden vom Objekt phasenmoduliert und von einer Digitalkamera registriert (Wikipedia und Fraunhofer IOF)

Die Phasenmessung mit Phasenverschiebungen hat den Vorteil, dass Fehlereinflüsse durch unterschiedliche Reflektions- und Streueigenschaften der Oberfläche oder inhomogene Beleuchtung stark reduziert werden können.

Die Phasenbestimmung ist nicht eindeutig, weil sie nur modular erfolgen kann. Um absolute Phasenmessung zu ermöglichen, werden bestimmte Bildsequenzen projiziert (via Graycode-Algorithmen (z.B. Verdoppelung der Streifendichte von Bild zu Bild), Farbkodierungen und Mehrwellenlängenverfahren (Heterodynphasenschiebverfahren). Eine Selbstkalibrierung des Messsystems ist möglich, z. B. durch das Projizieren einer um 90 Grad verdrehten Sequenz und anschließender photogrammetrischer Auswertung.

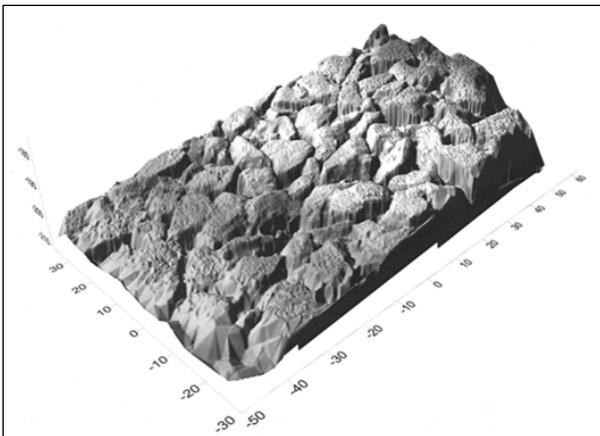
Das System erlaubt flächenhafte Aufnahmen von Straßenoberflächen, wobei die Einzelbilder Bereiche von ca. 6 cm x 9 cm abdecken. Das Zusammensetzen von Einzelbildern erlaubt die Rekonstruktion und statistische Untersuchung größerer Belagsbereiche.

Nach der Ausrichtung des Sensors und der Grundeinstellung des Systems wird zunächst eine Folge von Streifen auf die Fahrbahnoberfläche projiziert. Die einzelnen Streifenbilder werden von der Systemsoftware analysiert, woraus eine Punktwolke von Oberflächenpunkten als (x,y,z)-Triplets generiert und abgespeichert wird (Abbildung 56). Diese Punktwolke wird dann mittels Software auf ein Rechteckgitter abgebildet (Abbildung 57). Dieser Interpolationsschritt (erneut illustriert in Abbildung 58) ist wichtig, damit effiziente Algorithmen der digitalen Signal- und Bildbearbeitung für die statistische Untersuchung der Textur eingesetzt werden können.

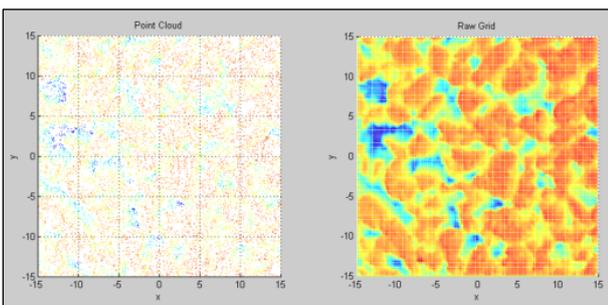
Liegen die Daten auf einem Gitter vor, lassen sich entlang beliebiger Orientierungen, linien- oder flächenhaft statistische Parameter der Texturoberfläche berechnen. Dazu gehören die Standardwerte wie die Mean Profile Depth (MPD), Estimated Texture Depth (ETD) und der Effektivwert der Rauigkeit (Root Mean Square, RMS). Aber auch der Gestaltfaktor, das Terzspektrum, Korrelationslängen oder die fraktale Dimension der Textur und andere Größen lassen sich berechnen.



**Abbildung 56:** Punktwolke von einer grobkörnigen Fahrbahnoberfläche der Dimension 6 mal 12 Zentimeter



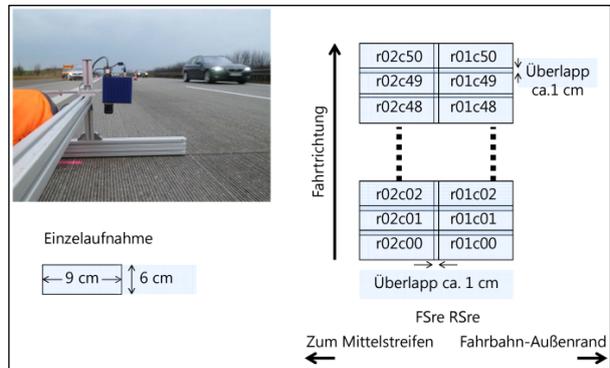
**Abbildung 57:** Texturoberfläche von Abbildung 56 nach Interpolation auf ein Rechteckgitter



**Abbildung 58:** Illustration des Interpolationsschrittes von der irregulären Punktwolke (links) auf ein reguläres Gitter (rechts) auf einer Fläche von 15 mal 15 Millimetern

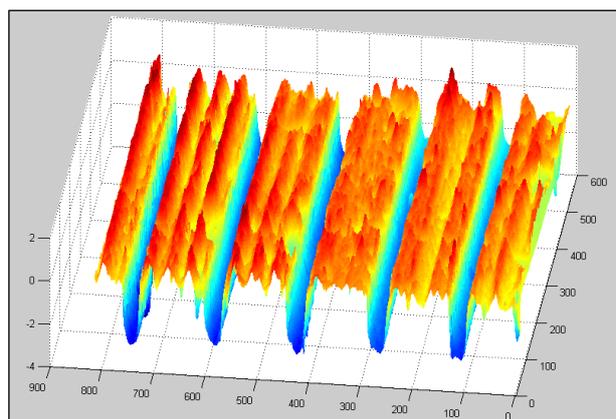
### 3.4.3.2 Durchführung der Messungen

Die Messungen der Fahrbahntextur mit der 3D-Kamera wurden jeweils exakt auf Höhe des CPB-Messquerschnitts in der rechten Rollspur des rechten Fahrstreifens durchgeführt. Es wurde jeweils eine Fläche von 4 m x 0,15 m aufgenommen. Dabei wurde zwischen den Einzelaufnahmen jeweils ein Versatz von 5 cm in Fahrtrichtung und 8 cm quer zur Fahrtrichtung gewählt, so dass sich zwischen zwei nebeneinander liegenden Einzelaufnahmen ein Überlapp von 1 cm ergab, der ein Aneinanderfügen der Einzelaufnahmen zu größeren Flächen (sog. Stitching) ermöglicht. Abbildung 59 enthält eine schematische Darstellung des Messaufbaus und der Anordnung der Einzelaufnahmen, eine Einzelaufnahme ist in Abbildung 60 gezeigt. Ein Beispiel für eine aus 100 Einzelaufnahmen zusammengefügte 3D-Textur ist in Abbildung 61 dargestellt.

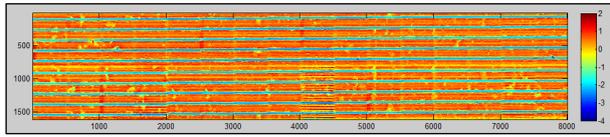


**Abbildung 59:** Durchführung der 3D-Texturmessungen: Messaufbau und Anordnung der Einzelaufnahmen

### 3.4.3.3 Messergebnisse



**Abbildung 60:** Messergebnis der 3D-Texturmessungen: Einzelaufnahme



**Abbildung 61:** Messergebnis der 3D-Texturmessungen: Aus Einzelaufnahmen zusammengesetzte Textur von 2 m Länge

### 3.4.4 Messung des texturinduzierten Strömungswiderstandes

#### 3.4.4.1 Messmethode

Für die Untersuchungen wurde ein Messgerät zur zerstörungsfreien Messung des statischen Strömungswiderstands von Fahrbahnoberflächen in situ eingesetzt. Das Messsystem wurde im Rahmen des Teilprojekts TP 3122 des Forschungsvorhabens [LEISTRA] entwickelt.

Das verwendete Verfahren zur Bestimmung des Strömungswiderstands in situ lehnt sich an das Prüfstandsverfahren für Probekörper der [DIN EN 29053] an.

Zur in situ-Messung wird ein Messfuß auf die zu untersuchende Fahrbahnoberfläche gestellt, die Verhältnisse im Reifenaufstandspunkt werden durch einen elastischen Ring in der Aufstandsfläche und eine angepasste Vorlast nachgebildet. Ein Durchflussregler erzeugt einen konstanten Volumenfluss  $q$  durch eine Querschnittsfläche  $A$ , der beim Durchströmen der Probe auftretende Differenzdruck  $\Delta p$  wird gemessen. Aus dem Volumenfluss  $q$  und dem Differenzdruck  $\Delta p$  lässt sich die Strömungsresistenz  $\Xi = \Delta p / q$  der Probe berechnen.

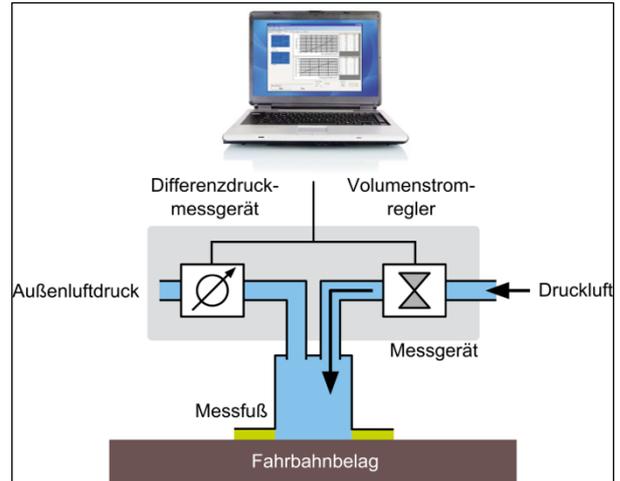
Da  $q$  wegen  $q = u \cdot A$  ( $u$  = Strömungsgeschwindigkeit) von der Fläche des durchströmten Querschnitts abhängt, ist auch die Strömungsresistenz  $\Xi$  eine vom durchströmten Querschnitt  $A$  abhängige Größe. Durch die Definition des spezifischen Strömungswiderstands  $R_s^*$  in situ.

$$R_s^* = \Xi \cdot A = \frac{\Delta p}{u}$$

wird diese Abhängigkeit von den Abmessungen der Apparatur behoben.

Zur Unterscheidung von der (abweichenden) Definition des Strömungswiderstands  $R_s$  in der Norm EN 29053 wird für den hier ermittelten spezifischen Strömungswiderstand die Bezeichnung  $R_s^*$  verwendet.

Abbildung 62 zeigt eine Prinzipskizze des Geräteaufbaus. Eine Detailansicht des Messfußes befindet sich in Abbildung 63.



**Abbildung 62:** Messgerät für den Strömungswiderstand



**Abbildung 63:** Messgerät für Strömungswiderstand: Messfuß mit elastischer Zwischenlage in unbelastetem Zustand

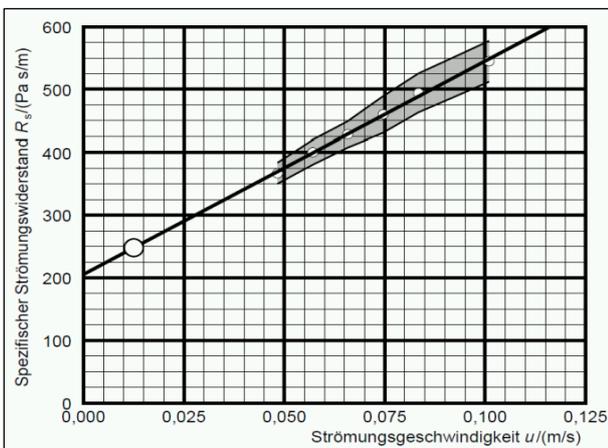
Der praktische Aufbau des Messsystems mit Hebeeinrichtung ist in Abbildung 64 gezeigt.



**Abbildung 64:** Messgerät zur Bestimmung des Strömungswiderstands in situ

Die Messung wird bei verschiedenen Volumenströmen durchgeführt, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Die Messergebnisse werden an Hand der Lufttemperatur sowie des Umgebungsluftdrucks einer Korrektur unterzogen.

Mit den Ergebnissen der einzelnen Durchflussstufen wird eine Regressionsanalyse durchgeführt (Abbildung 65), mit der der Strömungswiderstand  $R_s^*$  bei einer vorgegebenen Strömungsgeschwindigkeit von  $u_{ref} = 0,0125 \text{ m/s}$  – entsprechend einem Volumenfluss von ca. 6 l/min – ermittelt wird.



**Abbildung 65:** Auswertung einer Messreihe für den Strömungswiderstand  $R_s^*$  (A 13 – MQ1)

**3.4.4.2 Durchführung der Messungen**

Die Messungen des Strömungswiderstands wurden jeweils in der rechten Rollspur des rechten/ersten

Fahstreifens durchgeführt. An jedem Messquerschnitt wurden insgesamt 6 Einzelmessungen durchgeführt. Auf der A 12 konnte aus organisatorischen Gründen pro Testfeldabschnitt nur eine Messung durchgeführt werden.

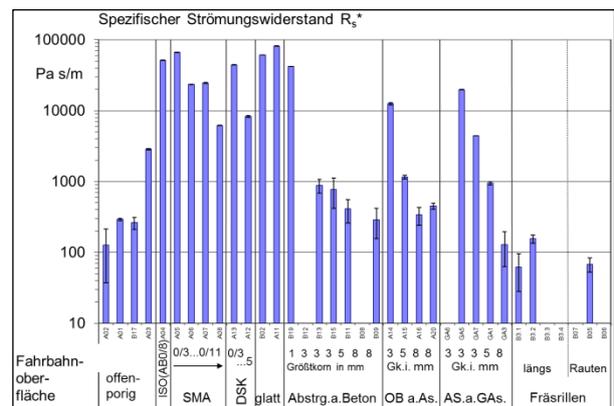
**3.4.4.3 Messergebnisse**

Die Ergebnisse der Strömungswiderstandsmessungen an den Grinding-Versuchsstrecken sind in Tabelle 5 sowie in Abbildung 66 und Abbildung 67 dargestellt.

Strecke	FR	Messquerschnitt	km	$R_s^*$ , Pa s/m	
				Mittelwert	Std. abw.
A 13	Süd	MQ1	7,9	277	25
A 13	Süd	MQ2	10,55	170	21
A 13	Süd	MQ3	14,85	n.v.	n.v.
A 13	Nord	MQ4	15,9	302	50
A 13	Nord	MQ5	14,6	161	8
A 13	Nord	MQ6	12,925	n.v.	n.v.
A 13	Nord	MQ7	10,8	332	25
A 92	West	MQ1	16,75	367	19
A 93	Nord	MP1	129,5	314	27
A 93	Süd	MP1	129,5	370	14

**Tabelle 5:** Ergebnisse der Strömungswiderstandsmessungen (n.v.: Ausfall des Messgeräts, kein Messwert vorhanden)

Die Ergebnisse der Strömungswiderstandsmessungen zeigen, dass alle Oberflächen, die sowohl Grinding als auch Grooving aufweisen, wenige Unterschiede in den Strömungswiderstandswerten aufweisen.



**Abbildung 66:** Strömungswiderstände  $R_s^*$  für verschiedene Fahrbahnbeläge. Werte für die Testfelder des Sperrenberg-Projekts [BECKENBAUER II]

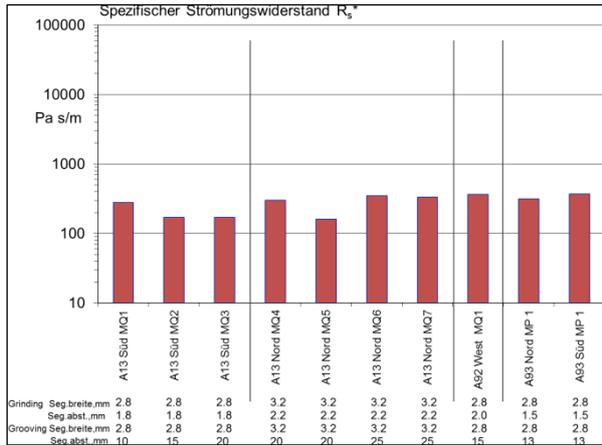


Abbildung 67: Strömungswiderstände  $R_s^*$  für verschiedene Fahrbahnbeläge. Werte für die Versuchsstrecken.

### 3.5 Längs- und Querebenheit

Auf den Betonfahrbahnen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens für die Kalibrierung des Rechenmodells SPERoN® durch die Erprobung unterschiedlicher Grindingtonuren vorgesehen waren, hat die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein umfangreiches Messprogramm veranlasst. Unter anderem wurden Messungen der Längs- und Querebenheit durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messungen werden durch die BASt in einem gesonderten Auswertebereich dargestellt.

### 3.6 Griffigkeitsmessungen und Ergebnisse

Innerhalb des von der Bundesanstalt für Straßenwesen veranlassten Messprogramms wurden an den Versuchsstrecken zur Kalibrierung des Rechenmodells SPERoN® auch Griffigkeitsmessungen durchgeführt. Gemäß [TP Griff-StB (SKM)] wurden analog zu Bauvertragsmessungen Doppelmessungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Griffigkeitsmessungen wurden dem AN freundlicherweise für die weitere Bearbeitung zur Verfügung gestellt.

#### A 93, RF Hof, von km 129,55 bis km 127,4

Die 20 m-Mittelwerte der Griffigkeitsbeiwerte aus den Doppelmessungen gem. [TP Griff-StB (SKM)] sind in Abbildung 68 dargestellt. Im Einzelnen konnte festgestellt werden:

- Die Griffigkeitsbeiwerte auf der in die Messung zu Vergleichszwecken einbezogenen alten Oberfläche von km 130,0 bis km 129,55 liegen zwischen 0,5 und 0,6.

- Der Bereich mit der Sondertextur von km 129,55 bis km 129,35 weist die höchsten Griffigkeitsbeiwerte zwischen 0,8 und 0,9 auf.
- In den Bauwerksbereichen zwischen km 129,3 und km 129,2 sowie zwischen km 128,7 und km 128,3 mit Asphaltdeckschicht sind die Griffigkeitsbeiwerte am schlechtesten und unterschreiten teilweise den Schwellenwert von 0,32 nach [ZTV ZEB-StB].
- Die mit der einfachen Grindingtonuren versehenen Bereiche weisen nun Griffigkeitsbeiwerte zwischen 0,65 und 0,8 auf und liegen damit deutlich über dem Niveau der unbehandelten Fahrbahnoberfläche.

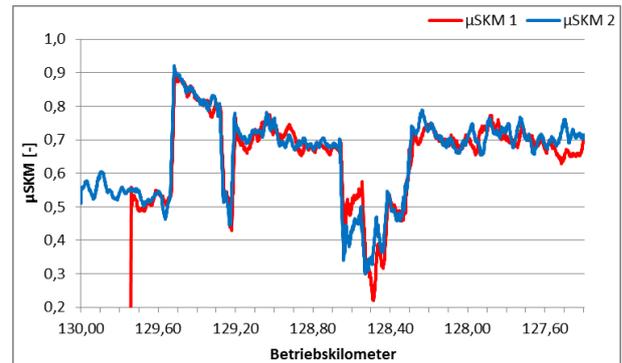
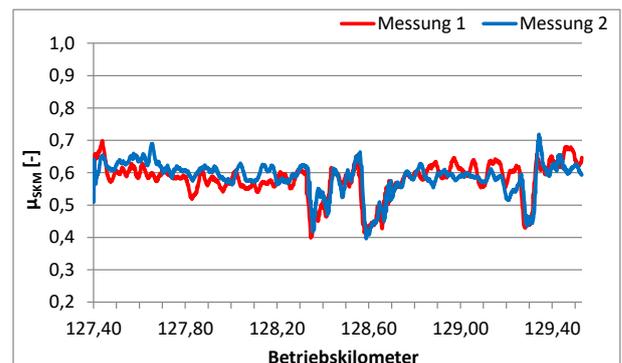


Abbildung 68: Griffigkeitsbeiwerte A 93, RF Hof, 1. FS, km 130,0 bis km 127,4, 20 m-Mittelwerte

#### A 93, RF Regensburg, von km 127,4 bis km 129,55

Aus den 20 m-Mittelwerten der Griffigkeitsbeiwerte der Doppelmessungen gem. [TP Griff-StB (SKM)] in Abbildung 69 lässt sich folgendes ableiten:

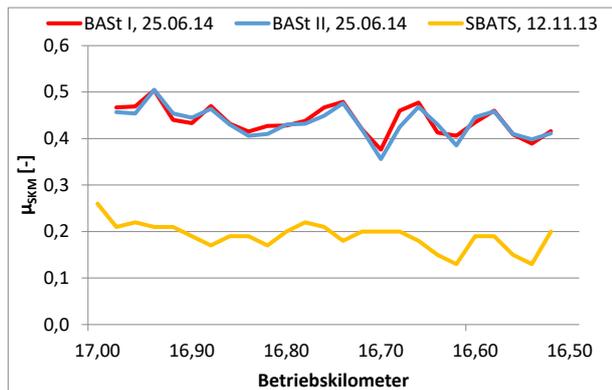
- Der Bereich mit der Sondertextur von km 129,55 bis km 129,35 weist die höchsten Griffigkeitsbeiwerte zwischen 0,6 und 0,7 auf.
- In den Bauwerksbereichen zwischen km 129,3 und km 129,2 sowie zwischen km 128,7 und km 128,3 mit Asphaltdeckschicht sind die Griffigkeitsbeiwerte am schlechtesten und liegen teilweise am Warnwert von 0,39 nach [ZTV ZEB-StB].
- Die mit der einfachen Grindingtonuren versehenen Bereiche weisen nun Griffigkeitsbeiwerte zwischen 0,55 und 0,7 auf.



**Abbildung 69:** Griffigkeitsbeiwerte A 93, RF Regensburg, 1. FS, km 127,4 bis km 129,55, 20 m-Mittelwerte

A 92, RF München, von km 17,0 bis km 16,5

Die hier dargestellten Griffigkeitsmessungen gem. [TP Griff-StB (SKM)] auf der A 92 wurden am 25.06.2014 von der BAST durchgeführt. Zum Vergleich sind auch die Griffigkeitswerte vor der Grindmaßnahme im Diagramm gelb dargestellt.



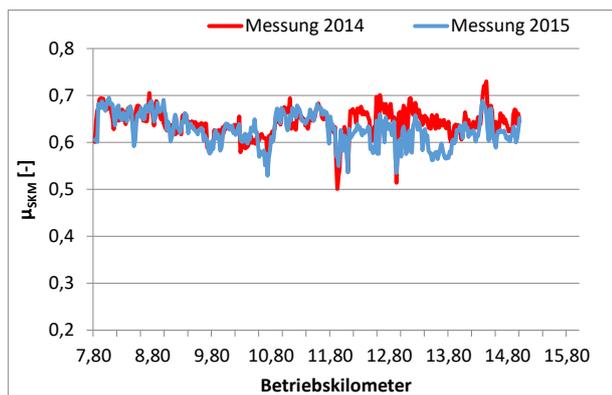
**Abbildung 70:** Griffigkeitsbeiwerte A 92, RF München, 1. FS, km 17,0 bis km 16,5, 20m-Mittelwerte

Die Griffigkeit konnte zwar erheblich verbessert werden, erreicht aber 6 Monate nach der Grindmaßnahme lediglich Griffigkeitsbeiwerte bis maximal 0,5. Teilweise wird der Schwellenwert von 0,39 unterschritten.

Grund hierfür könnte die mangelnde Polierresistenz der verwendeten Gesteinskörnung des Oberbetons sein, denn die Griffigkeitsbeiwerte im Rahmen der Kontrollprüfung lagen kurz nach Herstellung der Grindtextur zwischen 0,65 und 0,8.

A 13, RF Dresden, von km 7,8 bis km 16,0

Die Griffigkeitsmessung gem. [TP Griff-StB (SKM)] der BAST wurde am 29.07.2015 auf dem ersten Fahrstreifen durchgeführt. Die Messung fand zwischen km 7,8 und km 15,0 statt. Abbildung 71 enthält die 20 m-Mittelwerte der Messung und zum Vergleich auch die Ergebnisse der Griffigkeitsmessung aus dem Jahre 2014.



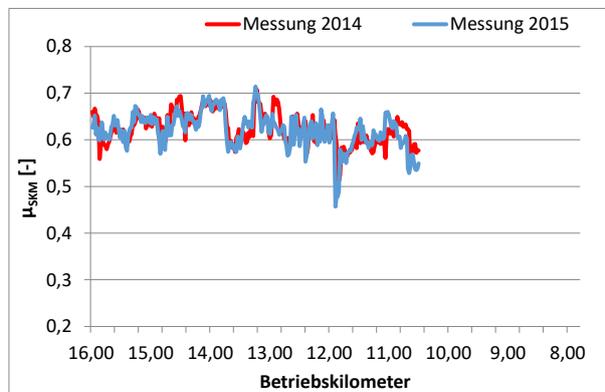
**Abbildung 71:** Griffigkeitsbeiwerte A 13, RF Dresden

Die Griffigkeitsbeiwerte der Messung aus 2015 bewegen sich zwischen 0,53 und 0,7 bei einem Mittelwert von 0,63. Der Zweck der Griffigkeitsverbesserung durch Grinding war somit erreicht.

Auf den Testfeldern mit Sondertexturen wurden gute Griffigkeitsbeiwerte gemessen. Tabelle 6 enthält die statistischen Kennwerte der drei Bereiche.

A 13, RF Berlin, von km 16,0 bis km 7,8

Auf der RF Berlin fand die Griffigkeitsmessung der BAST ebenfalls am 29.07.2015 statt. Gemessen wurde hier zwischen km 16,0 und km 10,5. In Abbildung 72 sind die Ergebnisse dieser Messung den Ergebnissen einer Griffigkeitsmessung aus dem Jahre 2014 gegenüber gestellt.



**Abbildung 72:** Griffigkeitsbeiwerte A 13, RF Berlin

Die Griffigkeitsbeiwerte der Messung aus 2015 bewegen sich zwischen 0,46 und 0,71 bei einem Mittelwert von 0,62. Die griffigkeitsverbessernde Maßnahme durch das Grinding war auch hier erfolgreich.

Die Testfelder mit Sondertexturen haben jeweils gute Griffigkeitsbeiwerte erreicht.

Statistische Kennwerte der Griffigkeitsmessungen

In Tabelle 6 sind die statistischen Kennwerte der Bereiche mit Sondertexturen auf den Versuchsstrecken zusammengestellt.

Strecke	FR	Betriebskilometer	∅	S	V	Min	Max
			μ <sub>SKM</sub>	μ <sub>SKM</sub>	[%]	μ <sub>SKM</sub>	μ <sub>SKM</sub>
A 13	Süd	7,8 - 8,0	0,66	0,04	5,42	0,60	0,69
A 13	Süd	10,45 - 10,65	0,61	0,03	4,40	0,57	0,65
A 13	Süd	14,7 - 14,9	0,61	0,01	1,28	0,60	0,63
A 13	Nord	10,9 - 10,7	0,61	0,02	2,83	0,58	0,64

A 13	Nord	13,025 - 12,825	0,63	0,01	2,13	0,61	0,66
A 13	Nord	14,7 - 14,5	0,64	0,02	3,66	0,61	0,67
A 13	Nord	16,0 - 15,8	0,62	0,02	2,70	0,60	0,65
A 92	West	17,0 - 16,5	1,33	0,24	17,89	0,65	1,86
A 93	Nord	129,535 - 129,260	0,81	0,10	12,47	0,50	0,92
A 93	Süd	129,300 - 129,500	0,61	0,06	9,85	0,44	0,72

**Tabelle 6:** Statistische Kennwerte der Griffigkeit auf den Versuchsstrecken

### 3.7 Spaltzugfestigkeiten und Deckendicken

Aus dem umfangreichen Messprogramm der Bundesanstalt für Straßenwesen, deren Ergebnisse dem AN freundlicherweise zur Verfügung gestellt werden, liegen die Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen vor.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfungen des Oberbetons dargestellt.

BAB	RF	$f_{ctm}$	$f_{ctk.core}$	S	V
		[MPa]	[MPa]		
A 13	Berlin	5,41	4,03	0,60	11,14
	Dresden	5,39	4,20	0,52	9,62
A 92	München	5,82	4,37	0,49	8,43
A 93	Hof	6,19	4,73	0,64	10,28
	Regensburg	6,10	5,10	0,44	7,13

**Tabelle 7:** Spaltzugfestigkeiten Oberbeton

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfungen des Unterbetons dargestellt.

BAB	RF	$f_{ctm}$	$f_{ctk.core}$	S	V
		[MPa]	[MPa]		
A 13	Berlin	6,15	4,50	0,72	11,75
	Dresden	5,95	4,49	0,64	10,70
A 92	München	5,88	3,96	0,65	11,06
A 93	Hof	5,67	4,41	0,55	9,69
	Regensburg	5,85	4,47	0,60	10,29

**Tabelle 8:** Spaltzugfestigkeiten Unterbeton

Wegen der hohen Festigkeitswerte der Betone auf den Versuchsstrecken wurden durch das Grinding sehr homogene Texturen erreicht.

In Tabelle 9 sind die Deckendicken dargestellt.

BAB	RF	$h_m$	$h_{k.core}$	S	V
		[cm]	[cm]		
A 13	Berlin	31,859	30,16	0,91	2,86
	Dresden	32,108	30,00	1,15	3,57
A 92	München	-	-	-	-
A 93	Hof	22,07	20,29	0,97	4,39
	Regensburg	21,92	19,75	1,18	5,38

**Tabelle 9:** Deckendicken

### 3.8 Geräuschemission

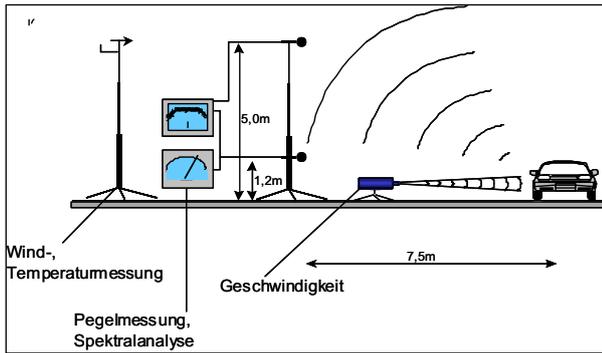
#### 3.8.1 SPB-Messungen

Die SPB-Methode ist eine Messmethode zur Erfassung und Beurteilung schalltechnischer Eigenschaften des Straßenverkehrs im Allgemeinen und der Fahrbahnoberfläche im Besonderen. Die SPB-Methode ist nachfolgend beschrieben. Die kontrollierten Vorbeifahrten (controlled pass-by, CPB) werden in Anlehnung an die Statistische Vorbeifahrtmethode bzw. Statistical Pass-By-Method (SPB) nach [SPB1] bzw. [SPB2], jedoch mit hinsichtlich Fahrzeugtyp, Beladung, Bereifung etc. bekannten Fahrzeugen durchgeführt.

##### 3.8.1.1 Messaufbau

Zur Durchführung der Messungen wird ein Mikrofon in 7,5 m Abstand zur Mitte des rechten Fahrstreifens und 1,2 m Höhe über Fahrbahnoberkante installiert (Abbildung 73 und Abbildung 74). Bei jeder Vorbeifahrt eines einzelnen Fahrzeugs werden der maximale Schalldruckpegel und die Fahrzeuggeschwindigkeit registriert.

Die Geschwindigkeitsmessungen erfolgen mit einem Radar-Messgerät: Die Messdaten werden kontinuierlich an den Messrechner übertragen. Bei gültiger akustischer Messung eines einzelnen Fahrzeugs wird die dazugehörige Fahrgeschwindigkeit mit abgespeichert. Zusätzlich werden die Luft- und die Fahrbahntemperatur während der Messungen aufgezeichnet. Im Fall der CPB-Messungen wird zusätzlich der Reifentyp der Messreifen notiert.



**Abbildung 73:** Schema der Messanordnung zur Durchführung von Messungen nach der Statistischen Vorbeifahrtmethode (SPB). Derselbe Messaufbau wird auch für kontrollierte Vorbeifahrtmessungen (CPB) eingesetzt.



**Abbildung 74:** Beispielhafter Messaufbau nach der Statistischen Vorbeifahrtmethode (SPB)

Das Umfeld der Messstelle muss vom Gelände her möglichst eben (keine Einschnitte und Dammlagen), reflexionsarm (keine Bebauung) und ohne höheren Bewuchs beschaffen sein. Dies gilt für einen Radius von 25 m um die Messstelle.

### 3.8.1.2 Durchführung

Die Messungen werden auf trockener Fahrbahn bei Lufttemperaturen zwischen 5°C und 30°C sowie Fahrbahntemperaturen zwischen 5°C und 50°C durchgeführt. Während der Messungen müssen die Windgeschwindigkeiten in 4 m Höhe unter 5 m/s liegen.

Eine Messung ist gültig, wenn der Maximalpegel während der Vorbeifahrt des Fahrzeugs um wenigstens 6 dB über dem Schalldruckpegel vor und nach der Vorbeifahrt liegt.

Die SPB-Messungen werden beobachtet durchgeführt und getrennt nach Fahrzeugkategorien aufzeichnet.

### 3.8.1.3 Messergebnisse

Für jede gültige Vorbeifahrt wird der maximale A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pAF,max}$  ermittelt. Diese Messergebnisse werden in Form eines Scatterdiagramms dargestellt, worin jeder Punkt den  $L_{pAF,max}$  einer Vorbeifahrt mit der jeweils zutreffenden Geschwindigkeit  $v$  wiedergibt. Eine Regressionsanalyse liefert Mittelwerte für beliebige Geschwindigkeiten  $v$ .

Je nach Niveau der auf dem betreffenden Straßenabschnitt gefahrenen Geschwindigkeiten werden die den drei Fahrzeugkategorien (vehicle category) zuzuordnenden Vorbeifahrtpegel  $L_{veh}$  gemäß [SPB2] als Mittelwert (Ergebnis der Regressionsanalyse) bei folgenden Referenzgeschwindigkeiten  $v_{ref}$  abgelesen:

- Geschwindigkeitsklasse "Niedrig"  
 $v_{ref} = 50$  km/h für alle Fahrzeugkategorien
- Geschwindigkeitsklasse "Mittel"  
 $v_{ref} = 80$  km/h für Pkw und  
 $v_{ref} = 70$  km/h für Lkw
- Geschwindigkeitsklasse "Hoch"  
 $v_{ref} = 110$  km/h für Pkw und  
 $v_{ref} = 85$  km/h für Lkw

Die ermittelten Messwerte werden temperaturkorrigiert. Es werden spektrale Auswertungen der Messergebnisse durchgeführt und in den Messprotokollen dargestellt.

### 3.8.1.4 Temperaturkorrektur

Die durch das Reifen-Fahrbahn-Geräusch entstehenden Schallpegel sind temperaturabhängig. Da man davon ausgehen kann, dass die an den Messpunkten messbaren Vorbeifahrtpegel von Pkw, die sich aus Reifen-Fahrbahn-Geräuschen, Antriebs- und Strömungsgeräuschen an der Karosserie zusammensetzen, von den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen dominiert sind, ist die Temperaturabhängigkeit der Schallpegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche auch auf die Vorbeifahrtpegel anwendbar.

Den Anforderungen aus [SPB2], Abschnitt 9.4 und 11.2 gemäß, sollen die Vorbeifahrtpegel auf die Referenz-Lufttemperatur von

$$T_{Luft, ref.} = 20^{\circ}C$$

bezogen werden. Werden die Vorbeifahrtpegel bei anderen Lufttemperaturen gemessen, sind die einzelnen Messwerte entsprechend zu korrigieren, wobei in der Norm kein Verfahren angegeben ist, wie die Korrektur vorzunehmen ist. Im Bericht sollen die korrigierten und nicht korrigierten Werte angegeben werden.

Die Vorbeifahrtpegel nehmen mit steigender Luft-

temperatur ab. Die Temperaturgänge der Vorbeifahrtpegel bezogen auf Lufttemperatur und Fahrbahn­temperatur verlaufen nahezu deckungsgleich, weshalb kein Unterschied zwischen Luft- und Fahr­bahn­temperatur zu machen ist.

Für den A-bewerteten Gesamtpegel  $L_{pAF,max.}$  ist folgende Korrektur maßgeblich:

$$L_{pAF,max.,korr.} = L_{pAF,max.,mess} + c_{TL} (T_L - T_0)$$

mit

$L_{pAF,max.,korr.}$  temperaturkorrigierter Vorbeifahrtpegel in dB(A)

$L_{pAF,max.,mess}$  gemessener, nicht temperaturkorrigierter Vorbeifahrtpegel in dB(A)

$c_{TL}$  Korrekturfaktor in dB/°C, hier  $c_{TL} = 0,04$  dB/°C für PKW

$T_0$  Referenztemperatur in °C, hier  $T_0 = 20$ °C

$T_L$  Lufttemperatur zum Zeitpunkt der Messung des Vorbeifahrtpegels in °C

Die Lufttemperatur muss nach Norm während der Messungen zwischen 5 und 30°C liegen, die Fahr­bahn­temperatur zwischen 5 und 50°C.

Die Temperaturkorrektur ist nur auf Messergeb­nisse für die Fahrzeugkategorie Pkw anwendbar.

### 3.8.1.5 Ermittlung des $D_{Stro}$ -Wertes

In [SPB4] und [SPB5] ist im Statuspapier der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) der Referenzwert für den mittleren Pkw-Vorbeifahrtpegel bei 120 km/h auf bis zu drei Jahre alten Deckschichten mit dem Referenzbelag "nicht geriffelter Gussasphalt" von

$$L_{ref,Statuspapier\ 2006} = 85,2\ \text{dB(A)}$$

festgelegt.

Dieser Referenzwert stimmt nicht mehr mit dem Referenzwert überein, der den RLS-90 seinerzeit mit 83,5 dB(A) zugrunde gelegt wurde. Er liegt 1,7 dB(A) höher.

Der den RLS-90 zugrunde liegende Referenzwert beruht auf Ergebnissen von Vorbeifahrtmessungen für ein Kollektiv von Fahr­bahn­belägen und Fahrzeugen, wie sie etwa Anfang der 1980er Jahre auf deutschen Autobahnen vorlagen.

Das bedeutet, dass bei der Angabe von Pegelmin­derungen für verschiedene Fahr­bahn­beläge der zugrunde gelegte Referenzwert zwingend mit anzugeben ist.

Im Weiteren wird der aktuelle Referenzwert für Pkw bei 120 km/h mit

$$L_{ref,Statuspapier\ 2006} = 85,2\ \text{dB(A)}$$

als Ausgangswert zugrunde gelegt.

Die Korrektur  $D_{Stro}$  des betreffenden Fahr­bahn­belages wird ausgedrückt als Pegeldifferenz der gemessenen Vorbeifahrtpegel zum Referenzwert. Der von der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, ermittelte Referenzwert, mit dem die gemessenen Vorbeifahrtpegel verglichen werden, bezieht sich auf folgende Randbedingungen:

- Fahrzeugkategorie Pkw,
- Fahr­bahn­belag nicht geriffelter Gussasphalt 0/11 mit Abstreueung 5/8 oder 2/5+5/8,
- Referenzgeschwindigkeit  $v_{ref.} = 120$  km/h,
- Messhöhe 1,2 m über Fahr­bahn­oberkante.

Für die anderen Fahrzeugkategorien und die Mess­höhe 5,0 m bestehen keine nationalen Referenzwerte. Insofern sind also allein die Messwerte in 1,2 m Höhe über Fahr­bahn­oberkante für Pkw ausschlaggebend für den  $D_{Stro}$ -Wert.

## 3.8.2 Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen

### 3.8.2.1 Durchführung

Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen (controlled pass-by, CPB) werden nach der Vorgehensweise der in Kapitel 3.8.1 beschriebenen SPB-Messungen durchgeführt. Allerdings werden die CPB-Messungen mit einem definierten Fahrzeug bei vorgegebenen Geschwindigkeitsstufen durchgeführt. Die Bereifung erfolgt mit Reifen, deren 3D-Textur (Reifenprofil) und strukturdynamischen Eigenschaften messtechnisch ermittelt wurden und für die Vorbeifahrtmessungen mit einem definierten Reifeninnen­druck verwendet werden, so dass auch alle Eingangsparameter für Berechnungen mit dem Simulationstool SPERoN® zur Verfügung stehen.

Im vorliegenden Fall wurden folgende Reifentypen für die kontrollierten Vorbeifahrtmessungen verwendet:

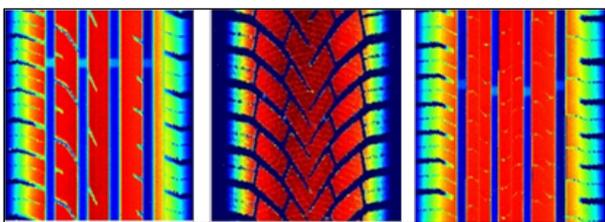
- Continental EcoContact 5
- Continental PremiumContact 2
- Continental WinterContact TS 850

Alle Reifen haben die Abmessungen 205/55 R16 (91H).

Die unterschiedlichen Reifenprofile sind in Abbildung 75 dargestellt, die gemessenen Profile der Reifentextur, wie sie in das Rechenmodell SPERoN® eingegangen sind, zeigt Abbildung 76.



**Abbildung 75:** Messreifen Premium, Winter und Eco für die Kontrollierte Vorbeifahrt (CPB)



**Abbildung 76:** Gemessene Texturprofile der Messreifen Premium, Winter und Eco für die Kontrollierte Vorbeifahrt

Für alle Messungen wurden Serienfahrzeuge vom Typ Volkswagen Passat Kombi verwendet (Abbildung 77).



**Abbildung 77:** Messfahrzeug Volkswagen Passat Kombi für die Durchführung der Kontrollierten Vorbeifahrt. Die Rundumleuchte wurde zur Durchführung der Messfahrten abgenommen.

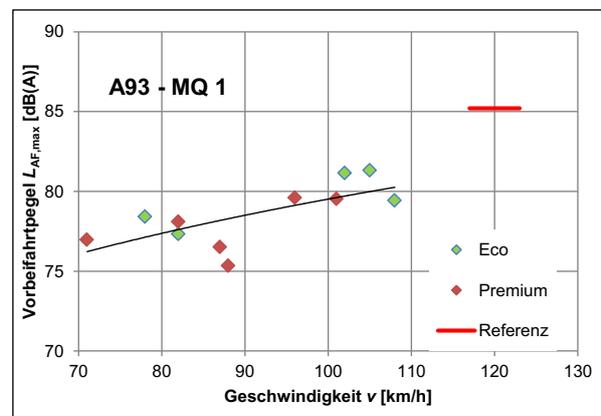
Messgröße ist hier, wie auch bei den SPB-Messungen, der maximale Vorbeifahrtpegel  $L_{pAF,max}$  in 7,5 m Abstand von der Mitte des Fahrstreifens in 1,2 m Höhe über der Fahrbahn. Zusätzlich werden hier die Pegelzeitverläufe aufgezeichnet, so dass spektrale Auswertungen möglich sind.

Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen auf öffentlichen Straßen müssen aus Sicherheitsgründen bei lau-

fendem Motor durchgeführt werden. Die Messungen erfolgen jedoch im Leerlauf, um die Beeinflussung der Messergebnisse durch Motorgeräusche soweit wie möglich zu minimieren. Bei den hier untersuchten Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h oder mehr sind die Motorgeräusche im Leerlauf sicher nicht mehr pegelrelevant, so dass eine Beeinflussung der Messergebnisse hierdurch nicht anzunehmen ist.

### 3.8.2.2 CPB-Messergebnisse

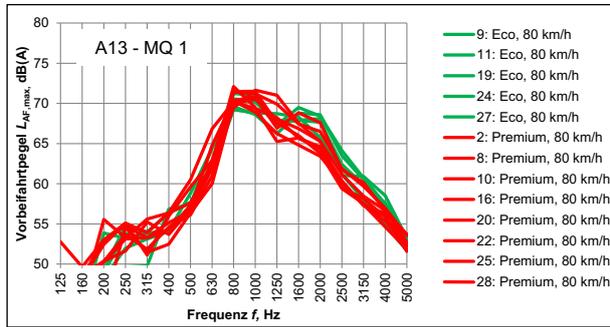
Die Ergebnisse der CPB-Messungen auf den Versuchsstrecken sind beispielhaft in Abbildung 69 und alle Versuchsstrecken im **Anhang 1** grafisch dargestellt. Angegeben sind jeweils die temperaturkorrigierten Werte der Vorbeifahrtpegel für alle Messreifen. Bei der Auswertung der CPB-Messergebnisse mit Temperaturkorrektur fällt auf, dass die Variation der Grinding-Parameter nur zu geringen Unterschieden der Vorbeifahrtpegel führt. Zwei Grinding-Versuchsfelder zeigen dagegen auffälliges Verhalten: MQ1 auf der A 92 und MQ3 auf der A 13. Ersterer führt gegenüber den anderen Messquerschnitten zu etwa 2 dB(A) höheren Vorbeifahrtpegeln bei 100 km/h, wogegen Letzterer zu etwa 3 dB(A) niedrigeren Pegeln führt.



**Abbildung 78:** CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) aller Messreifen auf der A 93, MQ1 (FR Nord, km 129,400)

Als Grundlage für die Erweiterung des Rechenmodells SPERoN® für Grindingoberflächen wurden zusätzlich spektrale Auswertungen der Vorbeifahrtpegel-Zeitverläufe durchgeführt. Ein Beispiel ist in Abbildung 79 dargestellt. In den Abbildungen im **Anhang 1** sind ausgewählte Beispiele der Vorbeifahrtpegelspektren dargestellt. Abbildung 11 und Abbildung 12 enthalten die Ergebnisse eines „durchschnittlichen“ Grindingbelags (A 13, MQ1, FR Süd, km 7,900), die Spektren eines besonders leisen Belags sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 gezeigt, ein besonders „lauter“ Belag ist in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt. Alle angegebenen Schall-

druckpegel sind auf die genannte Referenzgeschwindigkeit und auf eine Lufttemperatur von  $T = 20^{\circ}\text{C}$  korrigiert.



**Abbildung 79:** CPB-Messergebnisse ( $L_{A,F,max}$ ) aller Messreifen für  $v = 80\text{ km/h}$  auf der A 13, MQ1 (FR Süd, km 7,900)

### 3.8.3 CPX-Messungen

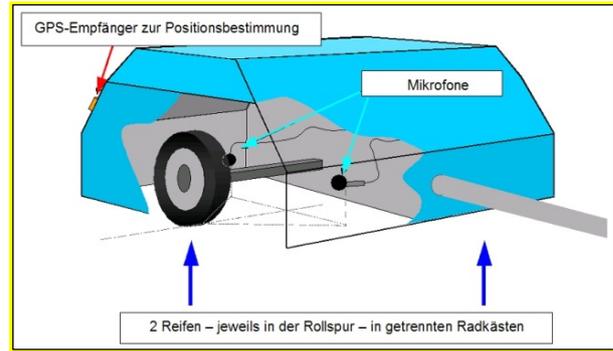
Mit der Nahfeldmessmethode (Close Proximity Method – CPX) nach [CPX1] können die Reifen-Fahrbahn-Geräusche unbeeinflusst von speziellen Gegebenheiten der Messumgebung und unabhängig von Antriebs- und Strömungsgeräuschen an der Karosserie gemessen werden. Da die Messungen kontinuierlich für ganze Straßenabschnitte erfolgen, ist diese Messmethode auch zur Kennzeichnung der Homogenität der akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen geeignet.

#### 3.8.3.1 Messanhänger

Zur Messung wird ein der Norm entsprechender Messanhänger verwendet, der auf zwei definierten Messreifen rollt. Die Spurbreite entspricht der normaler Fahrzeuge, die Messreifen rollen also in den Radrollspuren eines Fahrstreifens. Das Reifen-Fahrbahn-Geräusch wird mit Messmikrofonen aufgezeichnet, deren Position relativ zur Reifenaufstandsfläche in der Norm vorgegeben ist. Die Räder laufen in akustisch getrennten Radkästen, so dass die beiden Rollspuren getrennt vermessen werden können.

Die Messungen werden im fließenden Verkehr durchgeführt, daher muss der Messanhänger besondere Anforderungen an die Schalldämmung gegenüber den Außengeräuschen erfüllen. Durch eine schallabsorbierende Auskleidung der Innenflächen des Messanhängers werden außerdem Schallreflexionen an den Innenflächen vermieden.

Die Müller-BBM Messanhänger erfüllen die Anforderungen der Norm. Ihr Aufbau ist in Abbildung 80 bis Abbildung 83 dargestellt.



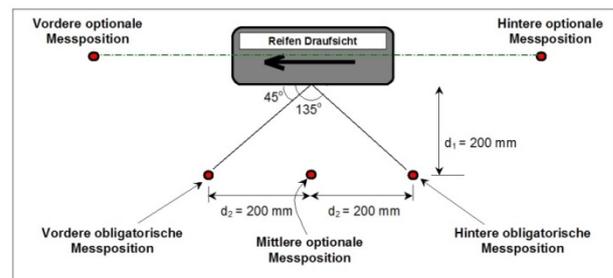
**Abbildung 80:** CPX-Messanhänger zur Durchführung von Messungen nach der Nahfeldmessmethode.



**Abbildung 81:** Müller-BBM Messanhänger.



**Abbildung 82:** Reifen P mit Messmikrofon (Mikrofonposition vorne).



**Abbildung 83:** Anordnung der Messmikrone gemäß [CPX3] in der Draufsicht. Die Höhe der Messmikrone über der Fahrbahnoberkante beträgt 100 mm.

Von den in Abbildung 83 dargestellten Messpositionen werden ausschließlich die obligatorischen Messpositionen zur Messung verwendet.

### 3.8.3.2 Messreifen

Für reproduzierbare Messungen mit Hilfe der Nahfeldmessmethode sind nach Norm die nachfolgend beschriebenen Reifen mit den angegebenen Abmessungen zu verwenden (Abbildung 84):

- Reifen P: Uniroyal Tiger Paw SRTT 225/60 R16
- Reifen H: AVON AV4 195/80 R14



**Abbildung 84:** Verwendete Messreifentypen gemäß [CPX3]

Der Reifenluftdruck wird vor jeder Messreihe überprüft und gemäß den Anforderungen der Norm auf 2,0 bar eingestellt.

### 3.8.3.3 Ermittlung der Messwerte

Es werden nacheinander Messungen mit den Messreifensätzen P und H durchgeführt. Dabei werden an jedem der beiden Messreifen die A-bewerteten Schalldruckpegel mit der Zeitkonstante "FAST" an den obligatorischen Messpositionen vor und hinter der Reifenaufstandsfläche ermittelt.

Zusätzlich werden die Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit aufgezeichnet. Zur ortsgenauen Positionierung werden die Messergebnisse zusammen mit den Signalen eines GPS-Empfängers gespeichert.

### 3.8.3.4 Auswertemethode

Aus den gemessenen Schalldruckpegeln  $L_{p,P}$  und  $L_{p,H}$  werden durch energetische Mittelung 20 m-Intervalle für den Reifen P und H  $L_{P,20m}$  und  $L_{H,20m}$  für jede Messmikrofonposition gebildet.

$$L_{P,20m} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{p,P,i}/10 \text{ dB}} \right) \text{ dB}$$

$$L_{H,20m} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{p,H,i}/10 \text{ dB}} \right) \text{ dB}$$

Im Anschluss werden für jeden Messreifen der beiden Messreifensätze P und H die ermittelten Schalldruckpegel der einzelnen 20 m-Intervalle der beiden obligatorischen Messpositionen vor und hinter dem Reifen arithmetisch gemittelt.

Die so ermittelten Schalldruckpegel werden gemäß folgender Gleichung bezüglich der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten anhand der Größe  $c_v$  auf die Referenzgeschwindigkeiten korrigiert:

$$c_v = -b \cdot \lg \left( \frac{v}{v_{\text{ref}}} \right)$$

mit:

- $c_v$ : Geschwindigkeitskorrektur in dB
- $b$ : Geschwindigkeitskoeffizient in dB
- $v$ : tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit in km/h
- $v_{\text{ref}}$ : die Referenzgeschwindigkeit in km/h

Gemäß [CPX3] sind folgende belagsabhängigen Geschwindigkeitskoeffizienten anzusetzen:

- $b = 25$ : offenporige Deckschicht,
- $b = 30$ : semiporöse Deckschicht, dichte Asphaltdeckschicht,
- $b = 35$ : (nicht poröse) Zementbeton-/Betondeckschicht,
- $b = 30$ : alle anderen bzw. unbekanntes Deckschichten.

Weiterhin wird auf die Ergebnisse eine Temperaturkorrektur  $C_{\text{temp}}$  gemäß folgender Gleichung angewendet:

$$C_{\text{temp}} = 0,03 \cdot (T - 20^\circ\text{C})$$

mit:

- $C_{\text{temp}}$ : Temperaturkorrektur in dB
- $T$ : Lufttemperatur in  $^\circ\text{C}$  während der Messungen

Somit ergibt sich der temperatur- und geschwindigkeitskorrigierte Schalldruckpegel für die beiden Messreifen zu

$$L_{P,20m,\text{korr}} = L_{A,20m} + C_{\text{temp}} + c_v$$

$$L_{H,20m,\text{korr}} = L_{D,20m} + C_{\text{temp}} + c_v$$

**3.8.3.5 Messergebnisse**

Das Pegel-Orts-Diagramm der 20 m-Intervalle ist für jeden der beiden Messreifensätze in den Messprotokollen dargestellt.

Durch arithmetische Mittelung aller für den Streckenabschnitt relevanten 20 m-Intervalle ergeben sich die CPX-Indizes  $CPX_P$  (Passenger cars),  $CPX_H$  (Heavy cars) und der Close-Proximity Sound Index  $CPXI$ , der einen Fahrzeugmix repräsentiert.

$$CPX_P = \bar{L}_{P,20m,korr}$$

$$CPX_H = \bar{L}_{H,20m,korr}$$

$$CPXI = 0,5 \cdot CPX_P + 0,5 \cdot CPX_H$$

Zusätzlich kann das mittlere Frequenzspektrum der geschwindigkeits- und temperaturkorrigierten Messergebnisse für die Reifen P und H ausgewertet werden.

**3.8.3.6 Messgenauigkeit**

Während der Messungen wird die Fahrzeuggeschwindigkeit elektronisch durch die fahrzeugeigene Geschwindigkeitsregelanlage eingestellt. Die Fahrzeuggeschwindigkeit kann mit einer Unsicherheit von  $\pm 1$  km/h, die Luft- und Oberflächentemperatur mit einer Unsicherheit von  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  bestimmt werden. Die akustische Messunsicherheit, interpretiert als die Standardabweichung der Wiederholgenauigkeit der CPX-Indizes, liegt erfahrungsgemäß bei  $\pm 0,5$  dB.

**4 Computersimulationen zu lärmoptimierten Grindingtexturen mit SPERoN®**

**4.1 Beschreibung des Simulationstools SPERoN®**

**4.1.1 Allgemeines**

Das mit dem Akronym SPERoN® (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise) bezeichnete Rechenmodell wurde im Rahmen der Forschungsprojekte „Leiser Straßenverkehr - Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ (Bundesministerium für Bildung und Forschung, seit 2002) und „ITARI - Integrated Tyre And Road Interaction“ (EU, 2005 bis 2007) von Müller-BBM in Zusammenarbeit mit dem

Lehrstuhl für Angewandte Akustik der Chalmers University of Technology in Göteborg (Schweden) entwickelt. Eine weitere Grundlage für die Entwicklung von SPERoN® bildete das Projekt „Sperenberg“ (BASt, 1995 bis 2000, vgl. [BECKENBAUER II]). Aus diesem waren Messergebnisse sowie ein erstes Modell zur Prognose von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen hervorgegangen.

Mit dem Modell kann der Schalldruckpegel des Vorbeirollgeräuschs von Fahrzeugen in 7,5 m Entfernung zur Fahrbahnmitte in einer Höhe von 1,2 m in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, den Eigenschaften der Reifen und der Fahrbahnoberfläche prognostiziert werden.

SPERoN® besteht aus einem deterministischen und einem statistischen Teilmodell und kann deshalb als Hybridmodell aufgefasst werden.<sup>1</sup>

Die Gesamtschallintensität  $I_{gesamt}$  setzt sich dabei aus einem durch die Reifenschwingungen verursachten Intensitätsanteil  $I_{vibr}$ , einem airpumping-Anteil  $I_{air}$ , einem Anteil  $I_{cavity}$ , welcher Hohlraumresonanzen im Reifeninnern repräsentiert sowie einem Residualanteil  $I_{residual}$  zusammen. Der Residualanteil verkörpert sonstige Strömungsschallquellen am Fahrzeug. Der Ansatz für das statistische Modell lautet:

$$I_{gesamt} = I_{vibr} + I_{air} + I_{cavity} + I_{residual}$$

- $I_{gesamt}$  Gesamtschallintensität der Vorbeirollgeräusche [ $\text{W/m}^2$ ]
- $I_{vibr}$  Teilschallintensität aufgrund mechanischer Anregung [ $\text{W/m}^2$ ]
- $I_{air}$  Teilschallintensität aufgrund aerodynamischer Anregung [ $\text{W/m}^2$ ]
- $I_{cavity}$  Teilschallintensität aufgrund von Hohlraumresonanzen im Reifen [ $\text{W/m}^2$ ]
- $I_{residual}$  Teilschallintensität aufgrund von Strömungsgeräuschen am Fahrzeug [ $\text{W/m}^2$ ]

Jede dieser Teilschallintensitäten ist dabei abhängig von verschiedenen Parametern und Koeffizienten:

$$I_{gesamt}(f) = a_1(f) \cdot F_c^{1/2} + a_2(f) \cdot \left(\frac{F_c}{s_c}\right)^{1/2} \cdot R_s^{1/2} \cdot v^{1/2} + a_3(f) \cdot G_{profil}^{1/2} + a_4(f) \cdot v^{1/2}$$

$I_{vibr}$        $I_{air}$        $I_{cavity}$        $I_{residual}$

mit  $F_c$  mittlere Kontaktkraft [N]

<sup>1</sup> Eine detaillierte Beschreibung des Rechenmodells SPERoN® befindet sich in [FE 08.0211/2011/OGB].

$f$	Frequenz [Hz]
$s_c$	mittlere Kontaktsteife [N/m]
$R_s^*$	spezifischer Strömungswiderstand im Reifen-Fahrbahn-Kontakt [Pa*s/m]
$v$	Geschwindigkeit [m/s]
$G_{\text{profil}}$	Frequenzspektrum der Laufflächentextur des Reifens
$y_1, \dots, y_6$	Parameter
$a_1, \dots, a_4$	Koeffizienten

Bei der Betrachtung gerichteter Texturen wie z. B. Texturen von Grindingoberflächen ist zu berücksichtigen, dass die Entwicklung von SPERoN® ursprünglich nicht auf die Berechnung anisotroper Texturen ausgerichtet ist. Grindingtexturen, bei denen die Strukturen in strenger Weise „gerichtet“ sind, können daher bei Anwendung der aktuell eingeführten und validierten Version von SPERoN® Berechnungsergebnisse entstehen, die den von tatsächlichen Verhältnissen deutlich abweichen. Für die akustische Beurteilung der im vorliegenden Projekt zu erzeugenden Grindingtexturen muss das Rechenmodell daher angepasst werden.

Die Modifizierung betrifft das Teilmodell für die Berechnung der aerodynamischen Komponente des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs. Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit des modifizierten Rechenmodells auf Grindingtexturen mit ausgeprägter Anisotropie wurden im Vorhaben kontrollierte Vorbeifahrtmessungen an entsprechenden Fahrbahnabschnitten öffentlicher Straßen durchgeführt. Hierzu war es auch notwendig, die Fahrbahnoberflächeneigenschaften 3D-Textur und texturinduzierter Strömungswiderstand zumindest in der rechten Radrollspur des 1. Fahrstreifens zu bestimmen. Die kontrollierten Vorbeifahrtmessungen werden mit Reifen durchgeführt, deren vibroakustische Kenngrößen und Laufflächenprofile bereits in der SPERoN®-Datenbank vorhanden sind. Anhand der Messergebnisse kann das modifizierte Rechenmodell sowohl überprüft als auch für Grindingtexturen kalibriert werden.

## 4.2 Anpassung und Rekalibrierung des Rechenmodells für anisotrope Texturen

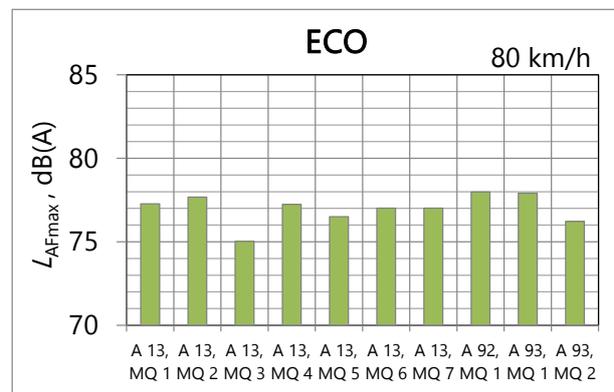
Zur Anpassung des Rechenmodells werden zunächst die Ergebnisse der CPB-Messungen auf den verschiedenen untersuchten Grindingstrecken der ersten Projektphase miteinander verglichen. Anhand der auf diesen Oberflächen gemessenen Tex-

turen werden dann mit dem bestehenden SPERoN®-Modell die zu erwartenden Vorbeifahrtpegel berechnet und mit den Messwerten verglichen. Der spektrale Vergleich von Mess- und Rechenergebnissen sowie die spektrale Betrachtung von Pegeländerungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten liefern Hinweise auf die jeweilige Geschwindigkeitsabhängigkeit der einzelnen Rollgeräusch-Komponenten.

### 4.2.1 Analyse der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen und Nahfeldmessungen

#### 4.2.1.1 CPB-Maximalpegel

Zur Analyse der kontrollierten Vorbeifahrtmessungen wurden zunächst die Ergebnisse der Messungen mit den verschiedenen Reifen auf den Untersuchungsstrecken für eine Fahrgeschwindigkeit zusammengestellt. Diese Vergleiche sind im **Anhang 2** in Abbildung 1 bis Abbildung 6 und beispielhaft in der folgenden Abbildung 85 dargestellt.



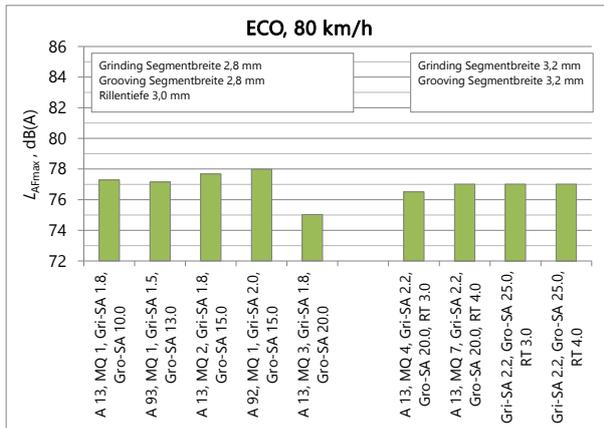
**Abbildung 85:** Vergleich der CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) für Messreifen ECO für  $v = 80$  km/h auf allen untersuchten Grindingstrecken

Der Vergleich der CPB-Messergebnisse zeigt, dass die Unterschiede für einen bestimmten Reifen auf den unterschiedlichen Untersuchungsstrecken in der Regel um nicht mehr als 3 dB(A) differieren. Alle Messergebnisse mit den verschiedenen untersuchten Reifentypen zeigen jedoch, dass die geringsten Vorbeifahrtpegel auf der A 13 an MQ 3 gemessen wurden.

Die Vorbeifahrtpegel auf der A 92 fallen mit allen Messreifen relativ hoch aus, dies ist jedoch auf Besonderheiten des rechten Fahrstreifens zurückzuführen, da hier die bestehende Fahrbahntextur durch das Grinding nicht vollständig beseitigt wer-

den konnte. Die dadurch entstehenden Inhomogenitäten in der Textur sind ursächlich für die erhöhten Vorbeirollpegel.

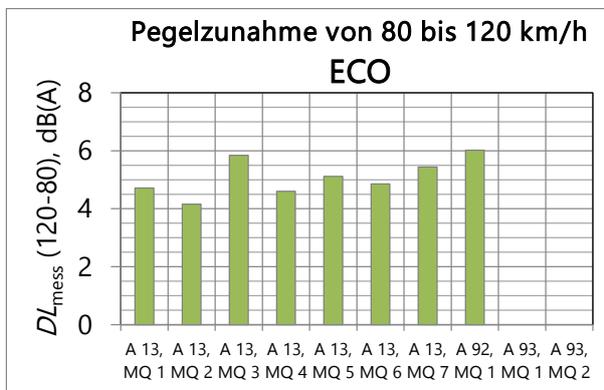
In Abbildung 7 bis Abbildung 10 im **Anhang 2** sind die Messergebnisse nach Grindingparametern gruppiert. Beispielhaft dafür enthält Abbildung 86 die Messergebnisse für Messreifen ECO bei  $v = 80$  km/h.



**Abbildung 86:** CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) für Messreifen ECO bei  $v = 80$  km/h, gruppiert nach Grindingparametern

#### 4.2.1.2 CPB-Pegeldifferenz zwischen 80 km/h und 120 km/h

Für die Trennung der einzelnen Komponenten des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs ist die Kenntnis der Pegeldifferenz der Vorbeirollpegel zwischen den Geschwindigkeiten 80 km/h und 120 km/h relevant. Im **Anhang 2**, Abbildung 11 bis Abbildung 13 und beispielhaft in der folgenden Abbildung 87 ist für alle drei Messreifen die Pegelzunahme der gemessenen Vorbeifahrtpegel bei  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h dargestellt, soweit vorhanden.<sup>2</sup>



**Abbildung 87:** Pegeldifferenz der CPB-Messergebnisse ( $DL_{mess}$ ) für Messreifen ECO bei  $v = 80$  km/h und

$v = 120$  km/h auf allen untersuchten Grindingstrecken (Pegeldifferenzen für A 93 liegen nicht vor, da hier  $v_{zul} = 80$  km/h)

Die dargestellten Pegelzunahmen liefern einen Hinweis auf die tatsächlich vorliegende Geschwindigkeitsabhängigkeit der einzelnen Rollgeräuschkomponenten. Für eine lineare Geschwindigkeitsabhängigkeit ergibt sich eine Differenz  $DL$  der Schalldruckpegel bei 80 km/h und 120 km/h von

$$DL = 10 \lg \left( \frac{120}{80} \right) = 1,76 \text{ dB}$$

Mechanisch induzierte Geräuschkomponente und aerodynamisch induzierte Geräuschkomponente führen zu einer Zunahme der Schalleistung mit dem Quadrat der Geschwindigkeit bzw. mit einem Exponenten von mindestens 4. Da beide Geräuschkomponenten immer gleichzeitig wirksam werden, hängt der resultierende Geschwindigkeitsexponent des Gesamtgeräuschs vom Anteil der beiden Geräuschkomponenten am Gesamtgeräusch ab. Überwiegt die mechanische Geräuschregung tendiert der resultierende Geschwindigkeitsexponent zu einem Wert von 2, bei Überwiegen der aerodynamischen Geräuschregung liegt der resultierende Geschwindigkeitsexponent näher bei 4. Dies gilt für jede Frequenz.

Die Pegeldifferenzen der Rollgeräuschpegel für  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h ergeben sich, je nach resultierendem Geschwindigkeitsexponenten, folgendermaßen:

$$\begin{aligned} v^2 & DL = 3,5 \text{ dB} \\ v^{2,5} & DL = 4,4 \text{ dB} \\ v^3 & DL = 5,3 \text{ dB} \\ v^{3,5} & DL = 6,2 \text{ dB} \\ v^4 & DL = 7,0 \text{ dB} \end{aligned}$$

Daraus geht hervor, dass die Reifen-Fahrbahn-Geräusche des Winterreifens auf allen Grindingoberflächen nahezu ausschließlich von der aerodynamisch induzierten Geräuschkomponente bestimmt sind. Wie aus Abbildung 13 im **Anhang 2** hervorgeht, beträgt die Pegeldifferenz  $DL$  zwischen 6,5 dB(A) und 7 dB(A), was einem Geschwindigkeitsexponenten von 4 entspricht. Die Pegeldifferenzen für die anderen beiden Reifen sind deutlich niedriger und erreichen Werte von hinunter zu 3,5 dB(A) (A 13, MQ2), was einem Geschwindigkeitsexponenten von 2 entspricht. Auf dieser Oberfläche ist das Reifen-Fahrbahn-Geräusch ausschließlich mechanisch induziert. Die aerodynamische Komponente ist also bei dem EcoContact- und

<sup>2</sup> Auf der A 93 war die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf  $v_{zul} = 80$  km/h festgesetzt, so dass hier keine Messfahrten mit  $v = 120$  km/h durchgeführt werden konnten.

PremiumContact-Reifen auf den Grindingoberflächen stark reduziert.

#### 4.2.2 SPERoN®-Berechnungen mit gemessenen Oberflächenprofilen

##### 4.2.2.1 Eingangsgrößen

Für die Durchführung der SPERoN®-Berechnungen wurden die verwendeten CPB-Messreifen hinsichtlich ihrer Oberflächentextur und der mechanischen Eigenschaften messtechnisch untersucht. Die entsprechenden Charakteristika wurden in die Datenbank des SPERoN®-Modells aufgenommen.

Alle SPERoN®-Berechnungen wurden mit Version cars\_kernel\_v4\_Statistics\_v3\_0\_CPB durchgeführt.

Die für die Berechnungen angesetzte Radlast von 435 kg entspricht der tatsächlich am CPB-Messfahrzeug vorliegenden mittleren Belastung pro Rad.

##### 4.2.2.2 Auswahl der verwendeten Texturprofile

Die Ergebnisse der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen wurden den mit SPERoN® anhand der in situ gemessenen Texturen berechneten Vorbeirollpegeln gegenübergestellt.

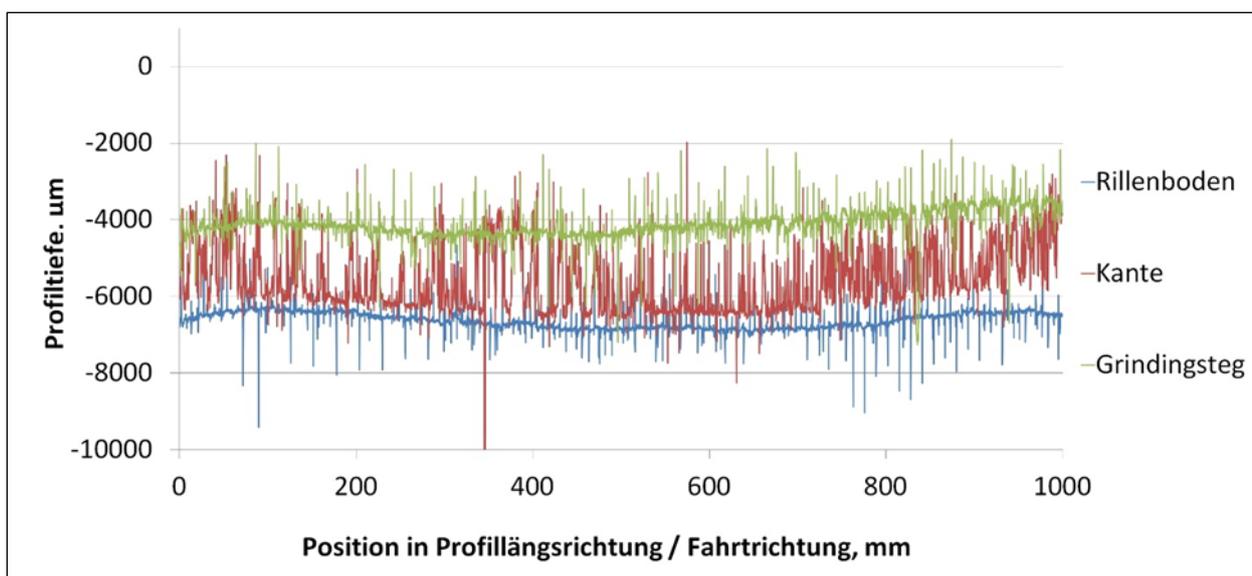
Die SPERoN®-Berechnungen wurden dabei anhand von 6 ausgewählten Spuren der Texturmessungen mit dem Laserprofilometer durchgeführt.

Ausgehend von der Annahme, dass das Rollgeräusch auf den Grindingoberflächen im Wesentlichen von der Textur auf den Stegen der Oberfläche bestimmt wird, weil nur diese mit dem Reifen in Kontakt kommen, wurde die Auswertung hier auf 6 ausgewählte Spuren auf den Stegen jeder Oberfläche beschränkt.

Abbildung 88 zeigt Beispiele für die unterschiedlichen Texturprofile. Gezeigt werden:

- ein Profil am Boden einer Groovingrille (blaue Kurve), dieses ist relativ eben und von nur geringen Rauigkeiten geprägt (diese Profile sind für die Rollgeräuschenstehung nicht relevant, da hier kein direkter Kontakt des Reifens mit den Groovingrillen vorliegt), sowie
- ein Profil an der Oberkante eines Grindingsteges (grüne Kurve), auch dieses ist relativ eben, weist aber insgesamt größere Rauigkeiten auf,
- ein Profil am Rande einer Groovingrille (rote Kurve): hier verläuft der Laserstrahl teilweise auf der Grindingoberfläche und teilweise an der Kante der Groovingrille. Hier entstehen durch den Verlauf des Messprofils am Rande der Rille und den dadurch verursachten streifenden Lichteinfall des Laserstrahls Artefakte, die keine tatsächliche Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche widerspiegeln. Derartige Profile dürfen bei den SPERoN®-Berechnungen nicht berücksichtigt werden, da sie zu falschen Rechenergebnissen führen können.

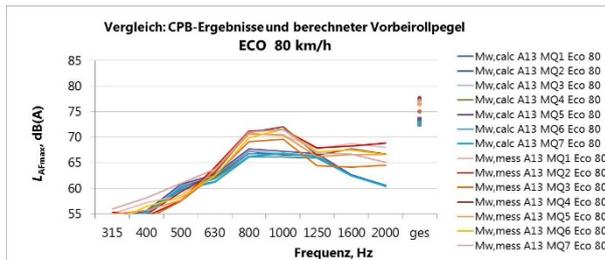
Die SPERoN®-Berechnungen wurden für jede Oberfläche mit zwei Sätzen zu je 6 ausgewählten Profilen auf der Stegoberfläche - entsprechend der grünen Kurve in Abbildung 88 - durchgeführt.



**Abbildung 88:** Beispiel für Texturprofile einer Grinding- und Grooving-Textur, gemessen mit Laserprofilometer: Boden einer Groovingrille (blau), Stegoberkante (grün), Profil am Rande einer Groovingrille mit deutlichen Artefakten (rot)

#### 4.2.2.3 SPERoN®-Rechenergebnisse

Die Ergebnisse der CPB-Messungen sind im **Anhang 3** und beispielhaft in Abbildung 89 zusammen mit den Rechenergebnissen der SPERoN®-Berechnungen mit dem bestehenden Modell für ausgewählte Oberflächen dargestellt.

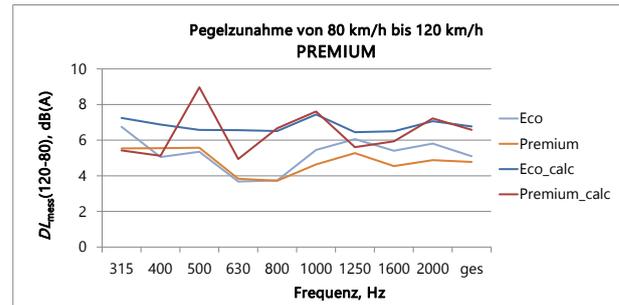


**Abbildung 89:** Vergleich der SPERoN®-Rechenergebnisse (blaue Kurven) und der CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ , rote Kurven) für Messreifen ECO bei  $v = 80$  km/h an allen Messquerschnitten auf der A 13

Der Vergleich von Mess- und Rechenergebnissen zeigt bei  $v = 120$  km/h prinzipiell eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Die Berechnungen für  $v = 80$  km/h führen im wichtigen Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 2 kHz dagegen zu systematisch niedrigeren Pegeln als die Messungen. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit ist also zu stark. Dies deutet darauf hin, dass die aerodynamische Geräuschkomponente mit der gegenüber der mechanischen Komponente größeren Geschwindigkeitsabhängigkeit bei der Intensitätsverteilung zwischen mechanischer und aerodynamischer Komponente überwiegt. Die bei den vorliegenden Modellberechnungen unterstellte Isotropie der Oberfläche – es wurden nur Texturprofile der Stegflächen herangezogen – führt also bei der hohen Geschwindigkeit zu weitgehend mit den Messungen übereinstimmenden Ergebnissen, wogegen das Modell aufgrund eines Überwiegens der aerodynamischen Komponenten die Pegel bei niedrigeren Geschwindigkeiten unterschätzt.

Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Kombination längsgerillter Reifenprofile mit der längsgerichteten anisotropen Textur von Grindingoberflächen die Entstehung aerodynamischer Geräusche im Reifen-Fahrbahn-Kontakt stark unterdrückt und das Reifen-Fahrbahn-Geräusch nahezu ausschließlich mechanisch induziert ist.

Diese Schlussfolgerung bestätigt sich, wenn man die Differenz der gemessenen bzw. berechneten Pegel für 80 km/h und 120 km/h gegenüberstellt, wie in Abbildung 90 dargestellt.



**Abbildung 90:** Pegeldifferenz  $L_{AF,max,120km/h} - L_{AF,max,80km/h}$  der CPB-Messergebnisse und der SPERoN®-Rechenergebnisse für Messreifen ECO und PREMIUM, Mittelwert über alle Messquerschnitte auf der A 13

Hier wird deutlich, dass die mittleren Pegeldifferenzen der Messwerte frequenzabhängig zwischen 4 dB(A) und 6 dB(A) liegen, wogegen das Modell Pegeldifferenzen zwischen 5,5 dB(A) und 7,5 dB(A) (mit Ausnahme der Terz bei 500 Hz) berechnet. Die frequenzabhängigen Geschwindigkeitsexponenten gehen also in den Messungen nicht über 3,5 hinaus, was auf einen hohen Anteil der mechanisch induzierten Geräusche hindeutet.

#### 4.2.2.4 Anpassung des SPERoN®-Modells

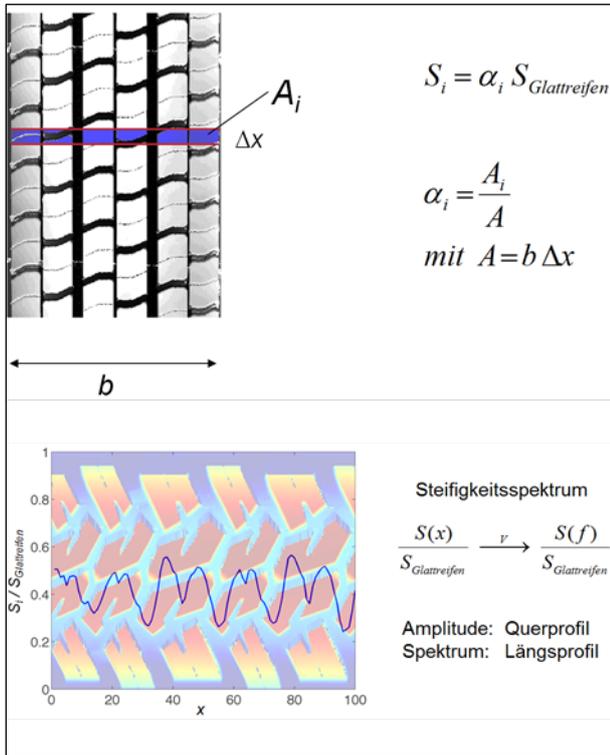
Demnach muss das SPERoN®-Modell bei der Modifikation für gerichtete Texturen also so angepasst werden, dass der Einfluss der aerodynamischen Komponenten verringert wird, die Gewichtung der mechanischen Anteile an der Rollgeräuschenstehung in diesem Fall dagegen verstärkt wird.

#### 4.2.3 Implementierung dreidimensionaler Texturmodelle

Auf den in diesem Bericht beschriebenen Grindingstrecken wurden 3D-Texturmessungen durchgeführt, die nicht nur in Längsrichtung, sondern auch in Querrichtung Informationen über die Oberflächenrauigkeit mit einer Auflösung von 0,1 mm liefern. SPERoN® benutzt die Querprofile zur Ermittlung von Stützstellen, an denen das Reifenprofil pro Querschnitt entlang des Reifenumfangs mit der Oberfläche in Kontakt ist und berechnet daraus die Funktion der Kontaktsteife.

Die Änderung der Kontaktsteife wird in Form einer Steifigkeitsfunktion abgebildet, die in Abhängigkeit des Ortes  $x$  in Umfangsrichtung des Reifens definiert ist. Für jeden Querstreifen  $i$  mit der Länge  $\Delta x$  und der Breite  $b$  ergibt sich eine modulierte Steife  $S_i$ . Diese beruht auf dem Flächenanteil  $\alpha_i$  in der Querschnittsfläche  $A = b \Delta x$ , der in Abhängigkeit vom Reifenprofil mit der Fahrbahnoberfläche in Kontakt sein kann, und der Steife  $S_{Glattroifen}$ , die sich ergäbe, wenn der Reifen profillos wäre (Abbildung

91). Die Steife  $S_{\text{Glattreifen}}$  wird aus Messungen der Shore A Härte der Profilklotze abgeleitet, der Flächenanteil  $\alpha_i$  ergibt sich aus der Auswertung der dreidimensional gemessenen Textur des Reifenprofils. Eine geschwindigkeitsabhängige Transformation des Ortsverlaufs der Kontaktsteife  $S = S(x)$  in den Spektralbereich führt zum Spektrum der Kontaktsteife  $S(f)$ .



**Abbildung 91:** Links: Kontaktfläche  $A_i$  pro Umfangsabschnitt mit der Gesamtfläche  $A$ ; rechts: Steifigkeitsfunktion  $S_i(x)$  mit dem zugrunde liegenden Reifenprofil im Hintergrund.

Umfangreiche Untersuchungen für die notwendige Auflösung der Textur in Querrichtung haben gezeigt, dass bei isotropen Texturen drei bis sechs Stützstellen in Querrichtung, also drei bis sechs parallele Längsprofile ausreichen, um den Kontakt für alle Oberflächentypen ausreichend zu beschreiben. Je feiner die Oberfläche darstellt, desto weniger parallele Profile sind notwendig. Wie die Voruntersuchung in Abschnitt 4.2.2 gezeigt hat, spielt die mechanische Geräuschanregung bei Grindoberflächen die dominierende Rolle. Eine Pegelminderung kann alleine durch Optimierung der Oberflächentextur erzielt werden. Die durch Grinding entstehende Oberflächentextur ist bislang jedoch noch so grob, dass eine erhöhte Auflösung der Textur in Querrichtung notwendig ist. Es reicht aber aus, die Grindtextur in Querrichtung durch sechs Stützstellen in einem Abstand von jeweils etwa 20 mm zueinander, die zufällig aus der 3D-Textur herausgegriffen werden, abzubilden. Dabei ist es gleichgültig, ob die Oberflächentextur neben

der Grindingstruktur auch Groovingrillen enthält oder nicht. Wenn die Groovingrillen so dicht nebeneinander angeordnet sind, dass sie innerhalb der Reifenaufstandsfläche zu liegen kommen, ist mindestens eine Groovingrinne in den sechs parallelen Profilen mit einzuschließen. Ansonsten ist die Textur auf der Oberfläche der Stege zwischen den Groovingrillen für die Rollgeräuschenentstehung maßgeblich.

Groovingrillen machen sich auch im texturinduzierten Strömungswiderstand bemerkbar. Durch diese Texturveränderung nimmt der Strömungswiderstand gegenüber der Grindoberfläche ohne Groovingrillen um eine Größenordnung ab. Änderungen in dieser Größenordnung sind akustisch bedeutsam. Die akustische Wirkung der Groovingrinne liegt also weniger in der Änderung der mechanischen Geräuschanregung durch die veränderte Oberflächentextur als in der Änderung der aerodynamischen Geräuschanregung durch den verminderten Strömungswiderstand.

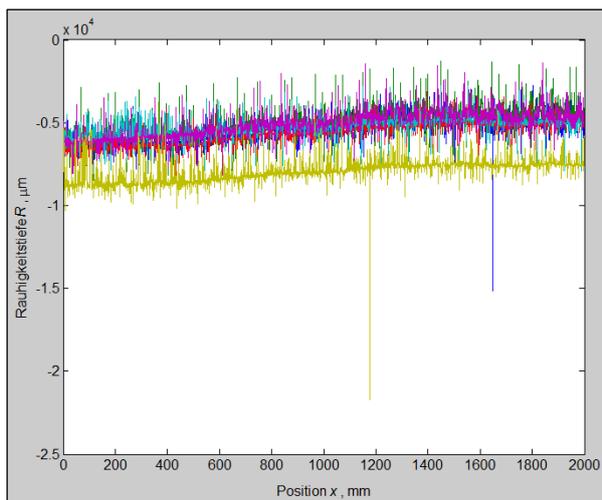
#### 4.2.4 Kalibrierung und Überprüfung des modifizierten Rechenmodells

Nach Anpassung der erforderlichen Eingangsdaten und des Rechenmodells wurden Berechnungen des Vorbeirollpegels für das Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der A 12 durchgeführt und mit den gemessenen Vorbeirollpegeln aus den Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen verglichen. Dabei kam der Berücksichtigung der Querfugen besondere Bedeutung zu. Wie weiter oben berichtet ist nicht auszuschließen, dass die Querfugen einen begrenzenden Einfluss auf die durch geräuschkindernde Betonoberflächen erzielbaren Pegelminderungen haben. Bei Vorbeifahrtmessungen ist davon auszugehen, dass mindestens die beiden Querfugen von drei aufeinanderfolgenden Platten das Messergebnis beeinflussen. Bei einem Radstand des Messfahrzeugs von 2,7 m und einem Fugenabstand in Fahrtrichtung von 5 m werden die beiden Querfugen in einem Abstand von 2,7 m bzw. 2,3 m von Vorderrad und Hinterrad insgesamt viermal überrollt. Aufgrund der auf 2 m begrenzten Länge der Texturprofile, die in das Rechenmodell eingespeist werden, kann der Abstand der Überrollvorgänge von 2,7 m bzw. 2,3 m im Modell nicht genau eingehalten werden. Bei Einfügen einer Querfuge in der Mitte jedes parallelen Längsprofils finden die Überrollvorgänge simulatorisch damit jeweils in einem Abstand von 2 m statt. In das Rechenmodell werden die Originalprofile der Texturmessungen auf dem genannten Testfeld 1.1 eingespeist. Die Texturmessungen haben immer zwischen zwei Querfugen in der Mitte einer Platte stattgefunden. Aus diesem Grund wurde die Querfuge für die Berechnungen künstlich eingefügt.

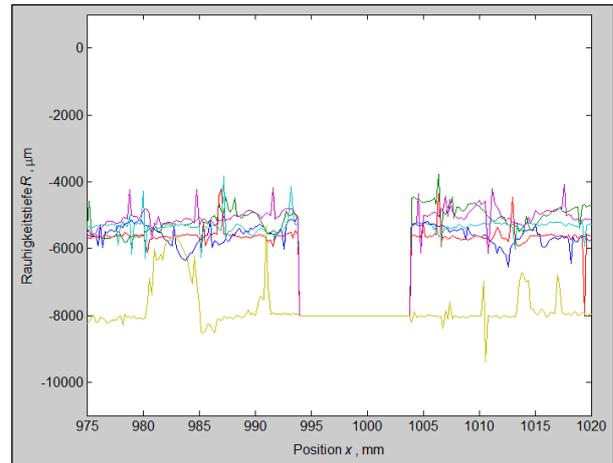
Abbildung 92 zeigt die tatsächlich auf Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke auf der BAB A 12 ausgeführte Querfuge zum Zeitpunkt der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen. In Abbildung 93 sind die sechs ausgewählten parallelen Texturlängsprofile dargestellt. Abbildung 94 zeigt einen 40 mm langen Ausschnitt der Längsprofile mit der künstlich eingefügten Querfuge.



**Abbildung 92:** Querfuge auf Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke auf der BAB A 12 zum Zeitpunkt der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen.



**Abbildung 93:** Sechs Längsprofile der Textur auf Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke auf der BAB A 12. X-Achse in mm, y-Achse in  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 94:** Detail der sechs Längsprofile der Textur auf Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke auf der BAB A 12 mit künstlich eingefügter Querfuge mit einer Breite von 10 mm und einer Tiefe von 3 mm. X-Achse in mm, y-Achse in  $\mu\text{m}$ .

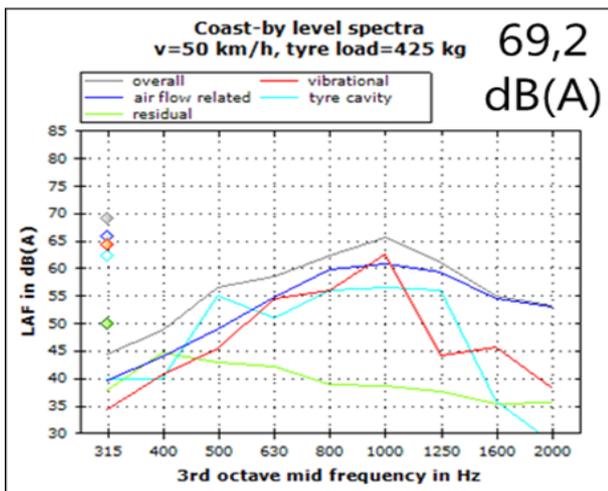
Die SPERoN<sup>®</sup>-Berechnungen wurden mit den beiden Kontrollierten Vorbeifahrten eingesetzten Sommerreifen Continental EcoContact und Continental PremiumContact für die drei Geschwindigkeiten 50, 80 und 100 km/h durchgeführt. Die Geschwindigkeiten entsprechen den nominellen Fahrgeschwindigkeiten der Messungen. Für den Strömungswiderstand wurde der gemessene Wert von 513 Pa s/m eingesetzt.

Die Berechnungen wurden für die Texturprofile mit und ohne Querfuge durchgeführt. Die Ergebnisse sind beispielhaft in Abbildung 95 und im **Anhang 4** (Abbildung 1 bis Abbildung 6) für den Reifen EcoContact und beispielhaft in Abbildung 96 und im **Anhang 4** (Abbildung 7 bis Abbildung 12) für den Reifen PremiumContact dargestellt. Die dargestellten Terzspektren sind aufgeteilt nach den einzelnen Geräuschanteilen und dem Gesamtspektrum aller Geräuschanteile. Zu den Geräuschkomponenten zählen die mechanisch und aerodynamisch induzierten Geräusche der Reifen-Fahrbahn-Interaktion, die nach außen abgestrahlten Geräusche des Reifentorus und die an der Karosserie entstehenden Strömungsgeräusche als Störkomponente.

Den Diagrammen ist zu entnehmen, dass das Reifen-Fahrbahn-Geräusch nur bei der niedrigen Geschwindigkeit von 50 km/h von der mechanischen Geräuschregung bestimmt ist. Bei höheren Geschwindigkeiten nimmt der Einfluss ab und überwiegt die aerodynamische Geräuschregung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Dieses Verhalten ist beim EcoContact-Reifen deutlicher ausgeprägt als beim PremiumContact-Reifen, der zu einem höheren Anteil der mechanisch induzierten Rollgeräusche führt. Die getroffene Aussage gilt insbesondere auch nur für den Fall ohne Querfuge. Betrachtet man die mechanische Rollgeräuschkomponente

(rote Kurve) für den Fall mit Querfuge, ergibt sich ein deutlich anderes Bild. Die mechanische Geräuschanregung nimmt erheblich zu und führt bei den höheren Geschwindigkeiten zu einer Erhöhung des Pegels der mechanischen Geräuschkomponente von etwa 5 dB(A) bei beiden Reifen, so dass auch der Gesamtgeräuschpegel von der Erhöhung betroffen ist. Im Endergebnis führt die Querfuge zu einer Zunahme des Vorbeirollpegels von rund 2 dB(A) im Fall des EcoContact-Reifens und von 1 dB(A) im Fall des PremiumContact-Reifens. Da der EcoContact-Reifen für den Fall ohne Querfuge bei den höheren Geschwindigkeiten um etwa 1 dB(A) leiser ist als der PremiumContact-Reifen, zeigt sich hier deutlich die bezüglich der erzielbaren Rollgeräuschminderung durch Texturoptimierung limitierende Wirkung der Querfugen. Bei den höheren Geschwindigkeiten werden beide Reifen auf etwa das gleiche Pegelniveau angehoben.

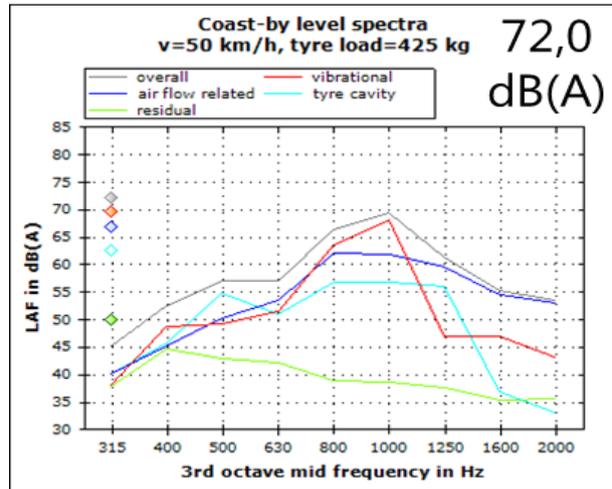
Abbildung 1 bis Abbildung 6 im **Anhang 4** und beispielhaft die Abbildung 95 zeigen die berechneten Terzspektren des Vorbeirollpegels, Reifen EcoContact, Geschwindigkeit 50, 80 und 100 km/h ohne und mit Querfuge für die Textur von Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12. Die Rauten auf der linken Seite der Diagramme geben den Gesamtpegel der Einzelkomponenten und des Gesamtgeräuschs an. Grau: Gesamtgeräusch, rot: mechanisch induzierter Rollgeräuschanteil, dunkelblau: strömungsinduzierter Rollgeräuschanteil, hellblau: Torusgeräusch, hellgrün: Strömungsgeräusche Karosserie.



**Abbildung 95:** Berechnete Terzspektren des Vorbeirollpegels, Reifen EcoContact, 50 km/h ohne Querfuge, Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke A 12

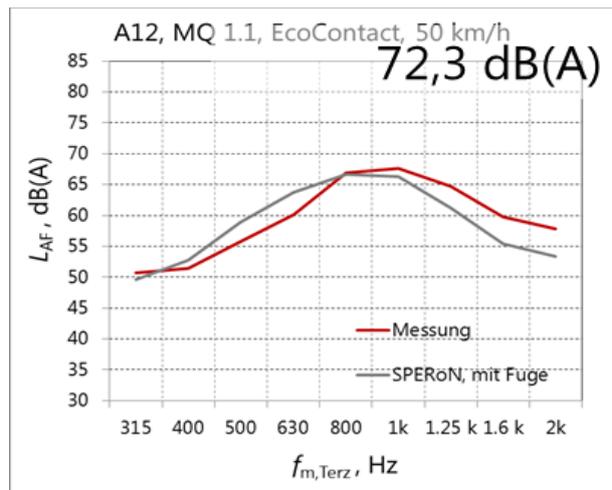
Abbildung 7 bis Abbildung 12 im **Anhang 4** und beispielhaft die Abbildung 96 zeigen die berechneten Terzspektren des Vorbeirollpegels, Reifen PremiumContact, Geschwindigkeit 50, 80 und 100 km/h ohne und mit Querfuge für die Textur von Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12. Die

Rauten auf der linken Seite der Diagramme geben den Gesamtpegel der Einzelkomponenten und des Gesamtgeräuschs an. Grau: Gesamtgeräusch, rot: mechanisch induzierter Rollgeräuschanteil, dunkelblau: strömungsinduzierter Rollgeräuschanteil, hellblau: Torusgeräusch, hellgrün: Strömungsgeräusche Karosserie.



**Abbildung 96:** Berechnete Terzspektren des Vorbeirollpegels, Reifen PremiumContact, 50 km/h ohne Querfuge, Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke A 12

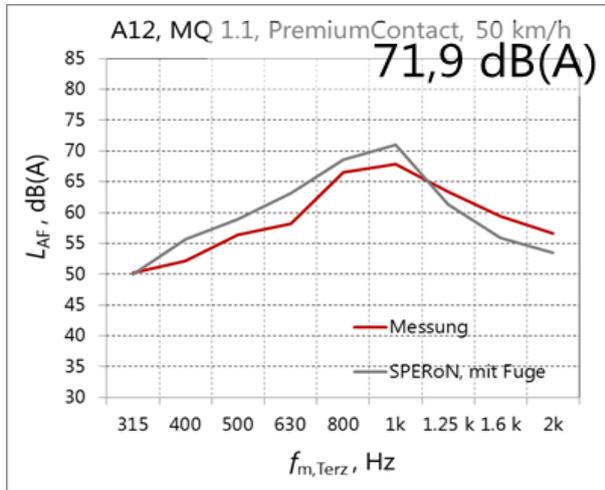
Abbildung 13 bis Abbildung 18 im **Anhang 4** und beispielhaft die Abbildung 97 zeigen den Vergleich der gemessenen und berechneten Terzspektren des Vorbeirollpegels, Reifen EcoContact, Geschwindigkeit 50, 80 und 100 km/h für die Textur von Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12.



**Abbildung 97:** Gemessenes Terzspektrum des Vorbeirollpegels, Reifen EcoContact, Geschwindigkeit 50 km/h, Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12. Rote Kurve: gemessenes Terzspektrum, graue Kurve: berechnetes Terzspektrum Gesamtgeräusch

Abbildung 19 bis Abbildung 24 im **Anhang 4** und beispielhaft die Abbildung 98 zeigen den Vergleich der gemessenen und berechneten Terzspektren

des Vorbeirollpegels, Reifen PremiumContact, Geschwindigkeit 50, 80 und 100 km/h für die Textur von Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12.



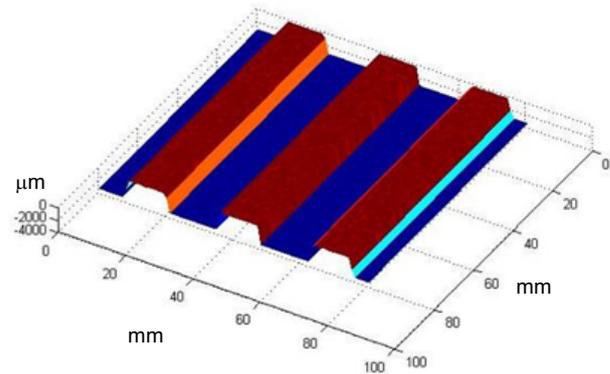
**Abbildung 98:** Gemessenes Terzspektrum des Vorbeirollpegels, Reifen PremiumContact, Geschwindigkeit 50 km/h, Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12. Rote Kurve: gemessenes Terzspektrum, graue Kurve: berechnetes Terzspektrum Gesamtgeräusch

Aus dem Vergleich der berechneten und gemessenen Terzspektren geht die sehr gute Übereinstimmung der Berechnungen mit den Messungen hervor. Da den Messungen die Berechnungen für den Fall mit Querruge gegenübergestellt sind, zeigt sich, dass die Berücksichtigung der Querruge in den Berechnungen notwendig ist, um die Übereinstimmung der Berechnungen mit den Messungen herzustellen und das Rechenmodell andererseits den Sachverhalt auch richtig reproduziert.

### 4.3 Mathematische Modellbildung verschiedener geräuschmindernder Oberflächentexturen

Im FE-Projekt 08.0211/2011/OGB [FE 08.0211/2011/OGB] wurden anhand von künstlich erzeugten, idealisierten Texturen Parametervariationen von Grindingtexturen vorgenommen und deren Auswirkungen auf die akustischen Eigenschaften untersucht.

Den künstlichen Texturen liegen Grindingprofile zugrunde, die im Querschnitt Trapezstrukturen entsprechen. Die Kanten der Stege sind dabei so weit abgeschrägt, dass die Realität gegrindeter Oberflächen besser angepasst sind (s. Abbildung 99). Die Stege wurden an ihrer Oberseite mit einer im Vergleich zu den Ausmaßen der Grindingtextur sehr feinen (künstlichen) Texturierung versehen (max. Höhenunterschiede ca. 0,1 mm).

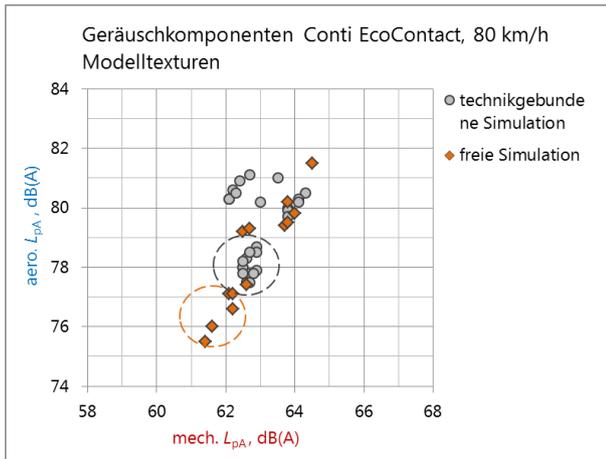


**Abbildung 99:** Trapezförmige Profilstruktur der Texturen für die Parametervariation.

Auf Höhenversätze der Stege untereinander oder unterschiedliche Rillentiefen, die bei der realen Herstellung von Grindingtexturen nicht zu vermeiden sind, wurde sowohl im Längs- als auch im Querprofil bewusst verzichtet. Auf diese Weise wurden (akustische) Einflüsse, die zufälligen Charakter haben, in dieser systematischen Herangehensweise der Simulation künstlicher Texturen mit bekannten Parametern verzichtet, um den Einfluss der variierten Parameter möglichst ohne schwer quantifizierbare Nebeneffekte feststellen und ggf. Zusammenhänge herstellen zu können. Auf die Untersuchung der herstellungsbedingten Zufallstexturen, insbesondere auf den Stegobersflächen, wird in Kapitel 4.4 eingegangen.

Die Variationen der Modelltexturen wurden derart durchgeführt, dass zum einen verschiedene Kombinationen von Steg- und Rillenbreiten ohne Rücksicht auf die Herstellbarkeit mit marktüblichen Grindingmaschinen berechnet wurden („freie Simulation“). Die Stegbreite variiert dabei zwischen 1 mm und 3,8 mm, die Rillenbreite zwischen 1,6 mm und 3,8 mm. Zum anderen wurden aus den Vorgaben bestehender Grindingmaschinen entstehende Parametervariationen kombiniert („technikgebundene Simulation“). Dabei wurden die Distanzscheibenbreiten (verantwortlich für die Entstehung der Stege) im Bereich zwischen 1 mm und 2,5 mm und die Segmentbreiten (verantwortlich für das Entstehen der Rillen) im Bereich zwischen 2,6 mm und 3,2 mm kombiniert. Zusätzlich wurde die Rillentiefe in beiden Fällen mit 1 mm und 2 mm variiert.

Abbildung 100 zeigt die SPERoN® Simulationsergebnisse für den repräsentativen Reifentyp Continental EcoContact und eine Geschwindigkeit von  $v = 80$  km/h.



**Abbildung 100:** Simulationsergebnisse für die Modelltexturen aus dem FE-Projekt 08.0211/2011/OGB.

In dem Diagramm sind die berechneten A-bewerteten Schalldruckpegel der aerodynamischen Geräuschkomponente  $aero. L_{pA}$  über dem berechneten Schalldruckpegel der mechanisch induzierten Geräuschkomponente  $mech. L_{pA}$  aufgetragen. Die Kreise kennzeichnen jeweils die Gruppe der niedrigsten Schalldruckpegel beider Komponenten. Die Texturgruppen sind gekennzeichnet durch Rillentreifen, die nicht größer als 2,8 mm sind und eine Tiefe von 1 mm aufweisen. Die Stegbreite spielt, vorausgesetzt die Stegoberfläche ist – wie hier angenommen – ebenflächig, eine untergeordnete Rolle. Die Gruppe der leisesten Texturen hebt sich um bis zu -3 dB(A) von der mechanisch induzierten Geräuschkomponente auf den anderen Texturen ab. Bei der aerodynamisch induzierten Geräuschkomponente beträgt die Dynamik sogar 6 dB(A).

Die daraus abzuleitende Forderung nach möglichst geringer Rillentiefe bei kleinen Rillentreifen und damit engem Schneidscheibenabstand könnte im Widerspruch stehen zur Forderung nach Herstellung möglichst griffiger Oberflächen, die die Sicherheit der Fahrbahn auch bei nasser Fahrbahnoberfläche gewährleisten müssen.

#### 4.4 Variation der Modelle zur Simulation in der Praxis auftretender Abweichungen von der Modelltextur

In der Baupraxis sind die Grindingtexturen derzeit noch durch zufällige Formen der Stege gekennzeichnet. Je nach Wellenbesatz, Vortrieb und Betonqualität zum Zeitpunkt des Grindings brechen die Stege unkontrolliert und zufällig. Eine definierte Modelltextur lässt sich theoretisch zwar vorgeben und maschinell einplanen, die entstehende Textur weicht jedoch derzeit davon noch erheblich ab. Dabei spielt nicht nur der Wellenbesatz, also das Kol-

lektiv der sich abwechselnden Schneid- und Distanzscheiben definierter Scheibendicke auf der Grindingwelle eine Rolle, sondern auch die Betonzusammensetzung und die Qualität des Oberbetons an der Oberfläche zum Zeitpunkt des Grindings und die strukturdynamischen Eigenschaften des Werkzeugs und der Antriebseinheit. Der großtechnische Herstellungsprozess ist (noch) nicht an die Texturmodelle angepasst.

Die durch realisierte Grindingtexturen hervorgerufenen Pegelunterschiede des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs betragen für identischen Wellenbesatz derzeit bis zu 2 dB(A). Die Oberflächentextur der Stege spielt dabei eine entscheidende Rolle. Aus gemessenen Laserprofilen verschiedener Grindingtexturen wurden deshalb die Profile aussortiert, die entlang der Stege aufgenommen wurden, und statistisch analysiert. Es wurden die für die akustischen Eigenschaften der Oberflächen wichtigen Parameter ausgewertet:

- Mean Profile Depth  $MPD$

nach [DIN EN ISO 13473]; die  $MPD$ -Werte wurden über eine Auswertelänge von 100 mm für 2.000 mm lange Laserprofile ermittelt. Daraus ergeben sich 20  $MPD$ -Werte je Profil.

- Skewness (Schiefe)  $R_{sk}$

Die Skewness ist ein Maß für die Form des Texturprofils. Festgestellt wird die Form anhand der Verteilung der nach unten und nach oben gerichteten Texturelemente. Insofern ist die Skewness mit dem Gestaltfaktor  $g$  vergleichbar. Werte von  $R_{sk}$  um 0 kennzeichnen Texturen, in denen Plateaus und Täler gleichverteilt sind. Werte kleiner Null kennzeichnen sogenannte negative Texturen, also solche mit ausgeprägten Plateaus. Je negativer der Wert, desto weniger Einschnitte („Täler“) enthält das Profil. Werte größer Null weisen auf ausgeprägte Kuppen hin. Letztere sind als akustisch ungünstig einzustufen.  $R_{sk}$  wird aus der Summe der Verhältnisse der Abweichung der Rauigkeitstiefe  $R_i$  an der Position  $x_i$  des Texturprofils vom Mittelwert der Rauigkeitstiefe  $\bar{R}$  zur Standardabweichung  $\sigma$  der Rauigkeitstiefe über die Auswertelänge von 100 mm mit  $N$  Abtastwerten wie folgt berechnet:

$$R_{sk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{(R_i - \bar{R})^3}{\sigma^3}$$

- Kurtosis (Wölbung)  $R_{ku}$

Die Kurtosis ist sowohl ein Maß für die „Spitzigkeit“ bzw. Rundheit der Texturelemente als auch die Gleichmäßigkeit der Höhenverteilung der Texturspitzen entlang des Texturprofils. Werte

über 3 weisen mit ansteigendem Wert auf spitzförmige und hinsichtlich der Höhenlage zunehmend ungleichmäßig verteilte Texturelemente hin. Werte unter 3 kennzeichnen verrundete und gleichmäßig verteilte Texturelemente.  $R_{ku}$  wird aus der Summe der Verhältnisse der Abweichung der Rauigkeitstiefe  $R_i$  an der Position  $x_i$  des Texturprofils vom Mittelwert der Rauigkeitstiefe  $\bar{R}$  zur Standardabweichung  $\sigma$  der Rauigkeitstiefe über die Auswertelänge von 100 mm mit  $N$  Abstastwerten wie folgt berechnet:

$$R_{ku} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{(R_i - \bar{R})^4}{\sigma^4}$$

- Mittlerer Profilsitzenabstand  $\Delta pp$

Der mittlere Profilsitzenabstand ist der Mittelwert der Abstände zwischen lokalen Maxima des Texturprofils, die über einem vorgegebenen Abstandsmindestwert liegen. In der vorliegenden Untersuchung wurden Werte von 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm und 5 mm für diesen Mindestabstand gewählt. Dies entspricht den Abmessungen von Profilrillen und Profilblöcken handelsüblicher Pkw-Reifen.

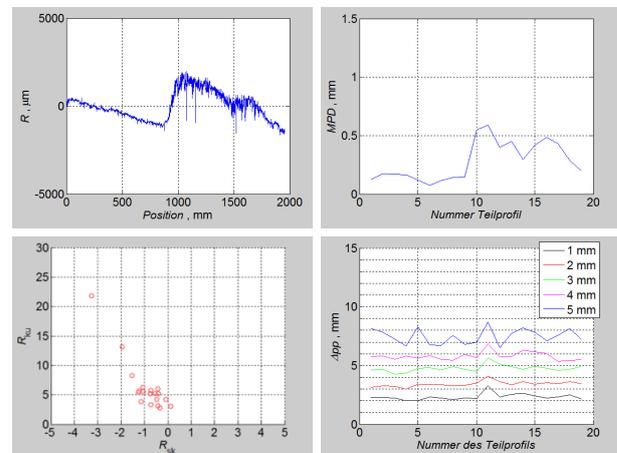
Diese Parameter wurden für eine Vielzahl von Grindingtexturen, die zum Zweck der Lärminderung hergestellt wurden, ausgewertet. Im **Anhang 5** und beispielhaft in Abbildung 101 sind die Auswertungen beispielhaft für zwei Grindingtexturen identischen Wellenbesatzes (2,8 mm Segmentbreite, 1,5 mm Distanzscheibenabstand/Segmentabstand), aber unterschiedlichen akustischen Verhaltens dargestellt. Der Oberbeton ist in beiden Fällen gleich zusammengesetzt. Die CPX-Pegel für den Reifen P und die Pegel der Kontrollierten Vorbeifahrt mit dem EcoContact Reifen unterscheiden sich bei diesen beiden Oberflächen um 2 dB(A). Textur A führt zu 2 dB(A) höheren Rollgeräuschpegeln als Textur B.

Aufgetragen sind pro Texturprofil die Rauigkeitstiefe  $R$  über der Position entlang eines 2 m Texturprofils der Stegoberfläche, die daraus berechneten  $MPD$ -Werte in Abhängigkeit vom 100 mm langen Auswerteabschnitt entlang des 2 m Profils, Kurtosis  $R_{ku}$  und Skewness  $R_{sk}$  als Wertepaar für den jeweiligen 100 mm Auswerteabschnitt als Punktwolke aller Auswerteabschnitte und der mittlere Profilsitzenabstand  $\Delta pp$  aller 100 mm Auswerteabschnitte in Abhängigkeit vom Auswerteabschnitt und vom gewählten Mindestabstand  $\Delta pp_{min}$ . Für jede der beiden Texturen A und B sind zwei Stegtexturprofile (Profil 1 und Profil 2), die parallel zueinander aufgenommen wurden, dargestellt und ausgewertet.

Wesentliche Unterschiede beider Texturen bestehen in den  $MPD$ -Werten und in der Verteilung der Kurtosis  $R_{ku}$  und Skewness  $R_{sk}$ . Während Textur B zu einer Mittleren Profiltiefe von durchgehend nicht mehr als 0,4 mm führt, schwanken die  $MPD$ -Werte für Textur A abschnittsweise zwischen 0,2 mm und 1,3 mm. Die Kurtosis ist bei Textur B mit nur zwei Ausnahmen auf Werte bis etwa 10 begrenzt bei gleichmäßiger Verteilung der Skewness-Werte zwischen -2 und +2. Textur A führt dagegen zu Kurtosis-Werten von bis zu etwa 20 bei ungleichmäßiger Verteilung der Skewness-Werte (besonders Profil 1).

Die vier Diagramme pro Textur sind wie folgt eingeteilt:

- links oben: Rauigkeitstiefe  $R$  in Abhängigkeit von der Position,
- rechts oben:  $MPD$  in Abhängigkeit von der Nummer des 100 mm langen Teilprofils,
- links unten: Kurtosis  $R_{ku}$  jedes 100 mm langen Teilprofils aufgetragen über der Skewness  $R_{sk}$  für das jeweilige Teilprofil,
- rechts unten: Mittlerer Profilsitzenabstand  $\Delta pp$  pro Teilprofil in Abhängigkeit von der Nummer des 100 mm langen Teilprofils, Parameter ist der gewählte Mindestabstand  $\Delta pp_{min}$ .



**Abbildung 101:** Texturen der Stegoberflächen bei identischem Wellenbesatz und unterschiedlichem akustischen Verhalten, hier: Textur A Profil 1

Gleichzeitig ist damit aber auch der Wertebereich der Formparameter für in der Praxis vorkommende Grindingtexturen umrissen. Die Skewness ist typischerweise gleichverteilt zwischen negativen und positiven Werten. Die Stegoberflächen weisen damit aber weder ausgeprägt negative (akustisch günstige) noch ausgeprägt positive Gestalt (akustisch ungünstige) auf. Vom Grindingergebnis wesentlich stärker beeinflusst ist die Kurtosis und damit die Höhenlage der Profilsitzen zueinander. Dies stellt damit einen wesentlichen Parameter für die Variation von Modelltexturen dar.

Überraschendes Ergebnis dieser Untersuchung ist die Robustheit des Profilsitzenabstands  $\Delta pp$  gegenüber der Variabilität der übrigen Parameter. Er bleibt trotz großer Unterschiede in der Mittleren Profiltiefe  $MPD$  und der Kurtosis  $R_{ku}$  im Wesentlichen unverändert erhalten. Dies gilt unabhängig vom gewählten Mindestabstand  $\Delta pp_{min}$ , was darauf hindeutet, dass der Profilsitzenabstand nicht mit der Grindingtextur, sondern mit Materialeigenschaften zusammenhängt. Das Ausmaß des Stegbruchs und damit Anzahl und Verteilung der Lücken entlang der Stege ist auf die Betonzusammensetzung, unter Umständen lediglich auf den Größtkorndurchmesser zurückzuführen. Aus diesen Gründen wurde im Vorhaben großer Wert auf die Untersuchung des Einflusses der Betonzusammensetzung auf die Grindingtextur gelegt.

Variationen theoretischer Modelle zur Simulation der in der Praxis auftretenden Abweichungen von vorgegebenen Modelltexturen müssen dementsprechend berücksichtigen, dass die Stege keine gleichmäßige Oberfläche mit gleichverteilten Texturerelementen kleiner Profiltiefe aufweisen. Die Texturerelemente sind durch eine große Variabilität der Höhenlage zueinander gekennzeichnet. Profile, die zu geringeren Rollgeräuschpegeln führen, weisen eine gleichmäßigere Höhenlage der Profilsitzen auf. Die Orientierung der Texturerelemente schwankt von Auswerteabschnitt zu Auswerteabschnitt (hier mit 100 mm Länge) gleichmäßig zwischen eher plattentypischer Gestalt (negative Gestalt) und eher kuppiger Gestalt (positive Gestalt). Bei Modellvariationen ist besonders darauf zu achten, dass der Mittlere Profilsitzenabstand bei Variation der Mittleren Profiltiefe und der Skewness erhalten bleibt.

## 5 Laborversuche

### 5.1 Vorgehen

Im ersten Versuchsteil wurden Standardbetone hergestellt, deren Zusammensetzung praxisüblichen Waschbetonen sowie Betonen für konventionelle Texturierungen, wie z. B. Kunstrasenlängsstrich entspricht. Anschließend wurden optimierte Betone entwickelt, die besonders geeignet sind, wenn bei Neubaumaßnahmen die Oberfläche mittels Grinding texturiert werden soll. Dabei wurden Optimierungsstrategien hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der Texturdauerhaftigkeit verfolgt. Zur Entwicklung der optimierten Betone wurde der Wasserzementwert sowie Größtkorn und Sieblinie der Gesteinskörnung variiert. Zur Charakterisierung der Betone wurde deren Druck- und Spaltzugfestigkeit

bestimmt. An den optimierten Betonen wurde zusätzlich der Frost-Tausalz-Widerstand mit dem CDF-Test nach [DIN CEN/TS 12390-9] bestimmt.

Im zweiten Versuchsteil wurden die hergestellten Betone mit einer für Laborversuche entwickelten Grindingmaschine texturiert. Die Texturierung erfolgte an Betonplatten mit einer Länge von 400 mm und einer Breite von 350 mm. Es wurden praxisübliche Texturen sowie lärmtechnisch optimierte Texturen hergestellt. Die Grindingtexturen wurden hinsichtlich ihrer Texturtiefe und ihrer Griffigkeit (SRT-Pendel) untersucht. Zur Beurteilung der lärmminimierenden Eigenschaften der Texturen wurden Texturmessungen mit einem Laserprofilometer durchgeführt und der texturinduzierte Strömungswiderstand bestimmt. Anhand dieser Ergebnisse wurde anschließend mit dem Simulationsprogramm SPE-RoN® die zu erwartende Geräuschemission der Oberflächen berechnet.

Im dritten Versuchsteil wurde die Dauerhaftigkeit ausgewählter Betone bzw. Texturen untersucht. Dazu wurde der Frost-Tausalz-Widerstand der Texturen in Anlehnung an den CDF-Test bestimmt sowie die Einwirkung von saurem Regen durch einen Säureangriff (pH 4,5) simuliert. Des Weiteren wurden Oberflächen mit dem Aachener Ravelling Tester (ARTE) mechanisch beansprucht. Im Anschluss an die mechanische Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE wurden erneut die akustisch bzw. griffigkeitstechnisch relevanten Oberflächeneigenschaften der Texturen erfasst und bewertet.

Zusätzlich wurde untersucht, welches Alter des Betons bzw. welche Betonfestigkeit zum Zeitpunkt des Grindings vorliegen muss, um die gewünschte Texturgeometrie zielsicher in die Betonoberfläche schneiden zu können. Orientierend wurde auch der Einfluss der Nachbehandlung auf die Eigenschaften der Grindingtextur untersucht.

### 5.2 Betone

#### 5.2.1 Ausgangsstoffe

Für die Laborversuche wurden ein praxisüblicher CEM I 42,5 N sowie ein CEM III/A 42,5 N-NA verwendet. In Tabelle 10 sind die für die Laborversuche verwendeten Gesteinskörnungen aufgeführt.

Gesteinskörnungen	Werk
Natursand 0/2	A
gerundet 2/8	
gerundet 8/16	
gerundet 16/32	
gebrochen 2/5	
gebrochen 5/8	
gebrochen 8/11	
gebrochen 11/16	
gebrochen 16/22	
gebrochen 2/8	
gebrochen 2/8	B
gebrochen 8/16	
gebrochen 16/22	
	C

**Tabelle 10:** Gesteinskörnungsfractionen für die Laborversuche

Die groben Gesteinskörnungen wurden aus der „Liste von bewährten, hinsichtlich AKR unbedenklichen Vorkommen von groben Gesteinskörnungen für den Einsatz in Fahrbahndecken aus Beton“ der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ausgewählt. Aus dem Werk A standen sowohl gerundete als auch gebrochene Gesteinskörnungen zur Verfügung. Das gerundete Material hatte ein maximales Größtkorn von 32 mm und dient der Herstellung praxisüblicher Unterbetone. Die gebrochene Gesteinskörnung des Werks A wies ein maximales Größtkorn von 22 mm auf und dient der Herstellung praxisüblicher Oberbetone, die beispielsweise mittels Kunstrasen texturiert werden. Des Weiteren wurde für die Herstellung von Waschbetonen gebrochene Gesteinskörnung der Werke B und C verwendet. In Tabelle 11 sind die für die hier durchgeführten Untersuchungen relevanten Gesteinskörnungseigenschaften Petrographie und PSV aufgeführt.

Werk	Petrographie	PSV
A	>70% Kalkstein	51
B	100% Rhyolith	59
C	100% Andesit	58

**Tabelle 11:** Eigenschaften der verwendeten Gesteinskörnungen

### 5.2.2 Standardbetone

Das Grinding kommt bisher hauptsächlich zum Einsatz, um die Griffigkeit und Ebenheit von Bestandsstrecken zu verbessern. Dabei wurde beobachtet, dass die hergestellten Grindingoberflächen auch lärmindernd wirken können [FE 08.0210/2010/ORB]. Ein Ziel dieses Forschungsvorhabens war es zu klären, unter welchen Randbedingungen mit dem Grinding von Bestandsstrecken neben der Griffigkeitsverbesserung zielsicher eine Lärminderung erzielt werden kann. Für die

Untersuchungen wurden zwei Betonzusammensetzungen gewählt, die häufig vorliegen, wenn bei Bestandsstrecken ein Grinding erfolgt. Dabei handelt es sich um einen Waschbeton mit stetiger Sieblinie sowie um einen Oberbeton, dessen Oberflächenmörtel beispielsweise mit einem Jutetuch bzw. Kunstrasen texturiert wurde. Die Zusammensetzungen der Betone sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgeführt. Als Gesteinskörnung wurde Material des Werks A verwendet.

Beton 1 (Waschbeton)	
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	420
Zementart	CEM I 42,5 N
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	181
Wasserzementwert	0,43
feine Gesteinskörnung 0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	480
grobe Gesteinskörnung 5/8 [kg/m <sup>3</sup> ] <sup>1)</sup>	1213
LP-Gehalt [Vol.-%]	5,0
Festigkeitsklasse	C 30/37

<sup>1)</sup> Als grobe Gesteinskörnung wurde Material der Werke B und C verwendet

**Tabelle 12:** Beton 1 (Waschbeton)

Beton 2 (Oberbeton für z. B. Kunstrasentextur)	
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340
Zementart	CEM I 42,5 N
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	146
Wasserzementwert	0,43
feine Gesteinskörnung 0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	547
grobe Gesteinskörnung 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ], gerundetes Material	242
grobe Gesteinskörnung 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ], gerundetes Material	432
grobe Gesteinskörnung 8/11 [kg/m <sup>3</sup> ], gebrochenes Material	57
grobe Gesteinskörnung 11/16 [kg/m <sup>3</sup> ], gebrochenes Material	76
grobe Gesteinskörnung 16/22 [kg/m <sup>3</sup> ], gebrochenes Material	540
LP-Gehalt [Vol.-%]	4,0
Festigkeitsklasse	C 30/37

**Tabelle 13:** Beton 2: Oberbeton für z.B. Jutetuch- oder Kunstrasentextur

Die grobe Gesteinskörnung von Beton 2 wurde so zusammengesetzt, dass wie nach [TL Beton-StB 07] gefordert für die Gesteinskörnung  $\geq 8$  mm mehr als 50 M.-% die Kategorie C90/1 erfüllen und der Anteil an Gesteinskörnung der Kategorie C90/1 bezogen auf das Korngemisch mehr als 35 M.-% betragen. Die Sieblinie der Gesteinskörnungen wurden nach [TL Beton-StB 07] für beide Betone so gewählt, dass der Siebdurchgang durch das 1-mm-

Sieb 27 M.-% und durch das 2-mm-Sieb 30 M.-% bzw. beim Waschbeton 35 M.-% nicht überschreitet. Als Zusatzmittel wurde neben einem Luftporenbildner vereinzelt ein Fließmittel eingesetzt, um die Verarbeitbarkeit zu verbessern.

### 5.2.3 Optimierte Betone

Ein weiteres Ziel des Forschungsvorhabens war es, Betonzusammensetzungen zu entwickeln, die besonders geeignet sind, wenn das Grinding zur Texturierung von Neubaustrecken eingesetzt wird. Auf Basis von praxisüblichen Fahrbahndeckenoberbetonen wurden dabei die Optimierungsstrategien

1. Wirtschaftlichkeit der Betonzusammensetzung und
2. Dauerhaftigkeit bzw. Formgenauigkeit der Grindtextur

verfolgt.

Zu 1.:

Bei herkömmlichen Oberbetonen enthält die grobe Gesteinskörnung eine Mindestmenge an gebrochener Gesteinskörnung, um eine dauerhafte Griffigkeit der Oberfläche sicherzustellen. Bei der Herstellung von Grindingtexturen wird beim Grindingvorgang die grobe Gesteinskörnung angeschnitten, so dass die ursprüngliche Bruchflächigkeit der Gesteinskörnung somit nicht mehr relevant für die Griffigkeit ist. Daher wäre es auch möglich, eine dauerhaft griffige Oberfläche herzustellen, wenn der Oberbeton ausschließlich mit gerundeter Gesteinskörnung hergestellt wird. Dies könnte die Kosten für den Beton deutlich reduzieren und somit eine wirtschaftliche Optimierung der Betonzusammensetzung darstellen. Basis für die nachfolgend beschriebenen Betone ist ein praxisüblicher Unterbeton, der mit ausschließlich gerundeter Gesteinskörnung und einem Größtkorn von 32 mm hergestellt wird. Neben einem Größtkorn von 32 mm wurden für die hier durchgeführten Untersuchungen zusätzlich Betone mit einem Größtkorn von 16 mm und 8 mm hergestellt. Hier nicht dargestellte Voruntersuchungen am ausschließlich mit Rundkorn hergestellten Beton haben ergeben, dass ein Wasserzementwert von 0,43, wie er für die Betone 1 und 2 verwendet wurde, zu keinen ausreichenden Festigkeiten führte. Aus diesem Grund wurde zur Sicherstellung einer ausreichenden Druck- und Spaltzugfestigkeit der Wasserzementwert der ausschließlich mit Rundkorn hergestellten Betone auf 0,40 reduziert.

In Tabelle 14 bis Tabelle 16 sind die Betonzusammensetzungen der ausschließlich mit Rundkorn hergestellten Betone dargestellt.

Beton 3	
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340
Zementart	CEM I 42,5 N
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	136
Wasserzementwert	0,40
feine Gesteinskörnung 0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	537
gerundete Gesteinskörnung 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	284
gerundete Gesteinskörnung 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]	476
gerundete Gesteinskörnung 16/32 [kg/m <sup>3</sup> ]	610
LP-Gehalt [Vol.-%]	4,0
Festigkeitsklasse	C 30/37

**Tabelle 14:** Optimierung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit: Unterbetone mit gerundeter Gesteinskörnung, Größtkorn 32 mm (Beton 3)

Beton 4	
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340
Zementart	CEM I 42,5 N
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	136
Wasserzementwert	0,40
feine Gesteinskörnung 0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	533
gerundete Gesteinskörnung 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	583
gerundete Gesteinskörnung 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]	777
LP-Gehalt [Vol.-%]	4,5
Festigkeitsklasse	C 30/37

**Tabelle 15:** Optimierung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit: Unterbeton mit gerundeter Gesteinskörnung, Größtkorn 16 mm (Beton 4)

Beton 5	
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	360
Zementart	CEM I 42,5 N
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	144
Wasserzementwert	0,40
feine Gesteinskörnung 0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	515
gerundete Gesteinskörnung 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	1308
LP-Gehalt [Vol.-%]	5,0
Festigkeitsklasse	C 30/37

**Tabelle 16:** Optimierung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit: Unterbetone mit gerundeter Gesteinskörnung, Größtkorn 8 mm (Beton 5)

Wird wie bei den Betonen 3 bis 5 das Größtkorn reduziert, erhöht sich die spez. Oberfläche der Gesteinskörnung und der Wasseranspruch steigt folglich, was eine steifere Konsistenz des Betons zur Folge hat. Bei Beton 5 (Größtkorn 8 mm) war bei

einem Zementgehalt von  $340 \text{ kg/m}^3$  infolge der steifen Konsistenz keine ausreichende Verarbeitbarkeit (Oberflächenschluss) mehr möglich. Aus diesem Grund wurde der Zementgehalt auf  $360 \text{ kg/m}^3$  erhöht, um somit den Leimgehalt zu erhöhen und damit verbunden die Verarbeitbarkeit zu verbessern. Den Betonen wurde ein künstlicher Luftporenbildner zugegeben, um den erforderlichen Frischbetonluftgehalt zu erreichen. Den Betonen 4 und 5 wurde zusätzlich ein Fließmittel zugegeben, um die Verarbeitbarkeit zu verbessern.

Zusätzlich zur Verwendung ausschließlich gerundeter Gesteinskörnung wurde das Größtkorn des Rundkorns variiert, um dessen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Grindingtextur zu untersuchen. Untersuchungen aus den USA zeigen in diesem Zusammenhang, dass sich Betone mit einem Größtkorn von maximal 11 mm günstiger verhielten als Betone mit einem deutlich größeren Größtkorn. Dies könnte damit im Zusammenhang stehen, dass bei einem geringeren Größtkorn die geschnittene Oberfläche homogener in ihrer Verteilung von grober Gesteinskörnung und Matrix ist. Als Folge wird die Oberfläche infolge Verkehr und Umwelteinwirkung gleichmäßiger abgetragen, wodurch die wesentlichen Texturcharakteristika und damit auch die Lärminderungseigenschaften weitestgehend erhalten bleiben.

#### Zu 2.:

Die Geometrie der Grindingtextur entscheidet maßgeblich über die Dauerhaftigkeit der Gebrauchseigenschaften Griffigkeit und Lärminderung. Im Hinblick auf die Lärminderung sollte die Textur nach der Herstellung ein gleichmäßiges Stegbruchverhalten (Formgenauigkeit) aufweisen, um die mechanische Anregung der Fahrzeugreifen gering zu halten. Neben den Gebrauchseigenschaften im Ausgangszustand sollte die Textur dauerhaft gegenüber den Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt sein, um die Griffigkeit und die Lärminderungseigenschaften möglichst über die gesamte Nutzungsdauer sicherzustellen. Ein möglicher Ansatz zur Erhöhung der Texturdauerhaftigkeit bzw. Formgenauigkeit ist die Verwendung eines Betons höherer Festigkeit. Basis der nachfolgend beschriebenen Betonzusammensetzung ist Beton 2 aus Tabelle 13. Zur Erhöhung der Festigkeit wurde der Zementgehalt auf  $380 \text{ kg/m}^3$  erhöht sowie der Wasserzementwert auf 0,40 reduziert. In Tabelle 17 ist eine Betonzusammensetzung dargestellt.

Beton 6	
Zementgehalt [ $\text{kg/m}^3$ ]	380
Zementart	CEM I 42,5 N
Wassergehalt [ $\text{kg/m}^3$ ]	152
Wasserzementwert	0,40
feine Gesteinskörnung 0/2 [ $\text{kg/m}^3$ ]	460
gerundete Gesteinskörnung 2/8 [ $\text{kg/m}^3$ ]	273
gerundete Gesteinskörnung 8/16 [ $\text{kg/m}^3$ ]	458
gebrochene Gesteinskörnung 8/11 [ $\text{kg/m}^3$ ]	55
gebrochene Gesteinskörnung 11/16 [ $\text{kg/m}^3$ ]	74
gebrochene Gesteinskörnung 16/22 [ $\text{kg/m}^3$ ]	526
LP-Gehalt [Vol.-%]	4,0
Festigkeitsklasse	C 35/45

**Tabelle 17:** Optimierung hinsichtlich der Dauerhaftigkeit bzw. Formgenauigkeit der Texturgeometrie (Beton 6)

Untersuchungen in [FE 08.0211/2011/OGB] haben gezeigt, dass bei höheren Festigkeiten des Betons formgenauere Grindingtexturen hergestellt werden können. Aufgrund der höheren Festigkeit wird das unkontrollierte Brechen der Stege reduziert, was zu homogeneren Texturen und somit zu besseren Lärminderungseigenschaften führte.

#### **5.2.4 Beton- und Probekörperherstellung**

Zur Herstellung der Betone wurden ein Zwangsmischer mit einem Fassungsvermögen von 120 l verwendet. Die Gesteinskörnung und der Zement wurden zunächst 60 s trocken gemischt und anschließend die Wassertemperatur so gewählt, dass die Frischbetontemperatur rd.  $20^\circ\text{C}$  betrug. Während des zweiminütigen Nassmischens wurde das Anmachwasser, in das zuvor der Luftporenbildner gegeben wurde, während der ersten 30 s zugegeben. In den folgenden 30 s wurde gegebenenfalls das Fließmittel zugegeben.

Nach Beendigung des Mischens wurden die Frischbetontemperatur, das Verdichtungsmaß nach [DIN EN 12350-4], die Frischbetonrohddichte nach [DIN EN 12350-6] und der Luftporengehalt nach [DIN EN 12350-7] bestimmt. Anschließend wurden die Probekörper für die Laborversuche nach [DIN EN 12390-2] hergestellt. Tabelle 18 gibt eine Übersicht über die für die jeweiligen Untersuchungen herzustellenden Probekörper.

Untersuchung	Probekörper
Laborgrinding	Platten mit L x B x H = 400 mm x 350 mm x 90 mm
Druckfestigkeit	Würfel (a = 150 mm)
Spaltzugfestigkeit	Zylinder (d = 100 mm, h = 200 mm)
Frost-Tausalz-Widerstand	Würfel (a = 150 mm); Prüffläche an Teflonscheiben geschalt

**Tabelle 18:** Art und Anzahl der für die jeweilige Untersuchung erforderlichen Probekörper

Die Probekörper wurden nach dem Befüllen der Schalung auf einem Rütteltisch verdichtet. Beim Verdichten der Platten für das Laborgrinding war es das Ziel die Mörtelschicht an der Oberfläche möglichst gering zu halten

Die Probekörper lagerten nach der Herstellung vor Verdunstung geschützt bei 20°C und wurden nach einem Tag ausgeschalt. Die Laborgrindingplatten lagerten anschließend bei 20°C und 80% relativer Feuchte. Die übrigen Probekörper wurden bis zur jeweiligen Prüfung unter Wasser bei 20°C gelagert.

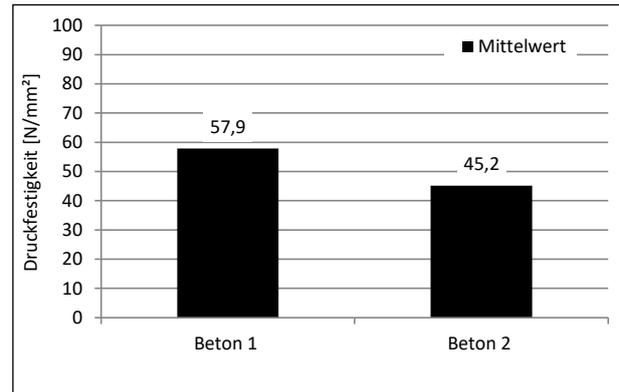
### 5.2.5 Betonprüfungen

An den hergestellten Betonen wurden im Alter von 28 Tagen die Druckfestigkeit nach [DIN EN 12390-3] sowie die Spaltzugfestigkeit nach [AL Sp-Beton] bestimmt. Zusätzlich wurde an den optimierten Betonen der Frost-Tausalz-Widerstand mit dem CDF-Test nach [DIN CEN/TS 12390-9] ermittelt.

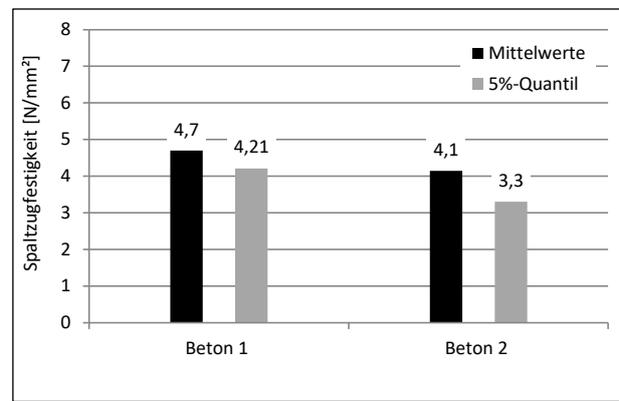
### 5.2.6 Eigenschaften der Standardbetone und der optimierten Betone

Zur Charakterisierung der Standardbetone sowie der optimierten Betone wurden deren Druck und Spaltzugfestigkeiten im Alter von 28 Tagen ermittelt. Des Weiteren wurde der Frost-Tausalz-Widerstand der optimierten Betone mit dem CDF-Test untersucht. Die Untersuchungen sollten vorab Aufschluss darüber geben, ob mit den gewählten Betonzusammensetzungen ausreichende Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften erzielt werden.

In Abbildung 102 und Abbildung 103 sind die Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Standardbetone Beton 1 (Waschbeton, Material B) und Beton 2 (Beton für texturierten Oberflächenmörtel, wie z. B. Kunstrasentextur) dargestellt.



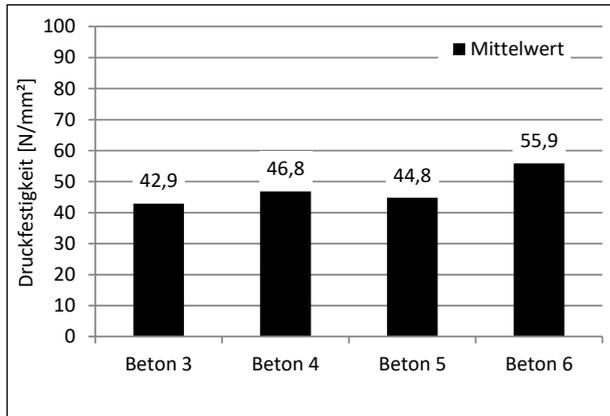
**Abbildung 102:** Druckfestigkeit der Standardbetone im Alter von 28 Tagen



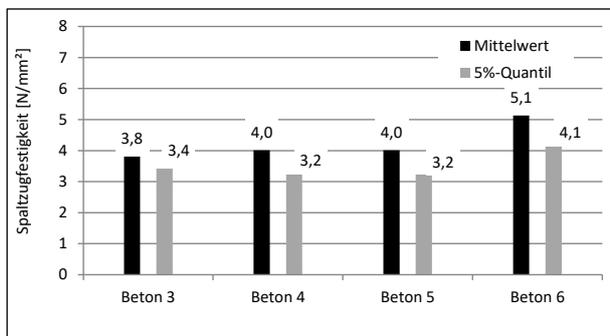
**Abbildung 103:** Spaltzugfestigkeit der Standardbetone im Alter von 28 Tagen

Beide Betone genügen bezüglich der Druckfestigkeit den Anforderungen nach [TL Beton-StB 07], nach denen die Festigkeitsklasse C30/37 erforderlich ist. Zusätzlich zur mittleren Spaltzugfestigkeit ist der dimensionierungsrelevante, nach [AL Sp-Beton] ermittelte, 5%-Quantilwert der Spaltzugfestigkeit angegeben. Dieser ist für beide Betone größer als der nach [RDO – Beton 09] geforderte Mindestwert von 3,0 MPa (Expositionsklassen XF4). Somit sind beide Betone auch hinsichtlich ihrer Spaltzugfestigkeit als Fahrbahndeckenoberbetone geeignet. Aufgrund des hohen Zementgehalts, eines niedrigen Wasserzementwerts und der Verwendung von ausschließlich gebrochener Gesteinskörnung sind die Festigkeiten von Beton 1 höher als die von Beton 2.

In Abbildung 104 und Abbildung 105 sind die Druck- und Spaltzugfestigkeiten der optimierten Betone (Beton 3: 100% Rundkorn mit Größtkorn 32 mm, Beton 4: 100% Rundkorn mit Größtkorn 16 mm, Beton 5: 100% Rundkorn mit Größtkorn 8 mm, Beton 6: 30% gebrochene Gesteinskörnung mit Größtkorn 22 mm) im Alter von 28 Tagen dargestellt.



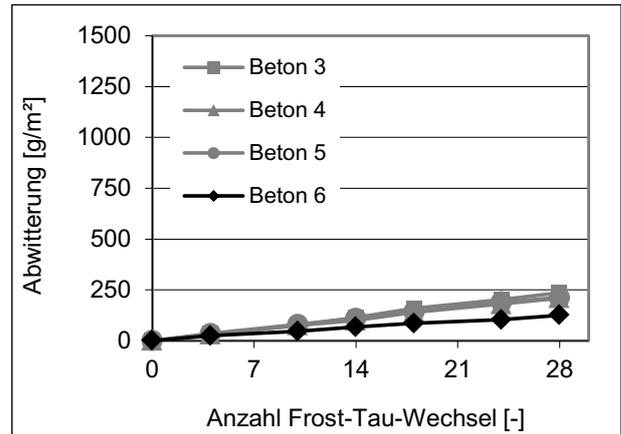
**Abbildung 104:** Druckfestigkeit der optimierten Betone im Alter von 28 Tagen



**Abbildung 105:** Spaltzugfestigkeit der optimierten Betone im Alter von 28 Tagen

Die Druckfestigkeiten der ausschließlich mit Rundkorn hergestellten Betone 3 bis 5 liegen zwischen rd. 43 und 47 MPa. Ein Einfluss des Größtkorns ist bei diesen Betonen zunächst nicht feststellbar. Erwartungsgemäß ist die Druckfestigkeit von Beton 6 mit rd. 56 MPa deutlich höher als die der übrigen Betone. Die mittleren Spaltzugfestigkeiten der Betone 3 bis 5 liegen bei rd. 4 MPa. Auch hier ist kein Einfluss des Größtkorns feststellbar. Die mittlere Spaltzugfestigkeit von Beton 5 ist mit 5,0 MPa deutlich höher als die der übrigen Betone. Wie auch die Standardbetone weisen die optimierten Betone ausreichende Druck- und Spaltzugfestigkeiten auf, um als Fahrbahndeckenbetone eingesetzt zu werden.

In Abbildung 106 sind die im CDF-Test ermittelten Abwitterungen der optimierten Betone dargestellt.



**Abbildung 106:** Frost-Tausalz-Widerstand der optimierten Betone (CDF-Test: Prüfung erfolgte an einer geschalteten Fläche)

Bei allen Betonen liegen die Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln unter 250 g/m<sup>2</sup> und somit deutlich unter dem allgemein üblichen Akzeptanzkriterium von 1500 g/m<sup>2</sup>. Die Betone weisen folglich einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf, so dass zunächst von einer hohen Dauerhaftigkeit des Betons bezüglich eines Frost-Tausalz-Angriffs ausgegangen werden kann.

## 5.3 Grinding im Labor

### 5.3.1 Grindingmaschine

Die Grindingtexturen wurden mit einer Laborgrindingmaschine hergestellt. Die Maschine besteht aus einem Sägekopf, der ein Blattpaket aus praxisüblichen Sägeblättern und Distanzscheiben bis zu einer Breite von 30 mm aufnehmen kann. Dies ermöglicht eine Anordnung von maximal sieben Sägeblättern, zwischen denen die Distanzscheiben angeordnet sind (Abbildung 107).

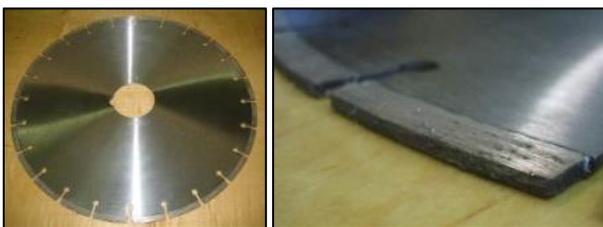


**Abbildung 107:** Laborgrindingmaschine mit Sägekopf und Sägeblättern

Der Durchmesser der Sägeblätter beträgt 350 mm, der der Distanzscheiben 200 mm. Der Sägekopf wird von einem Elektromotor mit einer Leistung von 2200 Watt angetrieben. Bei einer Drehzahl von 2800 min<sup>-1</sup> können Schneidtiefen bis zu 10 mm erzielt werden. Unterhalb des Sägekopfes wird der Betonprobekörper auf einem fahrbaren Tisch platziert. Zur Texturierung des Probekörpers wird zunächst der Sägekopf manuell auf die gewünschte Schneidtiefe abgesenkt. Über Positionsanzeiger lässt sich dabei die Schneidtiefe zehntelmillimetergenau einstellen. Anschließend wird der Tisch mit dem Probekörper manuell über eine Spindel durch den Sägekopf geführt und so die erste Spur texturiert. Durch ebenfalls zehntelmillimetergenaue seitliche Verschiebung des Tisches wird der Probekörper um die Breite der Texturspur versetzt und die nächste Spur texturiert. Die maximal möglichen Abmessungen des Betonprobekörpers betragen L x B x H = 400 mm x 400 mm x 90 mm.

**5.3.2 Sägeblätter und Distanzscheiben**

Die Sägeblätter bestehen aus einem Blattkern, auf dessen Rand die diamantbesetzten Schneidsegmente angeschweißt sind (Abbildung 108). Die in der Praxis verwendeten Schneidsegmente sind üblicherweise 2,8 mm bzw. 3,2 mm breit. Für die Laborgrindingmaschine wurden zusätzlich Sägeblätter mit 3,0 mm und 2,4 mm breiten Segmenten gefertigt. Die Breite der Segmente bestimmt beim Schneidvorgang die Rillenbreite der Grindingtextur.



**Abbildung 108:** Sägeblatt (d = 350 mm) mit Schneidsegment (rechts)

In Tabelle 19 sind die Segmentbreiten der in den Laborversuchen verwendeten Sägeblätter und die zugehörigen Breiten des Blattkerns angegeben.

Segmentbreiten	Blattkernbreite
3,2 mm	2,4 mm
3,0 mm	
2,8 mm	
2,4 mm	2,0 mm

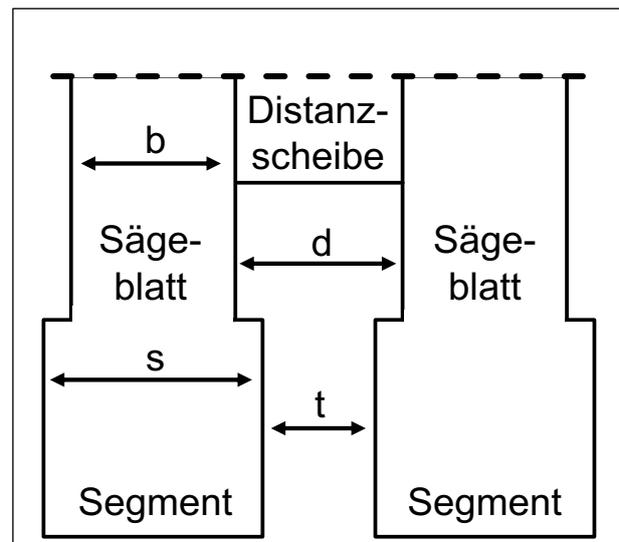
**Tabelle 19:** Segment- und Blattkernbreite der Sägeblätter

Zwischen den Sägeblättern sind die Distanzscheiben, deren Durchmesser mit 200 mm geringer als der der Sägeblätter ist, angeordnet. Die Breite der Distanzscheiben steuert den Abstand der Sägeblätter zueinander und somit die Stegbreite der Grindingtextur. Tabelle 20 gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Distanzscheiben.

Distanzscheibenbreiten b
1,0 mm
1,5 mm
2,0 mm
2,5 mm
2,6 mm
3,0 mm

**Tabelle 20:** Distanzscheiben (d = 200 mm)

Die Distanzscheiben lassen sich auch untereinander kombinieren, so dass Abstände von mehr als 3,0 mm möglich sind. Abbildung 109 verdeutlicht den Zusammenhang von gewählter Segmentbreite bzw. Distanzscheiben und der sich daraus ergebenden Textur.



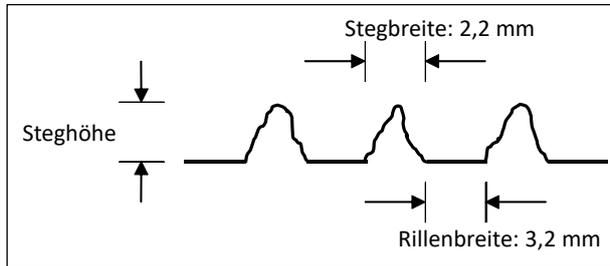
**Abbildung 109:** Anordnung der Sägeblätter und Distanzscheiben

Der Segmentabstand bzw. die Stegbreite t der Grindingtextur ergibt sich aus der gewählten Kombination aus Distanzscheibe und Segmentbreite sowie der Breite des Sägeblattkerns. Bei Distanzscheiben mit b = 3,0 mm und einer Segmentbreite von s = 3,2 mm mit einer Breite des Blattkerns von 2,4 mm ergibt sich rechnerisch ein Segmentabstand (Stegbreite) t von:

$$t = 3,0 - 2 \cdot (3,2 - 2,4) / 2 = 2,2 \text{ [mm].}$$

Eine Grindingtextur besteht aus Rillen, deren Breite sich aus der Breite der Schneidsegmente s ergibt sowie Stegen, deren Breite sich aus dem Segmentabstand t ergibt (Abbildung 110). Die Höhe und

Form der Stege ist im Wesentlichen von den Eigenschaften des Betons (Festigkeit, Art der groben Gesteinskörnung) abhängig.



**Abbildung 110:** Schematische Darstellung der sich aus  $t = 3,0 - 2 \cdot (3,2 - 2,4)/2 = 2,2$  [mm] ergebenden Grindtextur

Zur Herstellung der Grindtexturen betrug die Schneidtiefe 4 mm. Eventuelle Groovingrillen wurden 3 mm tief in den Beton geschnitten.

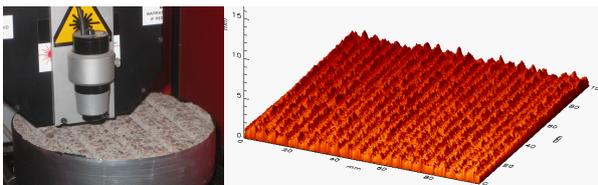
#### 5.4 Bestimmung der Textureigenschaften

Nachfolgend sind die an den Grindtexturen ermittelten Eigenschaften beschrieben. Zur Bestimmung der Texturtiefe wurde das Messgerät ELAtextur verwendet. Die Messmethode ist in Kapitel 3.4.1.1 beschrieben. Abbildung 111 zeigt das Messgerät bei den Texturmessungen auf den Laborprobenkörpern.



**Abbildung 111:** Messgerät ELAtextur auf einem Probekörper

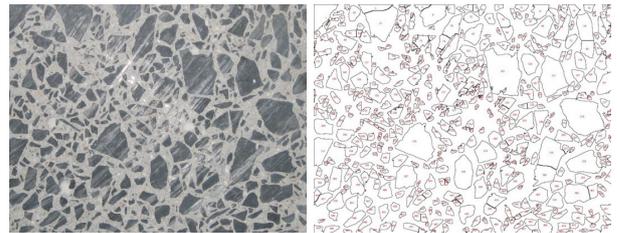
Zur Beurteilung der Mikrotextureigenschaften der Grindtexturen wurde ein nach dem Triangulationsprinzip arbeitender 3D-Laser verwendet (Abbildung 112).



**Abbildung 112:** links: 3D-Laser zur Bestimmung von Oberflächeneigenschaften mit Probekörper (Bohrkern  $d = 150$  mm), rechts: Beispiel einer eingelesenen Grindtextur

Am PC können mit der Auswertesoftware des Lasers charakteristische Rauheitskenngrößen [DIN EN ISO 4287], wie beispielsweise der quadratische Mittenrauhwert  $R_q$  ermittelt werden.

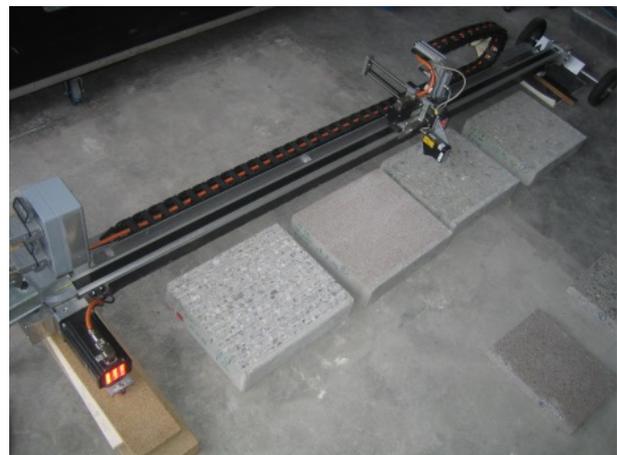
Zur Beurteilung weiterer Textureigenschaften wurde das Bildbearbeitungsprogramm ImageJ verwendet. Das Programm bietet die Möglichkeit, an digitalen Fotos Farbkontraste zu erkennen. Abbildung 113 zeigt die Schnittfläche eines Betons, an der mittels ImageJ aufgrund des Farbkontrasts der Anteil der groben Gesteinskörnung erfasst und dessen Anteil an der Gesamtfläche ermittelt wurde.



**Abbildung 113:** links: Foto der Schnittfläche eines Betons, rechts: Kennzeichnung der groben Gesteinskörnung im Bildbearbeitungsprogramm ImageJ, Anteil der groben Gesteinskörnung in diesem Beispiel: 49%

Im Hinblick auf Grindtexturen lässt sich mit diesem Verfahren beispielsweise die Größe bzw. der Flächenanteil der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche erfassen.

Zur Beurteilung der akustischen Eigenschaften der hergestellten Texturen wurde die Texturgeometrie mit einem Laserprofilometer ermittelt (Abbildung 114). Das berührungslose Messverfahren nach [DIN EN ISO 13473-1] ermöglicht eine zerstörungsfreie Ermittlung der Oberflächenrauigkeit (Makrotextur) von Oberflächen nach der in Kapitel 3.4.2.1 beschriebenen Messmethode.



**Abbildung 114:** oben: Prinzipskizze Messaufbau, unten: Texturmessung im Labor

Des Weiteren wurde für die Beurteilung der akustischen Eigenschaften der hergestellten Grindtexturen der texturinduzierte Strömungswiderstand

nach der in Kapitel 3.4.4.1 beschriebenen Messmethode ermittelt.

Abbildung 115 zeigt das Gerät bei der Messung der Laborprobekörper.



**Abbildung 115:** Bestimmung des Strömungswiderstands der Laborprobekörper

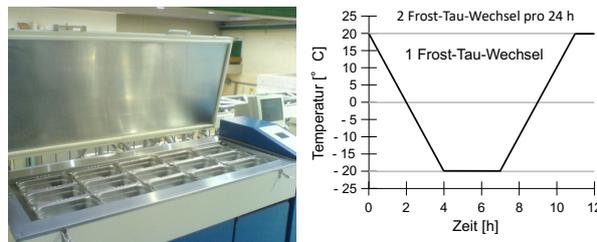
Im Anschluss an die Texturmessungen wurde zur Beurteilung der Feinrauheit der Texturen die Griffigkeit mit dem SRT-Pendelgerät bestimmt (Abbildung 116). Die Griffigkeitsbestimmung erfolgte nach [TP Griff-StB (SRT)]. Die Messung erfolgte dabei in Texturlängsrichtung.



**Abbildung 116:** SRT-Pendelgerät

An ausgewählten Probekörpern wurde zudem die Dauerhaftigkeit der hergestellten Texturen in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung untersucht. Die Dauerhaftigkeitseigenschaften wurden mit einem Frost-Tausalz-Angriff, einer reinen Polierbeanspruchung sowie einer Simulation von Praxisbeanspruchungen (Kombinierter Laborbeanspruchungszyklus) untersucht.

Zur Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstands wurden aus den Betonplatten mit Grindingtextur jeweils drei Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen und die Bohrkern auf eine Höhe von 70 mm gesägt. Anschließend lagerten die Proben drei Wochen bei 20°C/60% r.F. Die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands erfolgte in Anlehnung an den CDF-Test (CDF = Capillary Suction of De-icing solution and Freeze-Thaw Test) [DIN CEN/TS 12390-9]. Zum Prüfbeginn erfolgte eine siebentägige Vorsättigung durch kapillares Saugen in 3%iger Natriumchloridlösung. Anschließend wurden die Proben mit 28 Frost-Tau-Wechseln beansprucht. Ein Frost-Tauwechsel entspricht einer Abkühlung des Betons von +20°C auf -20°C und einer anschließenden Erwärmung auf +20°C. Die Dauer eines Frost-Tau-Wechsels beträgt 12 Stunden. Während der Frost-Tauwechsel befindet sich die Prüffläche des Betons in 3%iger Natriumchloridlösung (Abbildung 117).

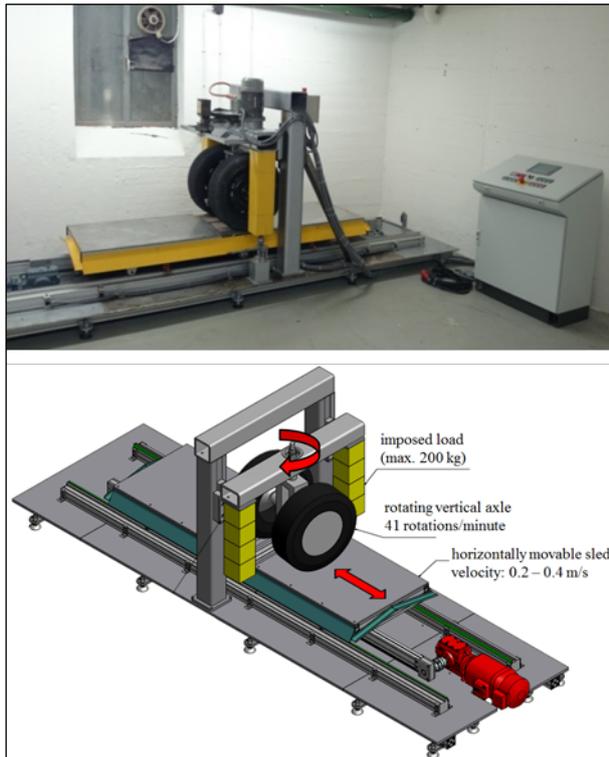


**Abbildung 117:** Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF-Test: links: Prüfruhe zur Aufnahme der Proben, rechts: Verlauf der Abkühlung und Erwärmung

Als Prüffläche diente die texturierte Seite der Betone. Das Alter der Betone betrug zu Prüfbeginn 56 Tage. Während der Frost-Tau-Wechsel wurde die Abwitterung der Oberflächen bestimmt. Ein Beton gilt nach dem allgemein üblichen Akzeptanzkriterium als Frost-Tausalz-beständig, wenn nach 28 Frost-Tau-Wechseln die Abwitterung unter 1500 g/m<sup>2</sup> beträgt. Dieses Kriterium bezieht sich jedoch auf die Prüfung von geschalteten Oberflächen. Die Abwitterung von texturierten Oberflächen ist daher nicht direkt übertragbar. Im Anschluss an die Untersuchungen wurde erneut die Texturtiefe mit dem Messgerät ELAtextur sowie die Griffigkeit mit dem SRT-Pendelgerät bestimmt. Die Untersuchungen sollten Aufschluss darüber geben, wie sich Texturtiefe, Griffigkeit infolge eines Frost-Tausalz-Angriffs verändern.

Der Verkehr verursacht durch die polierende Wirkung der Reifen eine stetige Abnahme der Griffigkeit. Die Abbildung der genannten Einflüsse in der Realität wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf Laborebene mit dem Aachener Ravelling Tester (ARTE) (Abbildung 118) simuliert. Mit diesem, am Institut für Straßenwesen Aachen (ISAC) entwickelten Gerät, wurden die Betonplatten mit Grindingtex-

tur durch Schub beansprucht. Diese Beanspruchung entsteht durch die Überlagerung einer Translations- und Rotationsbewegung. Die Betonplatten mit den Maßen 32 cm x 26 cm x 4 cm wurden in einen horizontal verschiebbaren Schlitten eingespannt, welcher die translatorische Bewegung induziert, während die Rotationsbewegung durch zwei Reifen, welche sich um eine vertikale Achse bewegen, hervorgerufen wird.

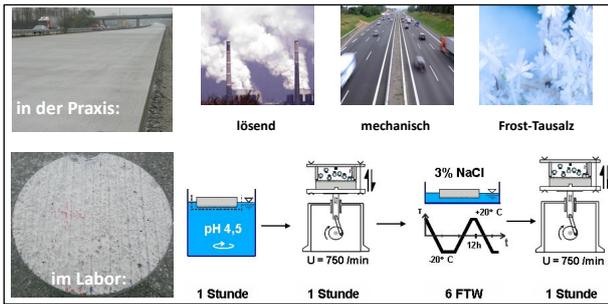


**Abbildung 118:** Aachener Ravelling Tester (ARTE)

Durch den Einsatz echter Fahrzeugreifen lässt sich die Polierbeanspruchung praxisgetreu realisieren. Über die Variation von Auflast und Reifendruck lässt sich zudem die Kontaktfläche und somit die Intensität der Polierbeanspruchung variieren. Bei den Fahrzeugreifen für die Betonplatten handelte es sich um das Modell Vanco 8, 165/75 R 14 C 8PR 97/95 R TL der Firma Continental. Diese Reifen werden ausschließlich für das Polieren von Betonplatten verwendet, um das Anhaften von Bitumenresten aus anderen Versuchsreihen zu vermeiden. Die Polierbeanspruchung im ARTE wurde mit einem Reifeninnendruck von zwei bar und einer Auflast von 400 kg durchgeführt. Die Geschwindigkeit der horizontalen Bewegung des Schlittens wurde zu neun Translationsbewegungen (Hin & Rück) pro Minute gewählt. Die Reifen drehten sich mit 41 Umdrehungen pro Minute um die gemeinsame Achse. Der Abstand der Radmitten zueinander betrug 55 cm, woraus eine Umlaufgeschwindigkeit der frei rollend gelagerten Räder von ca. 1,2 m/s resultierte. Um die Polierwirkung zu beschleunigen, wurden

Poliermittel und Wasser bei einer festgelegten Dosierung beigegeben. Als Poliermittel wurde Quarzsand verwendet (Quarzsand WF 31, 99,6% Quarzgehalt, Mittlere Korngröße: 0,42 mm). Die Zufuhrate des Poliermittels betrug  $(27 \pm 7)$  g/min bei etwa derselben Menge an Wasser. Diese Angaben wurden in Anlehnung an die [DIN 1097-8] für die Bestimmung des PSV von Gesteinskörnung festgelegt. Im Zuge des Polierens im ARTE kommt es im Gegensatz zum Prüfstand nach Wehner/Schulze (W/S) zu einem gleichmäßigen Polieren der Oberfläche. Der vom ARTE polierte Bereich umfasst die Oberfläche von 832,00 cm<sup>2</sup>. Nur der Randbereich wird einem ungleichmäßigen Poliervorgang unterzogen. Dies ist davon abhängig, wie die Betonplatten im ARTE eingebaut ist. Ist die Platte zu hoch eingebaut, kann der Randbereich leicht abbrechen. Ist die Platte dagegen zu niedrig eingebaut kann es passieren, dass der Randbereich kaum von den Reifen berührt wird und somit auch nicht poliert wird. Im Anschluss an die Beanspruchung wurden die Texturtiefe mit dem Messgerät ELAtextur sowie die Griffigkeit mit dem SRT-Pendelgerät bestimmt. Des Weiteren wurden die akustisch relevanten Eigenschaften ermittelt. Die Untersuchungen sollten Aufschluss darüber geben, wie sich Texturtiefe, Griffigkeit und die akustischen Eigenschaften infolge der Beanspruchung verändern. Auf diese Weise ließ sich die gewählte Texturgeometrie in Abhängigkeit des verwendeten Betons hinsichtlich der Dauerhaftigkeit beurteilen.

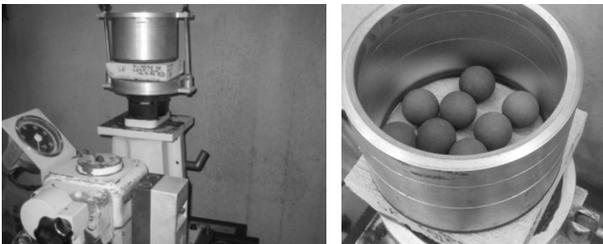
Mit der Prüfanlage ARTE wird bezüglich der Beanspruchung von Betonfahrbahndecken ausschließlich die polierende Beanspruchung durch die Fahrzeugreifen simuliert. In der Praxis findet zusätzlich zur polierenden Beanspruchung eine Aufräumung durch die Umwelteinwirkungen saurer Regen und Frost statt. Um diese Einwirkungen zu berücksichtigen, wurde an ausgewählten Betonen Untersuchungen in Anlehnung an den am cbm der TU München entwickelten Laborbeanspruchungszyklus [SCHIESSL 2004] durchgeführt. Mit dem kombinierten Laborbeanspruchungszyklus werden die genannten Praxiseinwirkungen im Labor zeitraffend durch eine Kombination aus lösendem Angriff, mechanischer Beanspruchung und Frost-Tausalzangriff, wie in Abbildung 119 dargestellt, simuliert:



**Abbildung 119:** Simulation der Praxiseinwirkungen im Labor

Nacheinander erfolgen

- ein einstündiger lösender Angriff in gepufferter Essigsäure (pH-Wert 4,5),
- eine einstündige mechanische Beanspruchung durch Kunststoffkugeln ( $d = 30 \text{ mm}$ ) (Prallabtrieb), die in einer Prallkammer durch Kolbenbewegungen des Prallabtriebgeräts (Abbildung 120) mit einer Frequenz von  $750 \text{ min}^{-1}$  auf die Betonoberfläche prallen. Die Prallhöhe entspricht rd. 90 mm,
- sechs Frost-Tauwechsel (in Anlehnung an das CDF-Verfahren) ohne kapillares Vorsaugen,
- eine erneute einstündige mechanische Beanspruchung (Prallabtrieb).



**Abbildung 120:** links: Prallabtriebgerät mit Probekörper, rechts: Kunststoffkugeln zur Prallabtriebbeanspruchung

Der kombinierte Laborbeanspruchungszyklus wurde entwickelt, um die Einwirkungen auf Betonfahrbahndecken, deren Oberflächenmörtel im frischen Zustand mit beispielsweise einem Jutetuch bzw. Besen texturiert wurde, zu simulieren. Hier konnte durch den Prallabtrieb eine praxisnahe Beanspruchung/Schädigung des texturierten Oberflächenmörtels erzielt werden, um die Dauerhaftigkeitseigenschaften unterschiedlicher konventioneller Texturen (z. B. Jutetuch) in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung zu bewerten. Beim Grindvorgang wird der (empfindliche) Oberflächenmörtel entfernt und die Textur in den Kernbeton hineingeschnitten. Eine Grindingtextur ist daher wesentlich dauerhafter als z. B. Jutetuchtexturen. Da bei Grindingtexturen kein Oberflächenmörtel vorhanden ist, kann mit der Prallabtriebbeanspruchung für diesen Oberflächentyp keine praxisnahe Einwirkung erzielt werden. Aus diesem Grund wurden in Anlehnung an den Laborbeanspruchungszyklus im Anschluss

an die Polierbeanspruchung mit der Prüfanlage ARTE eine Aufrauhung der Oberfläche durch den Säureangriff sowie den Frost-Tausalz-Angriff (6 FTW) vorgenommen. Zur Durchführung wurden den Betonplatten mit Grindingtextur zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen. Im Anschluss an die jeweilige Beanspruchung wurden die Texturtiefe mit dem Messgerät ELAtextur sowie die Griffigkeit mit dem SRT-Pendelgerät bestimmt. Die Untersuchungen sollten Aufschluss darüber geben, wie sich in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung die Texturtiefe und die Griffigkeit infolge der Aufrauhung verändern.

## 5.5 Probekörperuntersuchungen

### 5.5.1 Vorgehen

Die Untersuchungen gliederten sich in vier Teile. Im ersten Teil wurden Einflüsse der Texturgeometrie auf die akustischen Eigenschaften der Grindingtextur untersucht. Im zweiten Teil der Untersuchungen wurden Einflüsse der Betonzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeit der Texturen untersucht. Im dritten Teil der Untersuchungen sollte im Hinblick auf das Grinding als Texturierung von Neubaustrecken geklärt werden, zu welchem Zeitpunkt dies frühestens möglich ist, um die gewünschten Texturgeometrie zielsicher in den Beton schneiden zu können. Im vierten Teil wurde ebenfalls im Hinblick auf Neubaustrecken orientierend untersucht, welchen Einfluss die Nachbehandlung auf die Geometrie sowie die Dauerhaftigkeit der Grindingtextur hat. Nachfolgend sind das Vorgehen und die Ergebnisse zu den einzelnen Aspekten dargestellt.

### 5.5.2 Einfluss der Texturgeometrie

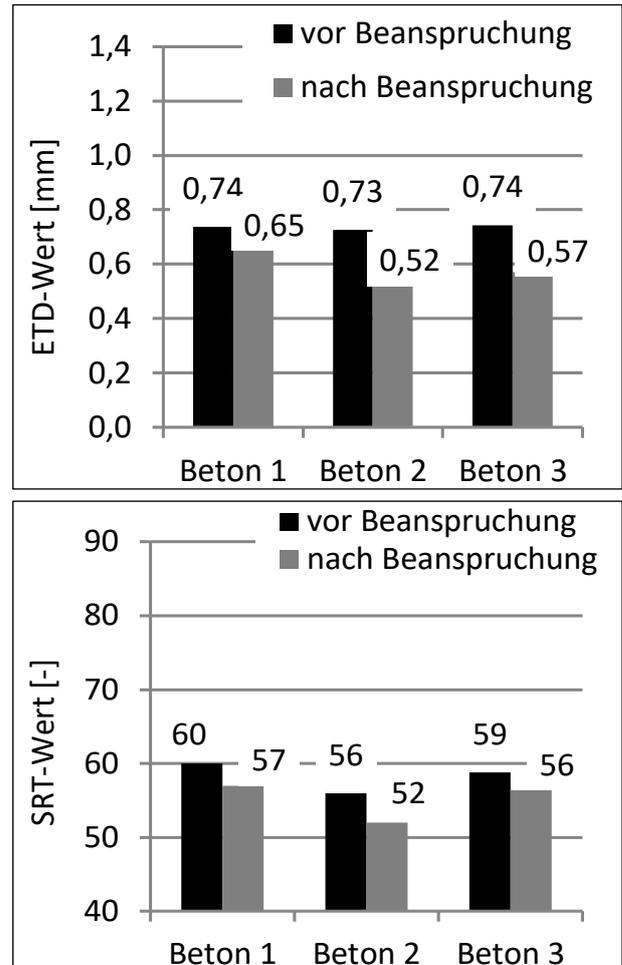
Beim Grinding entscheidet der Besatz der Grindingwellen maßgeblich über die Geometrie der in den Beton geschnittenen Textur. Die Untersuchungen im Forschungsvorhaben [FE 08.0211/2011/OGB] haben gezeigt, dass dabei der Segmentabstand der entscheidende Parameter zur Beeinflussung der akustischen Eigenschaften ist. Mit abnehmendem Segmentabstand entstehen Stege mit homogenem Bruchbild und einer geringen Höhe. Dies führt zu verbesserten akustischen Eigenschaften, da die Reifenvibrationen verringert werden und der aerodynamische Geräuschanteil aufgrund einer geringeren Texturtiefe ebenfalls abnimmt. In diesem Versuchsteil wurden Texturparameter variiert, um aus akustischer Sicht günstigste Texturen herauszuarbeiten. Als Referenztextur diente eine Standardgrindingtextur, die zur Wiederherstellung der Griffigkeit bzw. Ebenheit hergestellt wird. Der Vergleich

der gewählten Texturgeometrien mit der Referenztextur sollte zeigen, welche akustische Optimierung gegenüber einem konventionellen Grinding erreicht wurde. Die Texturen wurden in Betone unterschiedlicher Zusammensetzung geschnitten. An ausgewählten Kombinationen aus Textur und Beton wurde der Widerstand gegenüber polierender Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe untersucht, um Aufschluss über die Texturdauerhaftigkeit in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung zu erhalten. Zu den untersuchten Parametern gehörten die Segmentbreite, der Segmentabstand sowie der Einfluss zusätzlicher Groovingrillen. Ziel war es Texturgeometrien zu formulieren, die aus akustischer Sicht besonders geeignet sind und gleichzeitig eine ausreichende Griffigkeit gewährleisten. Tabelle 21 zeigt zunächst die Grindingparameter für Textur 1 (Referenztextur).

Textur	Grinding	
	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]
1	3,2	2,2

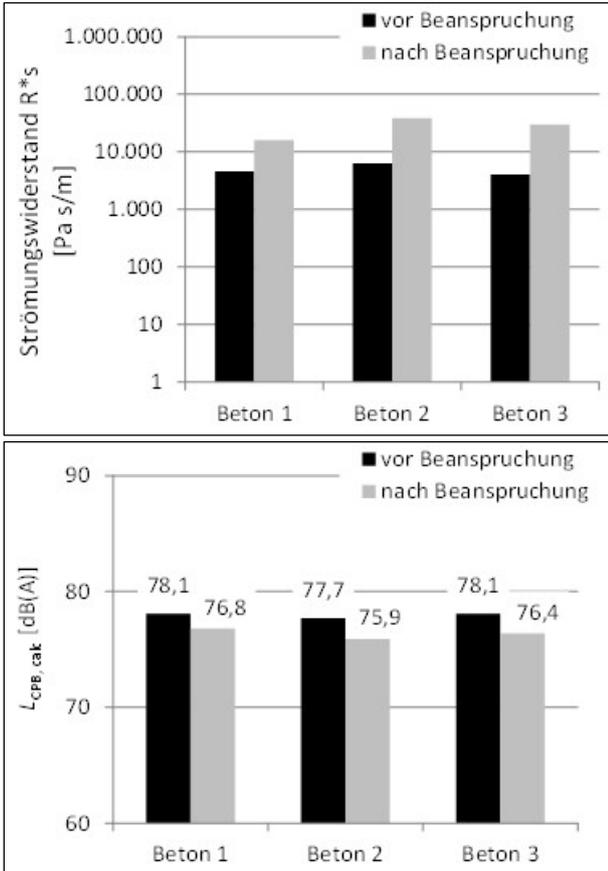
**Tabelle 21:** Textur 1 (Referenztextur)

Die Eigenschaften dieser Textur vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe sind für verschiedene Betone in den nachfolgenden Diagrammen in Abbildung 121 und Abbildung 122 dargestellt.



**Abbildung 121:** Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: ETD- und SRT-Werte der Betone 1, 2 und 3 mit Textur 1

Vor Beanspruchungsbeginn sind die ETD-Werte der Betone mit rd. 0,74 mm vergleichbar. Infolge der Beanspruchung findet ein Materialabtrag und damit verbunden eine Abnahme der Texturtiefe statt. Bei Beton 1 (Waschbeton) ist der Abtrag am geringsten. Dies könnte im Zusammenhang mit der höheren Festigkeit des Betons 1 im Vergleich zu Beton 2 und 3 stehen. Vor Beanspruchungsbeginn liegen die SRT-Werte zwischen 56 und 60. Die polierende Beanspruchung führt bei allen Betonen zu einer Abnahme des SRT-Werts um 3 bis 4.



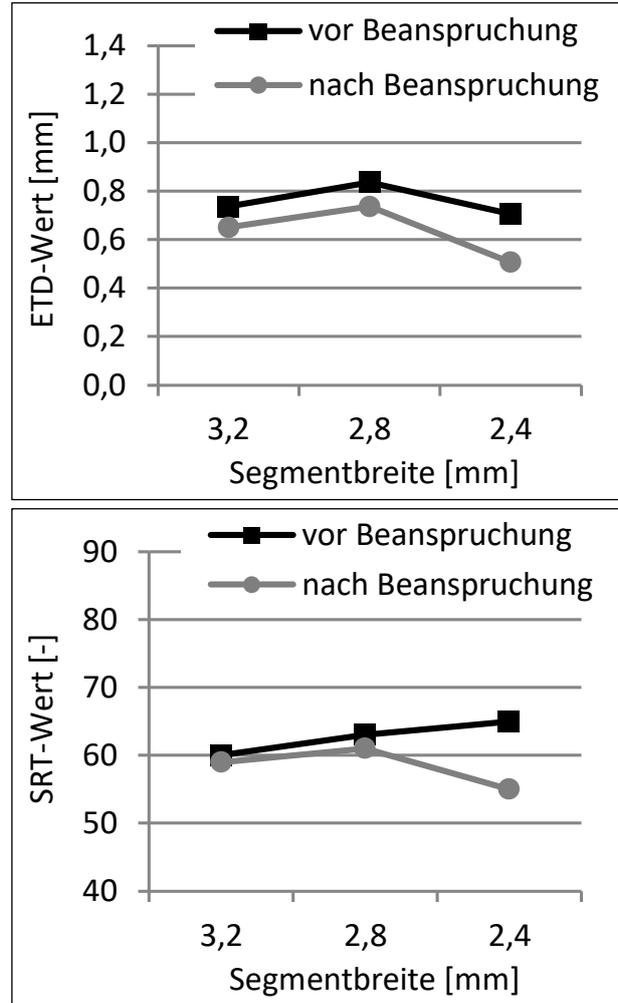
**Abbildung 122:** Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Akustische Eigenschaften der Betone 1, 2 und 3 mit Textur 1

Zur Untersuchung des Einflusses der Segmentbreite auf die Textureigenschaften wurde Beton 1 mit den Segmentbreiten 3,2, 2,8 und 2,4 mm texturiert (Tabelle 22). Der Segmentabstand betrug einheitlich 2,2 mm.

Textur	Grinding	
	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]
1	3,2	2,2
2	2,8	2,2
3	2,4	2,2

**Tabelle 22:** Einfluss Segmentbreite: Texturen 1, 2 und 3

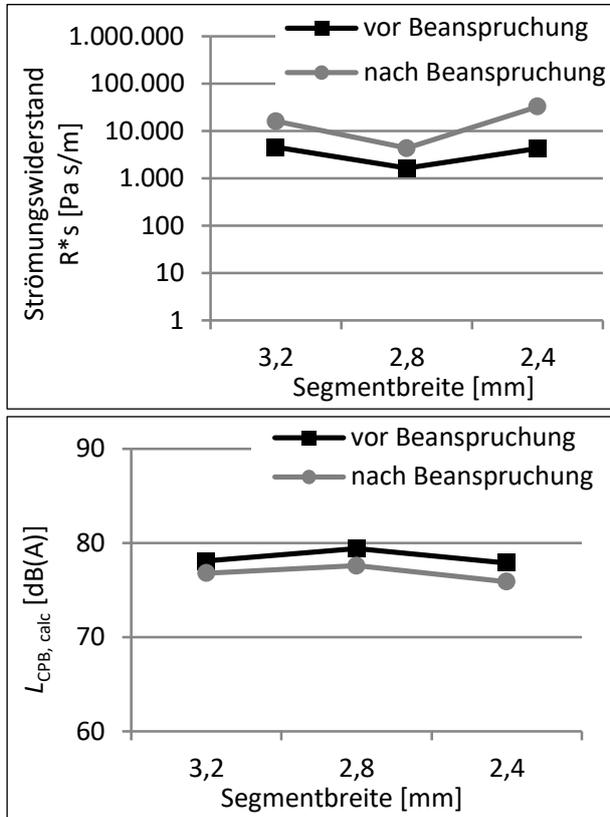
Die Eigenschaften der Texturen vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe sind für Beton 1 in den nachfolgenden Diagrammen in Abbildung 123 und Abbildung 124 dargestellt.



**Abbildung 123:** Einfluss der Segmentbreite (Segmentabstand einheitlich 2,2 mm) auf die akustischen Eigenschaften der Textur vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Oben: ETD- Werte, unten: SRT-Werte

Vor der Beanspruchung sind die ETD-Werte der Texturen vergleichbar. Infolge der Beanspruchung findet eine Abnahme des ETD-Werts statt, die bei der Segmentbreite von 2,4 mm größer ist als bei 3,2 bzw. 2,8 mm. Bei geringerer Segmentbreite und somit geringerer Stegbreite nimmt die spezifische Oberfläche zu. Bei Beanspruchung findet dann möglicherweise ein schnellerer Abtrag der Stege und damit verbunden eine schnellere Abnahme des ETD-Werts statt. Hinsichtlich der Griffigkeit zeigen die SRT-Werte vor Beanspruchungsbeginn tendenziell eine Zunahme mit abnehmender Segmentbreite. Dies könnte folgende Ursache haben: Bei geringerer Segmentbreite nimmt bei gleichem Segmentabstand die Anzahl der Stege und somit die Kontaktfläche für den Fahrzeugreifen zu, was zu einer höheren Griffigkeit führt. Nach der Beanspruchung ist die Abnahme des SRT-Werts bei einer Segmentbreite von 2,4 mm größer als bei 3,2 bzw. 2,8 mm. Dies könnte auch mit der zuvor beschriebenen größeren spezifischen Oberfläche und damit

verbunden größerer Polieranfälligkeit im Zusammenhang stehen. Insgesamt sind die ETD- und SRT-Werte auch bei der Segmentbreite von 2,4 mm sowohl vor als auch nach der Beanspruchung ausreichend, um eine dauerhaft griffige Oberfläche sicherzustellen.



**Abbildung 124:** Einfluss der Segmentbreite (Segmentabstand einheitlich 2,2 mm) auf die akustischen Eigenschaften der Textur vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120$  km/h, Reifentyp: Conti EcoContact)

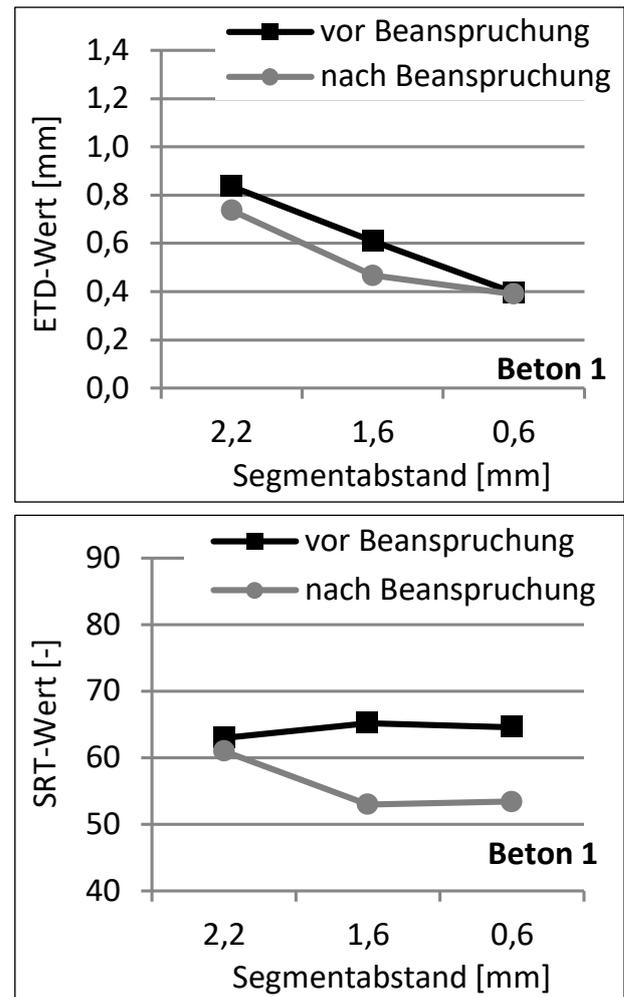
Ein Einfluss der Segmentbreite auf die akustischen Eigenschaften lässt sich nicht feststellen. Die berechneten Vorbeirollpegel vor und nach der Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe sind vergleichbar. Zusammenfassend lässt sich bezüglich des Einflusses der Segmentbreite feststellen, dass mit abnehmender Segmentbreite tendenziell eine höhere Anfangsgriffigkeit erzielt wird. Die Dauerhaftigkeit der Textur gegenüber einer rein polierenden Beanspruchung scheint jedoch aufgrund einer größeren spezifischen Oberfläche abzunehmen.

Zur Untersuchung des Einflusses des Segmentabstands auf die Textureigenschaften wurden Beton 1 sowie Beton 3 mit den Segmentabständen 2,2, 1,6 und 0,6 mm texturiert (Tabelle 23). Die Segmentbreite betrug einheitlich 2,8 mm.

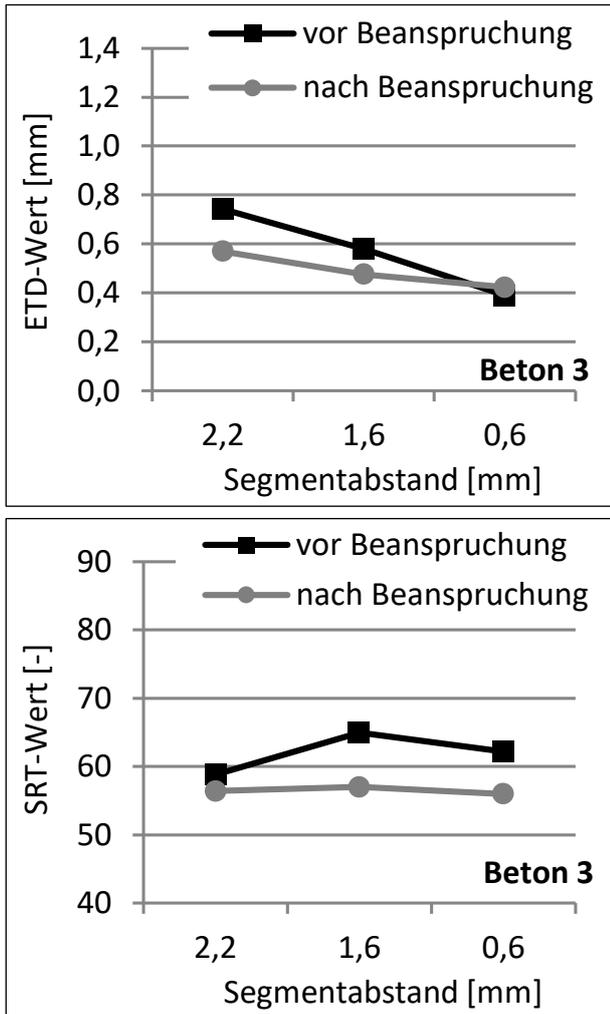
Textur	Grinding	
	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]
2	2,8	2,2
4	2,8	1,6
5	2,8	0,6

**Tabelle 23:** Einfluss Segmentabstand: Texturen 2, 4 und 5

Abbildung 125 und Abbildung 126 zeigen die ETD- und SRT-Werte von Beton 1 und Beton 3 in Abhängigkeit des Segmentabstands.



**Abbildung 125:** Einfluss des Segmentabstands (Segmentbreite einheitlich 2,8 mm) auf den ETD- und SRT-Wert der Textur von Beton 1 vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe

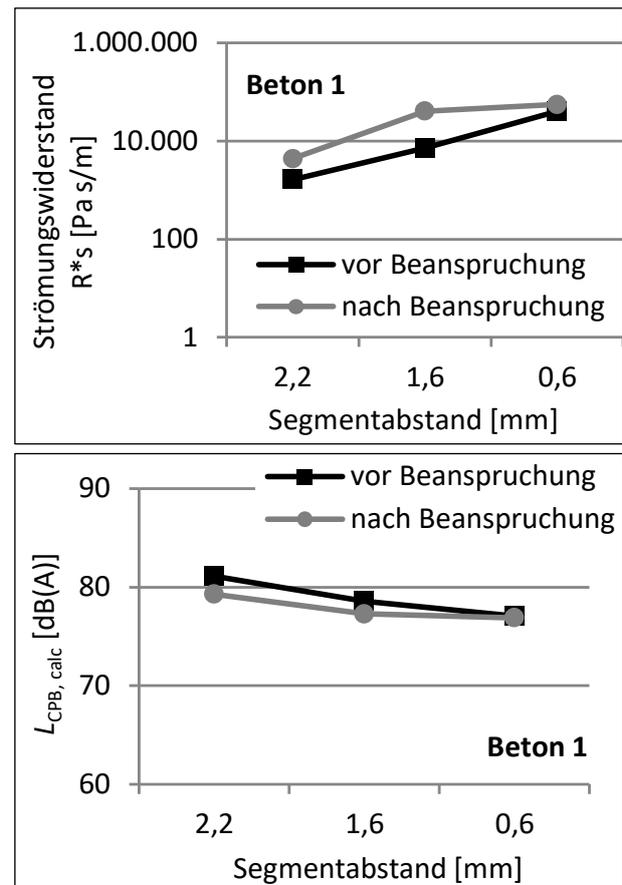


**Abbildung 126:** Einfluss des Segmentabstands (Segmentbreite einheitlich 2,8 mm) auf den ETD- und SRT-Wert der Textur von Beton 3 vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe

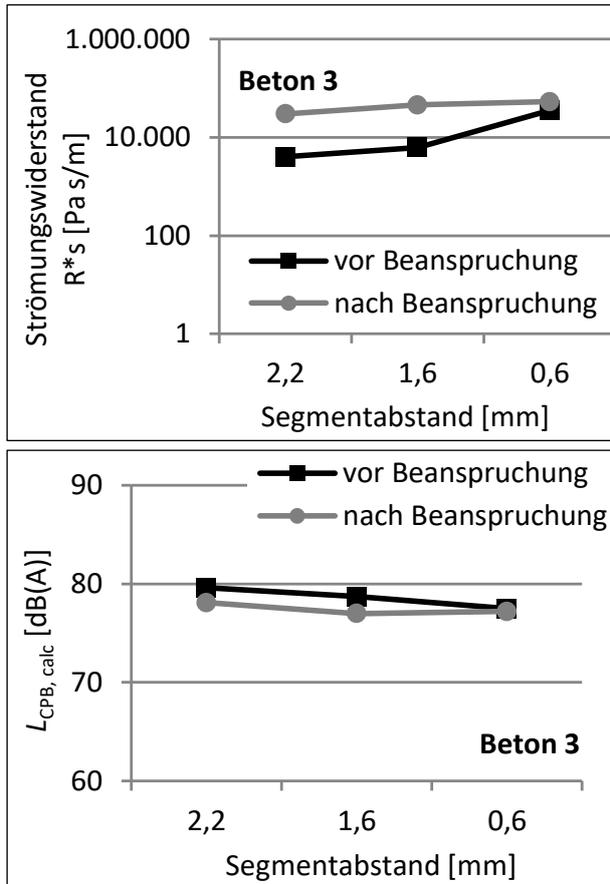
Erwartungsgemäß sinkt der ETD-Wert mit abnehmendem Segmentabstand, da die Steghöhen abnehmen und die Textur feiner wird. Unabhängig vom Beton beträgt bei einem Segmentabstand von 0,6 mm der ETD-Wert mit rd. 0,4 mm im Vergleich zu einem Segmentabstand von 2,2 mm nur noch rd. die Hälfte. Ein ETD-Wert von 0,4 mm sollte mindestens vorhanden sein, um insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten eine ausreichende Griffigkeit der Oberfläche zu ermöglichen. Daher wird der Segmentabstand von 0,6 mm als Mindestabstand der Segmente angesehen. Im Hinblick auf die Griffigkeit findet infolge der Beanspruchung für die Segmentabstände 2,2 und 1,6 mm eine Abnahme der ETD-Werte statt. Bei beiden Betonen liegt bei einem Segmentabstand von 0,6 mm jedoch keine Abnahme des ETD-Werts vor. Möglicherweise ist bei einem Segmentabstand von 0,6 mm aufgrund ihrer geringen Höhe die spezifische Oberfläche der Stege geringer bzw. die Form der Stege günstig, um

dauerhafter gegenüber der polierenden Beanspruchung zu sein. Hinsichtlich der Griffigkeit zeigt sich kein signifikanter Einfluss des Segmentabstands bzw. des Betons auf den SRT-Wert. Die Werte liegen sowohl vor als auch nach der Beanspruchung, die zu einer Verringerung der Werte führt, oberhalb von 50. Somit ist zunächst unabhängig vom Segmentabstand bzw. des Betons von einer ausreichenden Feinrauheit der Textur auszugehen.

Abbildung 127 und Abbildung 128 zeigen die akustischen Eigenschaften der Oberflächen.



**Abbildung 127:** Einfluss des Segmentabstands (Segmentbreite einheitlich 2,8 mm) auf die akustischen Eigenschaften der Textur von Beton 1 vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120$  km/h, Reifentyp: Conti EcoContact)



**Abbildung 128:** Einfluss des Segmentabstands (Segmentbreite einheitlich 2,8 mm) auf die akustischen Eigenschaften der Textur von Beton 3 vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120$  km/h, Reifentyp: Conti EcoContact)

Der Strömungswiderstand steigt aufgrund der abnehmenden Texturtiefe bei geringerem Segmentabstand, was zu geringeren Vorbeirollpegeln führt. Im Vergleich zu einem Segmentabstand von 2,2 mm ist der Pegel bei einem Segmentabstand von 0,6 mm um rd. 2 dB(A) niedriger. Da infolge der Beanspruchung die Texturtiefen für einen Segmentabstand von 2,2 und 1,6 mm abnehmen, steigen die Strömungswiderstände und die Pegel werden reduziert. Die Textureigenschaften von Beton 1 und Beton 3 weisen keine signifikanten Unterschiede auf. Somit stellt der ausschließlich aus Rundkorn hergestellte Beton 3 eine wirtschaftliche Alternative zu einem konventionellen Oberbeton (Beton 1: Waschbeton) dar.

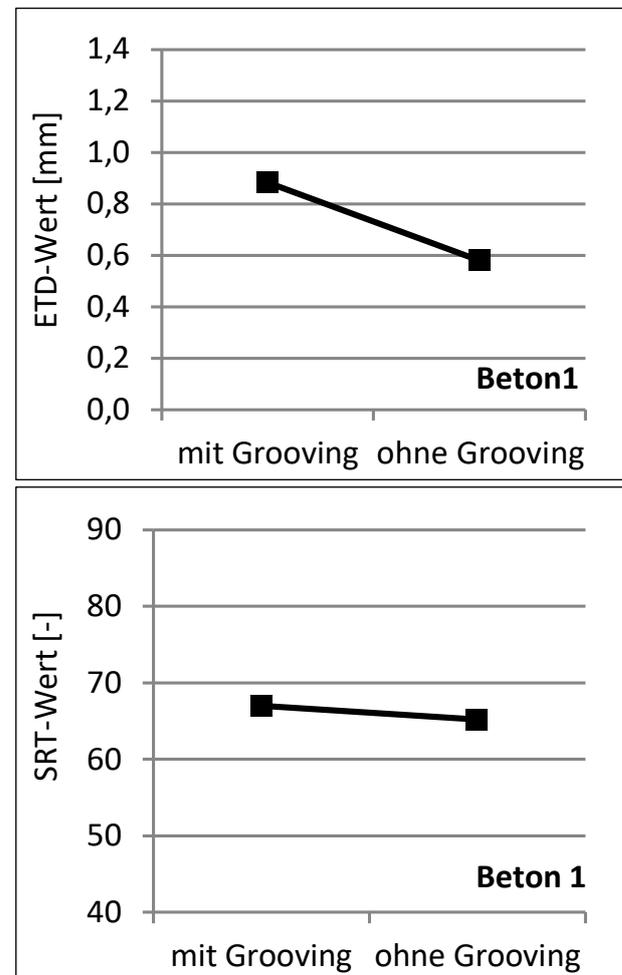
Abschließend wurde der Einfluss eines zusätzlichen Groovings auf die Textureigenschaften untersucht. Für sehr feine Texturen mit geringer Texturtiefe (vgl. Textur 5) bietet ein zusätzliches Grooving die Texturtiefe zu erhöhen, damit eine dauerhaft griffige Oberfläche gewährleistet ist. Für die Untersuchung wurde ein Grinding mit einem Grooving gemäß Tabelle 24 gewählt. Die Texturgeometrie wurde an

eine Textur auf der A 13 angelehnt, mit der akustisch günstige Eigenschaften erzielt wurden. Eine Betrachtung der Dauerhaftigkeitseigenschaften ist hier nicht erfolgt. Die Dauerhaftigkeitseigenschaften verschiedener Texturen mit Grooving sind im Kapitel 5.5.3 dargestellt.

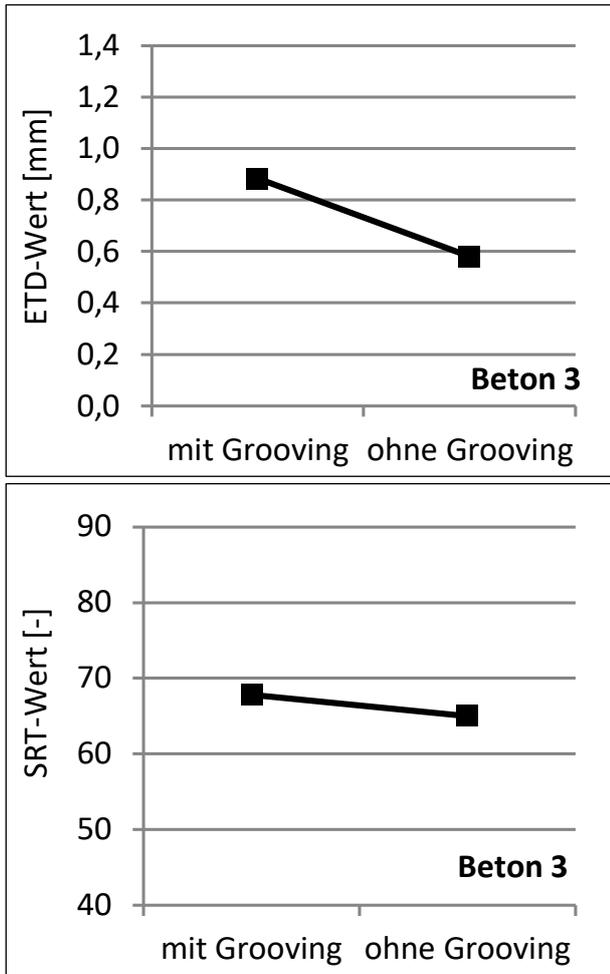
Textur	Grinding		Grooving	
	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]
4	2,8	1,6	-	-
6	2,8	1,6	2,8	22

**Tabelle 24:** Einfluss eines zusätzlichen Groovings: Texturen 4 und 6

Erwartungsgemäß ist der ETD-Wert der Textur mit Grooving unabhängig vom Beton deutlich höher als ohne Grooving (Abbildung 129 und Abbildung 130).



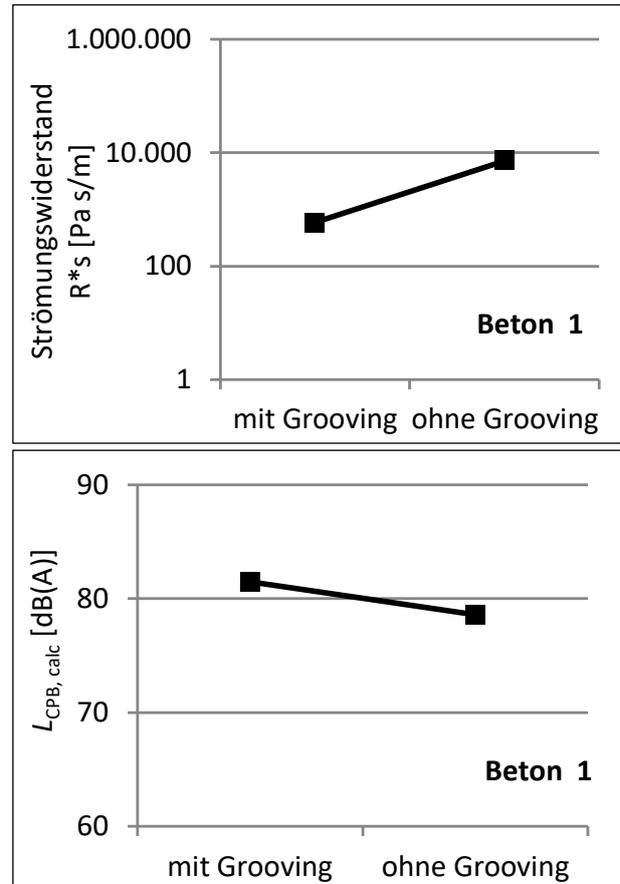
**Abbildung 129:** Einfluss des Groovings auf den ETD-Wert- und SRT-Wert der Textur von Beton 1



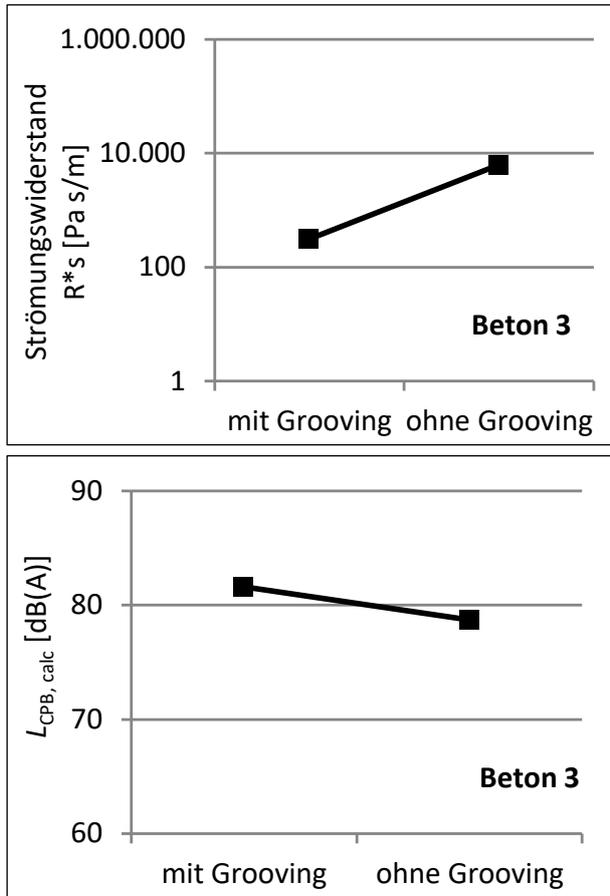
**Abbildung 130:** Einfluss des Groovings auf den ETD-Wert- und SRT-Wert der Textur von Beton 3

Beim SRT-Wert scheint kein Einfluss des Groovings vorzuliegen. Die Werte sind bei beiden Betonen unabhängig vom Grooving vergleichbar.

In Abbildung 131 und Abbildung 132 sind die akustischen Eigenschaften dargestellt.



**Abbildung 131:** Einfluss des Groovings auf die akustischen Eigenschaften der Textur von Beton 1: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120$  km/h, Reifentyp: Conti EcoContact)



**Abbildung 132:** Einfluss des Groovings auf die akustischen Eigenschaften der Textur von Beton 1: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120$  km/h, Reifentyp: Conti EcoContact)

Aufgrund der größeren Texturtiefen sind die Strömungswiderstände der Texturen mit Grooving niedriger, was zu rd. 3 dB(A) höheren Pegeln führt. Somit lässt sich feststellen, dass durch ein zusätzliches Grooving die Texturtiefe erhöht werden kann, um die Griffigkeit der Textur dauerhaft sicherzustellen. Aus akustischer Sicht wirkt sich dies jedoch nachteilig aus.

### 5.5.3 Einfluss der Betoneigenschaften

#### 5.5.3.1 Allgemeines

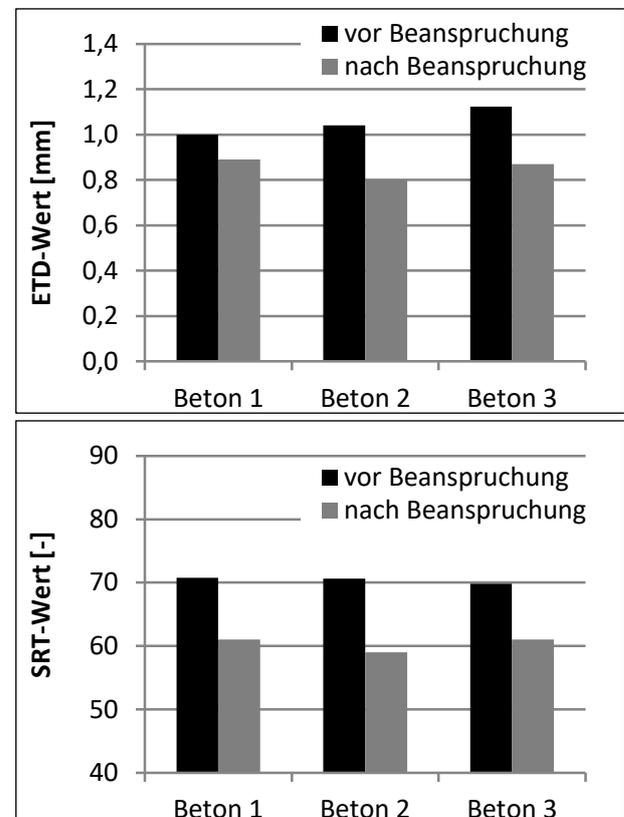
Wenn bei Neubaustrecken vorgesehen ist, die Oberfläche mittels Grinding zu texturieren, stellt sich die Frage, welche Anforderungen an den Beton zu stellen sind. Der Beton sollte gewährleisten, dass die gewünschte Textur zielsicher in den Beton geschnitten werden kann und zudem dauerhaft griffige bzw. dauerhaft lärmindernde Eigenschaften aufweist. Um die Gesamtkosten für diese Bauweise möglichst gering zu halten, galt es zu klären, ob beim Einsatz von Betonen, die ausschließlich mit Rundkorn hergestellt werden, eine ausreichende

Griffigkeit sichergestellt werden kann. Dazu wurden die Oberflächeneigenschaften des texturierten Betons 3 (100% gerundete Gesteinskörnung, Tabelle 14) mit denen der Standardbetone 1 und 2 (Tabelle 15 bzw. Tabelle 16) verglichen. Als Texturierung wurde für alle Betone der in Tabelle 25 dargestellte Wellenbesatz gewählt.

Textur	Grinding		Grooving	
	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]
7	2,4	1,8	2,8	22,8

**Tabelle 25:** Untersuchung der Dauerhaftigkeitseigenschaften: Textur 7

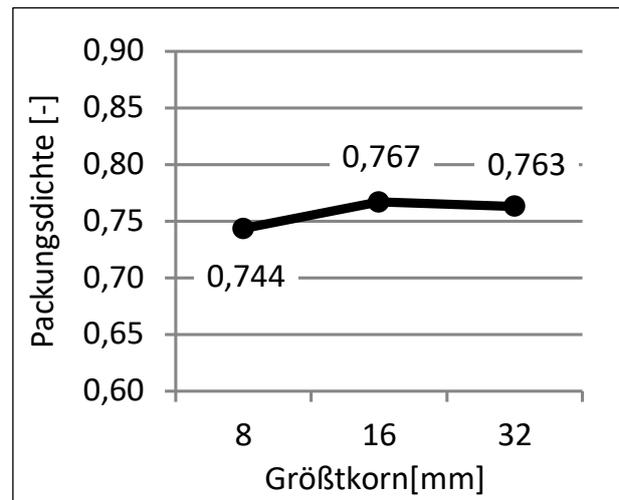
Für die Untersuchungen wurde als Textur eine Kombination aus Grinding und Grooving gewählt, da die Groovingrillen zum einen die Oberfläche der Textur vergrößern (größere Angriffsfläche) und zum anderen das Schneiden der Groovingrillen eine zusätzliche Beanspruchung der Betonoberfläche darstellt. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Griffigkeit wurden die texturierten Platten in der Prüfanlage ARTe beansprucht. Abbildung 133 zeigt die griffigkeitsrelevanten Eigenschaften Texturtiefe und SRT-Wert der Betone vor und nach der Beanspruchung.



**Abbildung 133:** Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: ETD- und SRT-Werte der Standardbetone 1 (Waschbeton mit Gesteinskörnung aus Werk B) und 2

(Beton für Kunstrasentextur) und des optimierten Betons 3 (100% Rundkorn mit GK 32 mm)

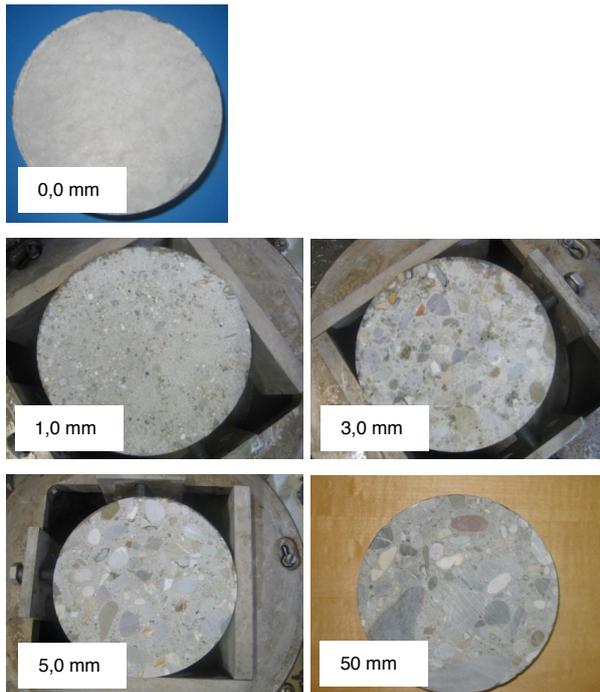
Aus den Diagrammen geht hervor, dass infolge der Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe eine Abnahme der Texturtiefe stattfindet. Hier zeigt sich, dass bei Beton 1 (Waschbeton) die Abnahme der Texturtiefe geringer ist als die der Betone 2 und 3. Dies ist vermutlich auf die höhere Festigkeit von Beton 3 zurückzuführen (Abbildung 102 bis Abbildung 105). Des Weiteren findet durch die Polierung eine Abnahme des SRT-Werts statt. Ein Einfluss der Betonzusammensetzung ist hier nicht zu beobachten. Die SRT-Werte von Beton 3 sind sowohl vor als auch nach der Beanspruchung mit denen der Standardbetone vergleichbar. Folglich scheint es grundsätzlich möglich Oberbetone ausschließlich mit gerundeter Gesteinskörnung herzustellen, wenn die Oberfläche mittels Grinding texturiert wird. Des Weiteren galt es zu klären, welchen Einfluss das Größtkorn auf die Geometrie bzw. die Dauerhaftigkeit der Grindingtextur hat. Bei Verwendung eines geringeren Größtkorns wäre es möglich, dass der Flächenanteil der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche steigt. Dies könnte einen positiven Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Textur haben, da die Textur in der groben Gesteinskörnung dauerhafter als die Textur in der umgebenden Mörtelmatrix ist. Des Weiteren könnte bei geringerem Größtkorn eine homogenere Verteilung der Gesteinskörnung an der Oberfläche der Grindingtextur vorliegen, was infolge der Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt zu einem gleichmäßigeren Abtrag der Oberfläche führt. Dies könnte die wesentlichen Texturcharakteristika und damit auch die Lärminderungseigenschaften weitestgehend erhalten. Für die Untersuchungen wurden die Betone 3, 4 und 5 verwendet (Tabelle 14 bis Tabelle 16). Die Betone unterscheiden sich lediglich im Größtkorn. Der volumetrische Anteil an grober Gesteinskörnung ist bei allen Betonen weitestgehend gleich. Bei Beton 5 (Größtkorn 8 mm) ist der Anteil an grober Gesteinskörnung etwas geringer, da der Leimgehalt für eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Betons geringfügig erhöht werden musste. Zur Erhöhung des Leimgehalts wurde bei konstantem Wasserzementwert von 0,43 der Zementgehalt von 340 auf 360 kg/m<sup>3</sup> erhöht. Um den Einfluss des Größtkorns auf den Flächenanteil der groben Gesteinskörnung der Grindingtextur bewerten zu können, ist des Weiteren die Ermittlung der Packungsdichte der Gesteinskörnung für die verwendeten Sieblinien der drei Betone erforderlich. Die Packungsdichte wurde mit dem im Anhang dargestellten Verfahren nach [de Larrard] an 5 kg des Gesteinskörnungsgemischs (feine und grobe Gesteinskörnung), Abbildung 134 ermittelt. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnung entsprach dabei der Zusammensetzung im Beton.



**Abbildung 134:** Packungsdichte des Gesteinskörnungsgemischs der Betone 3 (GK 32 mm), 4 (GK 16 mm) und 5 (GK 8 mm)

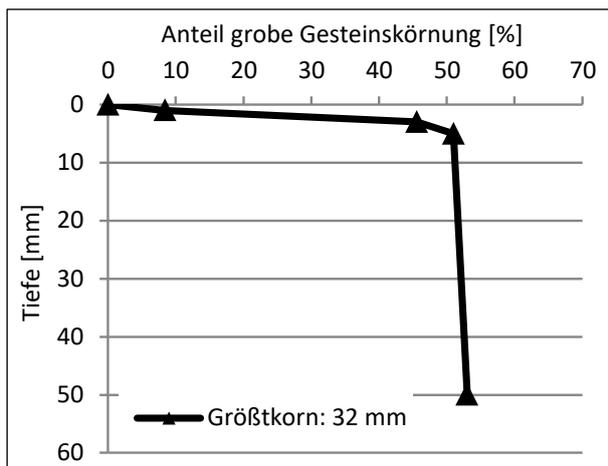
Bei einem Größtkorn von 8 mm (Beton 5) ist die Packungsdichte niedriger als bei einem Größtkorn von 16 bzw. 32 mm. Ein Unterschied zwischen 16 und 32 mm ist nicht vorhanden. Zur Ermittlung des Flächenanteils der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche in Abhängigkeit des Größtkorns, wurden je Beton einer der hergestellten

Bei einem Größtkorn von 8 mm (Beton 5) ist die Packungsdichte niedriger als bei einem Größtkorn von 16 bzw. 32 mm. Ein Unterschied zwischen 16 und 32 mm ist nicht vorhanden. Zur Ermittlung des Flächenanteils der groben Gesteinskörnung an der Oberfläche in Abhängigkeit des Größtkorns wurden je Beton einer der hergestellten Platten im Alter von sieben Tagen ein Bohrkern mit  $d = 150$  mm entnommen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Oberflächen noch nicht texturiert. Anschließend wurden die Oberflächen der Bohrkerns mit einer Schneidmaschine in die Tiefenstufen 1,0 mm, 3,0 mm, 5,0 mm abgeschnitten. Anschließend wurden die Bohrkerns auf eine Tiefe von 50 mm abgesägt. Das Abschneiden der Oberflächen von 1,0 bis 5,0 mm simulierte dabei den Abtrag bei Grinding, der zwischen 3 und 5 mm liegt. Das Absägen der Bohrkerns in einer Tiefe von 50 mm sollte zeigen, wie hoch der Anteil der groben Gesteinskörnung im Kernbeton ist. Abbildung 135 zeigt die Oberflächen eines Bohrkerns in den einzelnen Tiefenstufen am Beispiel des Betons 3.



**Abbildung 135:** Fotos der Oberflächen in Abhängigkeit der Schneidtiefe am Beispiel des Betons mit einem Größtkorn von 32 mm

Aus den Fotos geht deutlich hervor, dass bei einer Schneidtiefe von 1,0 mm kaum grobe Gesteinskörnung freigelegt wurde und bei größerer Schneidtiefe der Anteil zunimmt. Zur Quantifizierung des Anteils grober Gesteinskörnung wurden die Oberflächen nach jeder Tiefenstufe fotografiert und mit dem Bildbearbeitungsprogramm ImageJ ausgewertet. Abbildung 136 zeigt zunächst am Beispiel von Beton 3 den ermittelten Anteil grober Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Tiefe.

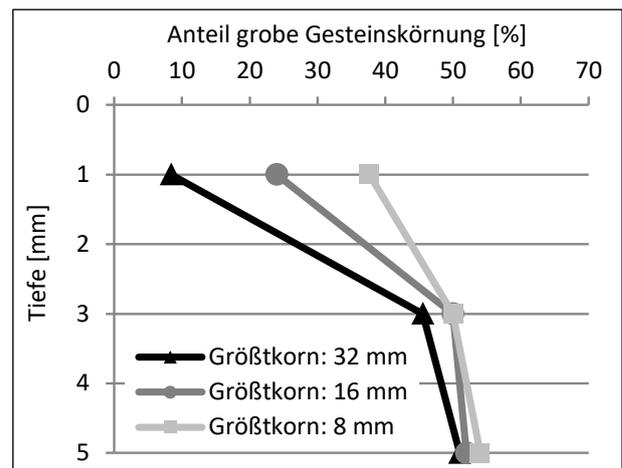


**Abbildung 136:** Anteil der groben Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Tiefe für Beton 3 (GK 32 mm)

In einer Tiefe von 1 mm liegt der Anteil grober Gesteinskörnung bei rd. 8% und steigt bei zunehmender Schneidtiefe. Er beträgt in einer Tiefe von 5 mm rd. 51%. Ab 5 mm Tiefe nimmt der Anteil nur noch

geringfügig zu und beträgt bei 50 mm rd. 53%. Aus der Betonzusammensetzung von Beton 3 in Tabelle 14 geht hervor, dass der Beton  $1370 \text{ kg/m}^3$  ( $284 \text{ kg/m}^3$  2/8 +  $476 \text{ kg/m}^3$  8/16 +  $610 \text{ kg/m}^3$  16/32) grobe Gesteinskörnung enthält. Durch Division der einzelnen Fraktionen mit der Rohdichte ergibt sich ein Gesamtvolumen der groben Gesteinskörnung von rd.  $510 \text{ l/m}^3$  (= 51%). Unter der Annahme, dass im Kernbeton (Tiefe: 50 mm) der volumetrische Anteil mit dem Flächenanteil der groben Gesteinskörnung übereinstimmt, liefert die Auswertung über die Bildbearbeitung somit ein zufriedenstellendes Ergebnis. Aus dem Ergebnis lässt sich schlussfolgern, dass bei Verwendung dieses Gesteinsmaterials mit einem Größtkorn von 32 mm beim Grinding eine Schneidtiefe von 5 mm erforderlich wäre, um nahezu den maximal möglichen Anteil an grober Gesteinskörnung freizulegen, vorausgesetzt die Mörtelschichtdicke beträgt wie hier rd. 0,3 mm.

In Abbildung 137 ist der Anteil grober Gesteinskörnung aller Betone bis zu einer Tiefe von 5 mm dargestellt.

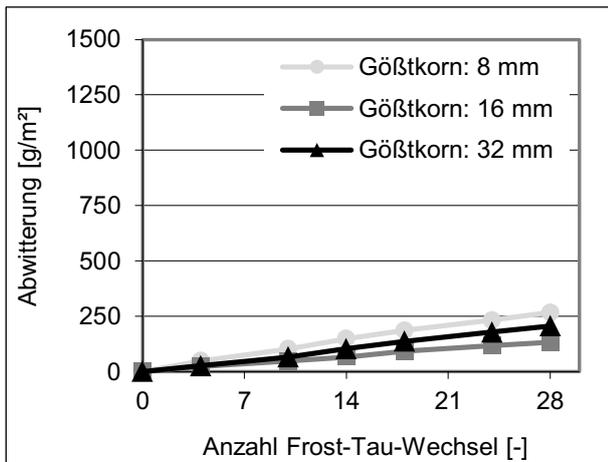


**Abbildung 137:** Anteil der groben Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Tiefe für die Betone 3 (GK 32 mm), 4 (GK 16 mm) und 5 (GK 8 mm)

Bei einer Schneidtiefe von 1 mm zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Größtkorns. Beim Größtkorn von 8 mm (Beton 5) ist der Anteil mit 38% deutlich höher als bei einem Größtkorn von 16 mm (24%) bzw. 32 mm (8%). Hier ist zu berücksichtigen, dass bei Beton 5 aufgrund des etwas höheren Leimgehalts und der geringeren Packungsdichte der Gesteinskörnung zunächst von einem geringeren Flächenanteil auszugehen ist. Dominiert wird der Flächenanteil an der Oberfläche jedoch von der maximalen Korngröße. Bei einer Schneidtiefe von 3 mm nimmt der Unterschied ab, so dass beim Größtkorn von 8 bzw. 16 mm der Anteil nur noch geringfügig über dem des Größtkorns 32 mm liegt. In 5 mm Tiefe ist kein Einfluss des Größtkorns mehr

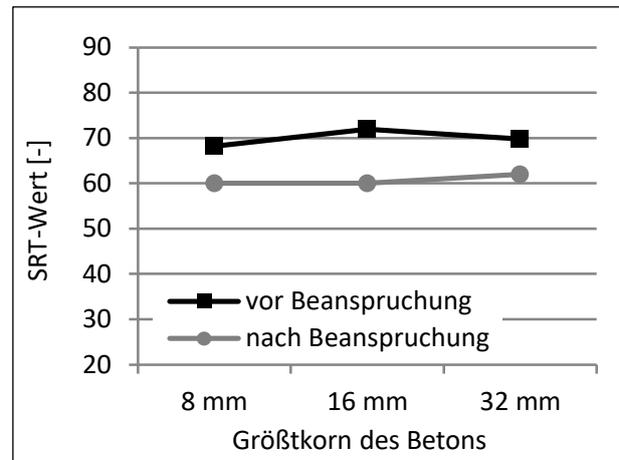
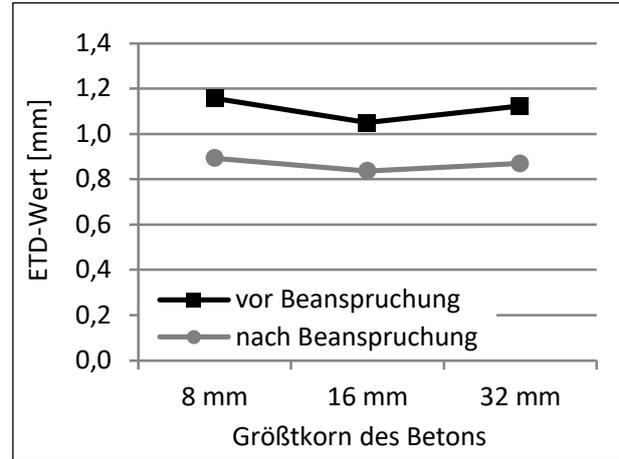
feststellbar. Aus den Untersuchungen lässt sich ableiten, dass bei praxisüblichen Schneidtiefen zwischen 3 und 5 mm ein geringeres Größtkorn des Betons mit einem tendenziell höheren Anteil an grober Gesteinskörnung an der Grindingtextur verbunden ist und somit hinsichtlich der Texturdauerhaftigkeit als vorteilhaft angesehen werden kann.

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeitseigenschaften wurden die hergestellten Betonplatten mit dem in Tabelle 25 dargestellten Wellenbesatz texturiert. Anschließend wurde der Frost-Tausalz-Widerstand (Abbildung 138) untersucht sowie die Oberflächen mit der Prüfanlage ARTe beansprucht.



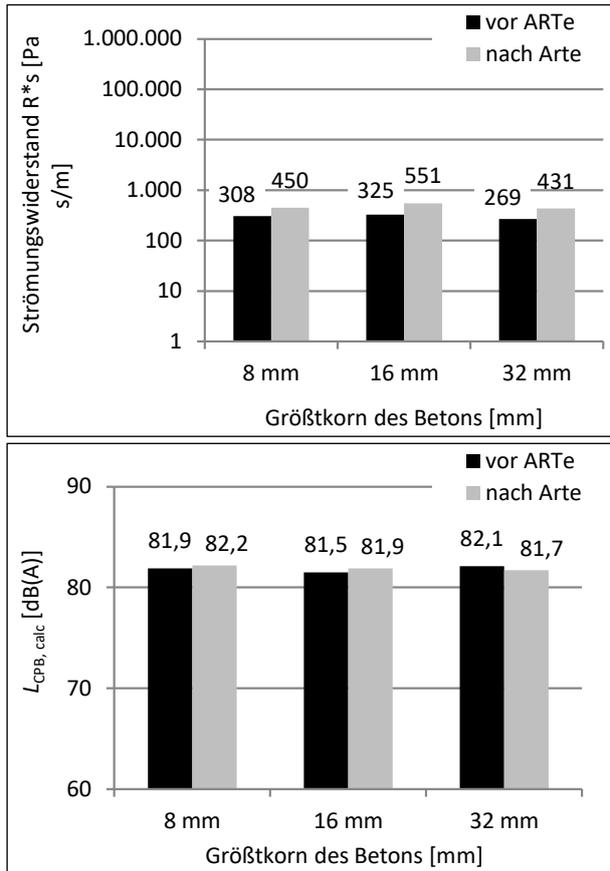
**Abbildung 138:** Frost-Tausalz-Widerstand der Textur in Abhängigkeit des Größtkorns der Betone 3 (GK 32 mm), 4 (GK 16 mm) und 5 (GK 8 mm)

Die Abwitterungen der Betone liegen nach 28 Frost-Tau-Wechseln unter 300 g/m². Ein Einfluss des Größtkorns ist nicht feststellbar. In Abbildung 139 sind die ETD- und SRT-Werte der Texturen vor bzw. nach der Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe dargestellt.



**Abbildung 139:** ETD- und SRT-Werte in Abhängigkeit des Größtkorns der Betone 3 (GK 32 mm), 4 (GK 16 mm) und 5 (GK 8 mm) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe

Auch hier zeigt sich kein Einfluss des Größtkorns auf den ETD- bzw. SRT-Wert der Textur. Die Abnahme des ETD- bzw. SRT-Werts ist vergleichbar. In Abbildung 140 sind die akustischen Eigenschaften dargestellt.

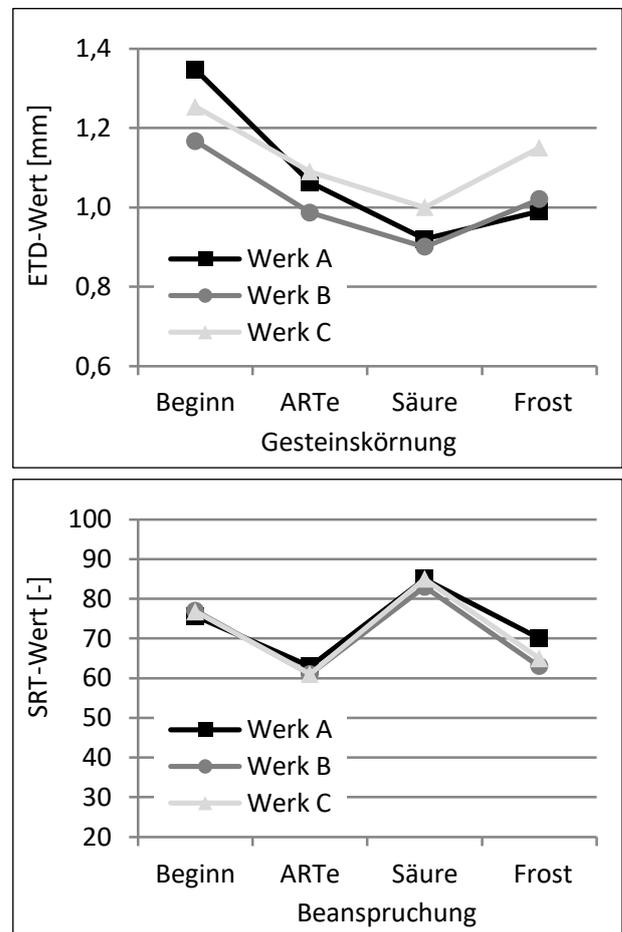


**Abbildung 140:** Einfluss des Größtkorns auf die akustischen Eigenschaften der Textur vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120$  km/h, Reifentyp: Conti EcoContact)

Durch die Beanspruchung nimmt bei allen Betonen infolge der abnehmenden Texturtiefe der Strömungswiderstand zu. Ein Einfluss des Größtkorns ist ebenfalls nicht feststellbar. Die berechneten Pegel bleiben unabhängig vom Beton trotz einer geringen Erhöhung der Strömungswiderstände konstant. Hinsichtlich der akustischen Eigenschaften kann für die hier gewählte Textur bzw. Beanspruchung kein Einfluss des Größtkorns festgestellt werden.

Abschließend wurde zur Untersuchung der Verwendbarkeit von ausschließlich gerundeter Gesteinskörnung für Oberbetone mit Grindingtextur der Einfluss der Petrographie untersucht. Dazu wurde Beton 1 (Waschbeton) mit der Gesteinskörnung 2/8 aus Werk A, aus Werk B sowie aus Werk C hergestellt. Die Gesteinskörnungen unterschieden sich, wie in Tabelle 11 dargestellt, in ihrer Petrographie sowie ihrem PSV. Der Austausch der Gesteinskörnung erfolgte volumetrisch. Für die Untersuchungen wurde eine Waschbetonzusammensetzung (Beton 1) als Ausgangsbeton gewählt, da für die Gesteinskörnung der Werke B und C keine anderen Fraktionen als 2/8 zur Verfügung standen

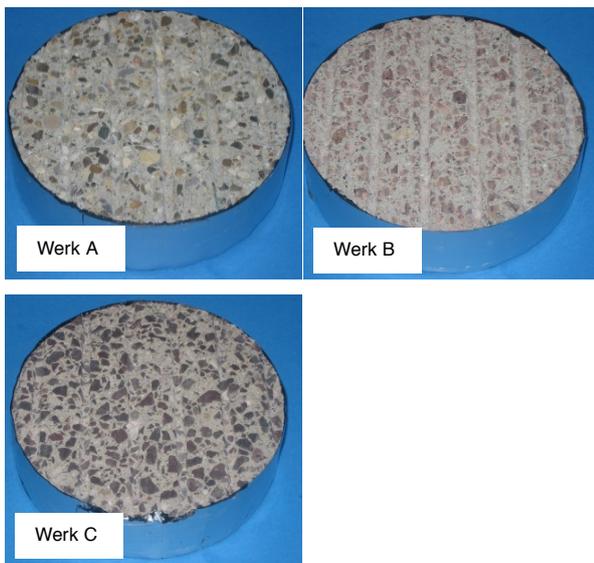
(Tabelle 10). Die hergestellten Platten der Betone wurden mit dem Wellenbesatz aus Tabelle 25 texturiert. Die Untersuchungen sollten Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss die unterschiedliche Petrographie bzw. der unterschiedliche PSV auf die Dauerhaftigkeit der Griffigkeitseigenschaften der Oberfläche hat. Um den Einfluss des Polierverhaltens zu untersuchen, wurden die Oberflächen mit der Prüfanlage ARTe beansprucht. Anschließend wurden die Oberflächen in Anlehnung an den kombinierten Laborbeanspruchungszyklus mit Säure und anschließend mit einem Frost-Tausalz-Angriff beansprucht, um das Aufräumungsvermögen der Gesteinskörnung bzw. der Textur zu untersuchen. Abbildung 141 zeigt die ETD- und SRT-Werte der Oberflächen vor und nach den jeweiligen Beanspruchungen.



**Abbildung 141:** ETD- und SRT-Werte vor und nach den jeweiligen Beanspruchungen, Werk A: Rundkorn (Kalkstein), Werk B: gebrochene Gesteinskörnung (Rhyolith), Werk C: gebrochene Gesteinskörnung (Andesit)

Im Ausgangszustand liegen die ETD-Werte zwischen 1,17 und 1,35. Die Polierbeanspruchung und der anschließende Säureangriff führen zu einer Abnahme der Texturtiefe. Beim dann folgenden Frost-Tausalz-Angriff nimmt die Texturtiefe wieder zu.

Signifikante Unterschiede in Abhängigkeit der verwendeten Gesteinskörnung sind nicht zu beobachten. Im Ausgangszustand weisen die Betone einen nahezu identischen SRT-Wert auf und sinkt erwartungsgemäß während der Polierbeanspruchung in der Prüfanlage ARTe. Infolge des anschließenden Säureangriffs findet eine signifikante Aufrauung der Oberflächen statt, durch die die SRT-Werte über das Ausgangsniveau steigen. Nach dem Frost-Tausalz-Angriff sinken die SRT-Werte erneut ab. Der Verlauf der SRT-Werte ist bei allen Betonen vergleichbar. Abbildung 142 zeigt die Oberflächen von jeweils einem Probekörper.

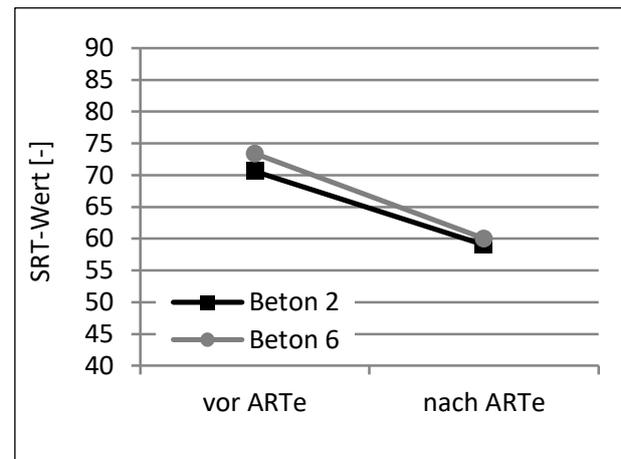
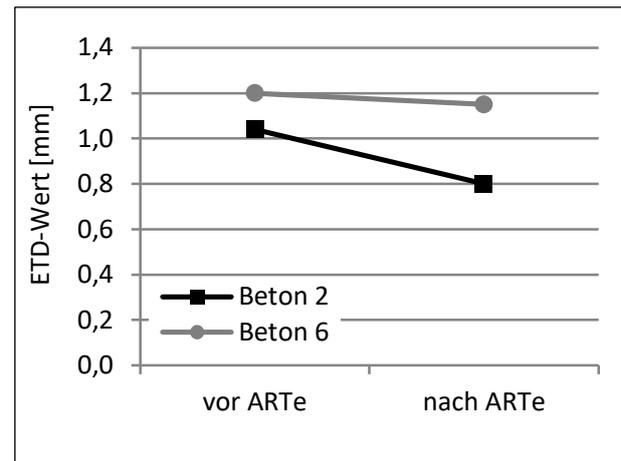


**Abbildung 142:** Fotos der Probekörper nach Beanspruchungsende, Werk A: Rundkorn (Kalkstein), Werk B: gebrochene Gesteinskörnung (Rhyolith), Werk C: gebrochene Gesteinskörnung (Andesit)

Die Texturen weisen ein vergleichbares Erscheinungsbild auf. Signifikante Schädigungen sind nicht feststellbar. Die Untersuchungen zeigen, dass mit dem hauptsächlich kalksteinhaltigem Rundkorn eine in Bezug auf Oberbetone mit gebrochener Gesteinskörnung bestehend aus Rhyolith bzw. Andesit vergleichbare Oberflächendauerhaftigkeit hergestellt werden konnte. Folglich scheinen Oberbetone, die ausschließlich aus Rundkorn hergestellt wurden, für die Herstellung von Oberbetonen mit Grindtextur geeignet zu sein. Um eine ausreichende Verarbeitbarkeit sicherzustellen empfiehlt es sich, ein Größtkorn von  $\geq 16$  mm zu verwenden. Bei einem Größtkorn von 8 mm konnte nur durch eine Erhöhung des Leimgehalts eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Betons erzielt werden.

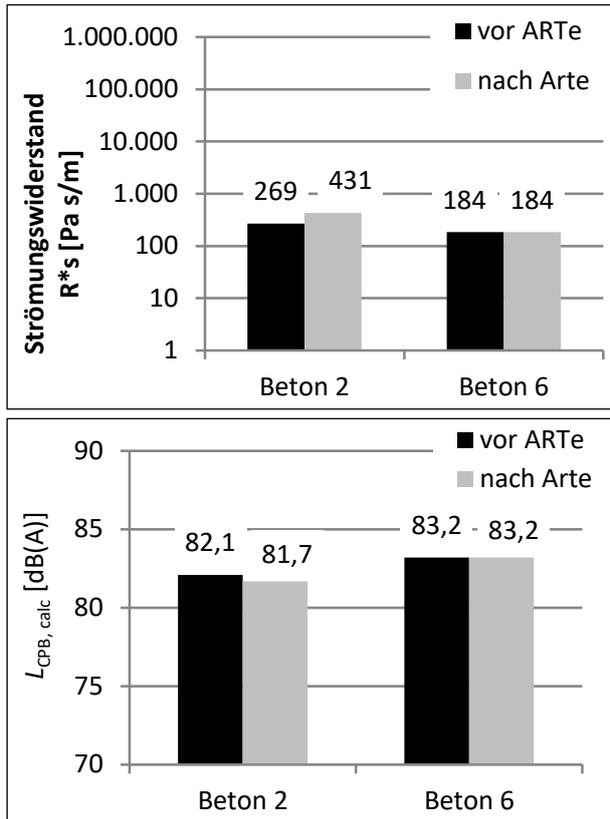
Wie in Abbildung 133 beobachtet, scheint mit höherer Festigkeit des Betons ein höherer Widerstand der Textur gegenüber mechanischer Beanspruchung vorzuliegen. In einer weiteren Untersuchung

sollte dieser Zusammenhang näher betrachtet werden. Dazu wurden die Oberflächeneigenschaften der Betone 2 und 6 vor und nach Beanspruchung in der Prüfanlage ARTe gegenübergestellt. Beton 2 und Beton 6 unterscheiden sich im Wassermenge sowie im Zementgehalt und somit in ihrer Festigkeit. Die Gesteinskörnung beider Betone ist gleich, vgl. Tabelle 13 und Tabelle 17. Abbildung 143 zeigt die ETD- und SRT-Werte der Betone 2 und 6 vor und nach der Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe.



**Abbildung 143:** Einfluss der Betonfestigkeit auf den ETD- und SRT-Wert von Beton 2 (Druckfestigkeit: 45,2 MPa) und Beton 6 (Druckfestigkeit: 55,9 MPa) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe

Infolge der Beanspruchung nimmt der ETD-Wert ab. Wie auch in Abbildung 133 beobachtet, ist die Abnahme beim höherfesten Beton 6 geringer als die von Beton 2. Die höhere Festigkeit des Betons hat jedoch keinen Einfluss auf den SRT-Wert. Bei beiden Betonen ist die Abnahme des SRT-Werts infolge des Polierens vergleichbar. Die akustischen Eigenschaften der Oberflächen sind in Abbildung 144 dargestellt.



**Abbildung 144:** Einfluss der Betonfestigkeit auf den Strömungswiderstand und den berechneten Vorbeirollpegel ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: Conti EcoContact) von Beton 2 (Druckfestigkeit: 45,2 MPa) und Beton 6 (Druckfestigkeit: 55,9 MPa) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe

Bei Beton 2 nimmt infolge der Beanspruchung der Strömungswiderstand zu, da die Texturtiefe abnimmt. Dies resultiert in einem geringfügig geringeren Vorbeirollpegel nach der Beanspruchung. Da die Texturtiefe von Beton 6 im Laufe der Beanspruchung konstant bleibt, findet auch keine Veränderung des Strömungswiderstands statt. Der berechnete Vorbeirollpegel bleibt daher ebenfalls konstant. Die Untersuchungen zeigen, dass eine höhere Festigkeit des Betons die Dauerhaftigkeit der Textur verbessern kann. Dies kann insbesondere dann von Bedeutung werden, wenn zur akustischen Optimierung feine Texturen mit geringer Texturtiefe hergestellt werden, da in diesem Fall eine hohe Dauerhaftigkeit der Texturgeometrie erforderlich ist, um eine dauerhaft hohe Griffigkeit sicherzustellen.

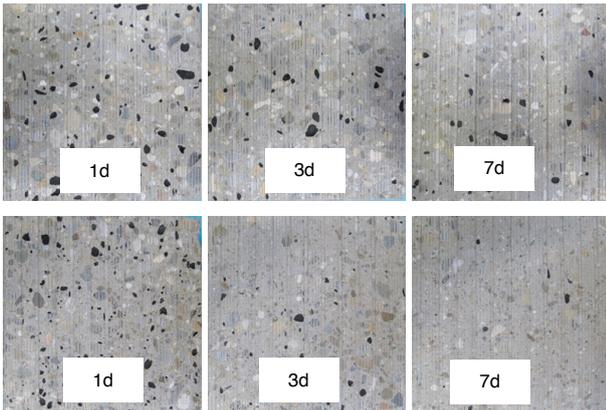
#### 5.5.4 Zeitpunkt des Grindings

Wenn das Grinding zur Texturierung von Neubaustrassen eingesetzt wird, stellt sich die Frage, zu welchem Zeitpunkt das Grinding frühestens erfolgen kann. Der Zeitpunkt ist so zu wählen, dass der Beton so weit erhärtet ist, dass zum einen die vorgesehene Texturgeometrie zielsicher in den Beton

geschnitten werden kann. Die Einhaltung dieser Texturgeometrie ist erforderlich, um die aus der Texturgeometrie resultierenden griffigkeitstechnischen und akustischen Eigenschaften zu erreichen. Zudem dürfen durch den Grindingvorgang keine Gefügeschädigungen in den Beton eingetragen werden, durch die die Festigkeit bzw. die Dauerhaftigkeit im oberflächennahen Bereich reduziert wird. Da beim Grinding mit der Laborgrindingmaschine die Beanspruchung der Oberfläche möglicherweise wesentlich geringer ist als bei Grindingmaschinen in der Praxis, wurden für die folgenden Untersuchungen pessimale Randbedingungen gewählt, um daraus Schlussfolgerungen ziehen zu können, die auch für die Praxis weitestgehend zutreffend sind: Für die Untersuchungen wurde die Betonzusammensetzung des Betons 2 aus Tabelle 13 verwendet, da hier durch den hohen Anteil an Rundkorn der Verbund der Gesteinskörner in der Matrix schlechter ist als beispielsweise bei Betonen, die ausschließlich gebrochene grobe Gesteinskörnung enthalten (Beton 1). Des Weiteren ist bei Beton 2 von einem schlechteren Verbund auszugehen, da die Festigkeiten geringer als die von beispielsweise Beton 1 oder Beton 3 sind. Da gegebenenfalls zukünftig verstärkt CEM-II- bzw. CEM-III-Zemente beim Bau von Betonfahrbahndecken zum Einsatz kommen werden, wurde für diese Untersuchungen zusätzlich zum CEM I auch der Zement CEM III/A verwendet. Die hergestellten Betonplatten lagerten nach der Herstellung ohne zusätzliche Nachbehandlungsmaßnahmen bei  $20^\circ\text{C}/60\% \text{ r.F.}$  Im Alter von 1, 3, und 7 Tagen wurden die Platten mit dem in Tabelle 25 dargestellten Wellenbesatz texturiert. Da die Textur aus einem Grinding und aus einem Grooving besteht, werden die jeweiligen Beanspruchungen abgebildet. Insbesondere beim Grooving kann ein zu früher Zeitpunkt zu einem Herausreißen der groben Gesteinskörnung und damit zu einer wenig präzisen Kantenform der Groovingrillen führen.

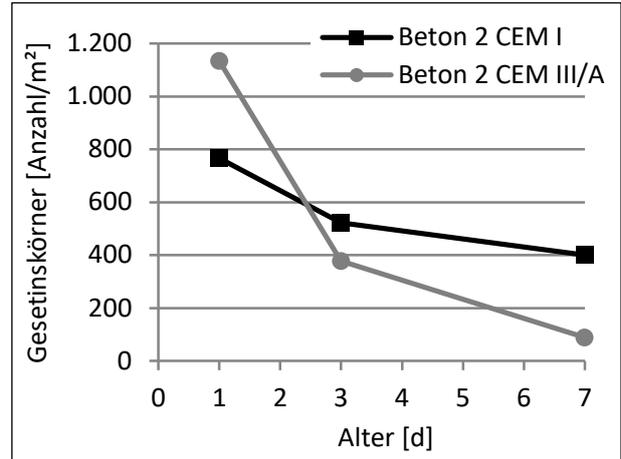
Versuchsbegleitend wurden die Druck- und Spaltzugfestigkeiten zu den genannten Zeitpunkten ermittelt, um Rückschlüsse zwischen den Textureigenschaften und der zum Zeitpunkt des Grindings vorliegenden Festigkeiten ziehen zu können. An den hergestellten Texturen wurden die Texturtiefe sowie der SRT-Wert ermittelt. Entscheidendes Merkmal der Beurteilung der Texturgeometrie war die Menge an grober Gesteinskörnung, die beim Grinding bzw. Grooving aus der Matrix herausgelöst wurde. Das Herauslösen wurde an Fotos der Oberflächen, die mit dem Programm ImageJ bearbeitet wurden, erfasst. Da bei einem zu früh erfolgenden Grinding bzw. Grooving eine Schädigung in den oberflächennahen Bereich eingetragen werden kann und damit verbunden die Dauerhaftigkeitseigenschaften verschlechtert werden, wurde der

Frost-Tausalz-Widerstand der Texturen in Anlehnung an den CDF-Test untersucht. Dazu wurden aus den Platten 3 Probekörper mit den Abmessungen  $L \times B \times H = 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  herausgesägt und die texturierte Seite geprüft. In Abbildung 157 sind Fotos der Texturen für den CEM-I-Beton dargestellt. Die Stellen, an denen die grobe Gesteinskörnung beim Grinding aus der Matrix gelöst wurde, wurden schwarz markiert, um sie bei der Bildbearbeitung erfassen zu können.



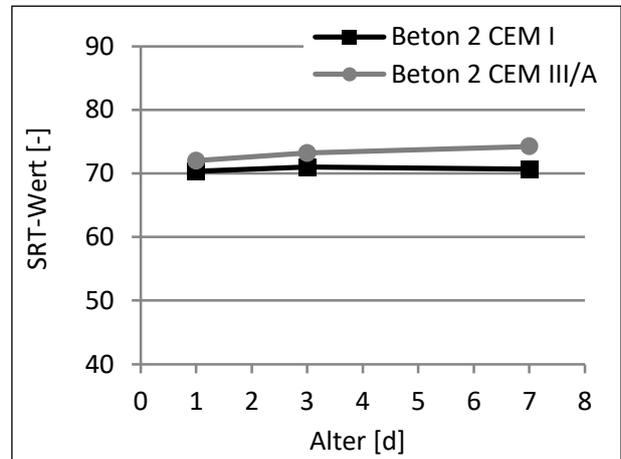
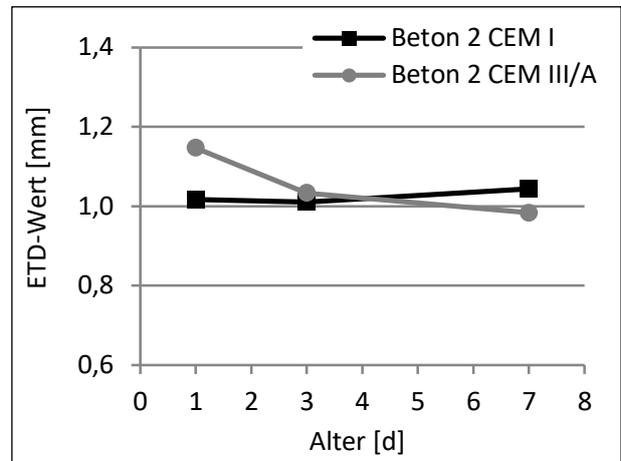
**Abbildung 145:** Fotos der Oberflächen in Abhängigkeit des Grindingzeitpunkts, obere Reihe: Beton 2 mit CEM I, untere Reihe: Beton 2 mit CEM III/A

Aus den Fotos geht hervor, dass mit zunehmendem Alter der Verbund der Gesteinskörnung in der Matrix zunimmt und folglich weniger Gesteinskörnung herausgelöst wird. Ab einem Alter von 3 Tagen ist bei Beton mit CEM III/A im Vergleich zum Beton mit CEM I die Anzahl der herausgelösten Gesteinskörner geringer. Dies könnte damit begründet sein, dass der Hüttensand im CEM III infolge der sich bildenden Reaktionsprodukte zu einer Verringerung der Dicke der Übergangszone von Gesteinskorn und Matrix führt. Abbildung 146 zeigt die aus der Bildbearbeitung ermittelte Anzahl an herausgelösten Gesteinskörnern.



**Abbildung 146:** Anzahl der beim Grinding und Grooving herausgelösten Gesteinskörner (Beton 2 mit CEM I und CEM III/A)

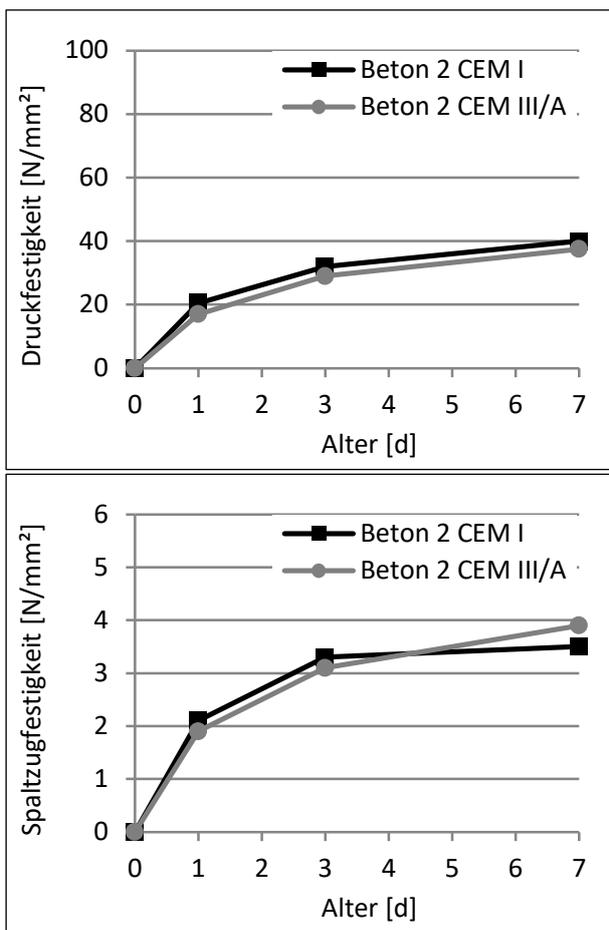
Beim Beton mit CEM I wird die Anzahl der herausgelösten Gesteinskörner zwischen 1 d und 7 d rd. halbiert. Bei Beton mit CEM III ist nach einem Tag die Anzahl an Gesteinskörnern noch deutlich über der des CEM-I-Betons. Nach sieben Tagen beträgt die Anzahl der Gesteinskörner nur noch rd.  $\frac{1}{4}$  von der des CEM-I-Betons.



**Abbildung 147:** ETD- und SRT-Werte der Betone zu den jeweiligen Grindingzeitpunkten

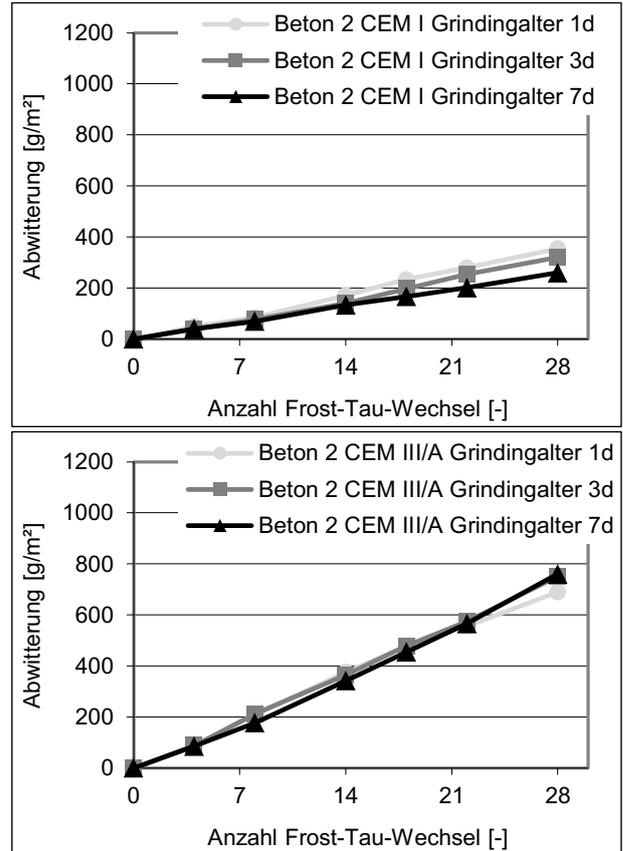
Beim CEM-III-Beton ist ein Einfluss des Grindingzeitpunkts auf die Texturtiefe feststellbar. Der ETD-Wert ist beim Grindingalter von einem Tag mit 1,14 mm um rd. 0,16 mm höher als nach sieben Tagen. Der Unterschied ist im Wesentlichen auf die hohe Anzahl an herausgelösten Gesteinskörnern im Alter von einem Tag zurückzuführen. Beim CEM-I-Beton ist hingegen kein Einfluss des Grindingzeitpunkts feststellbar. Ebenso ist bei beiden Betonen kein Einfluss des Grindingzeitpunkts auf den SRT-Wert vorhanden.

Die Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Betone weisen nahezu identische Verläufe auf und sind in Abbildung 148 dargestellt.



**Abbildung 148:** Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Betone zu den jeweiligen Grindingzeitpunkten

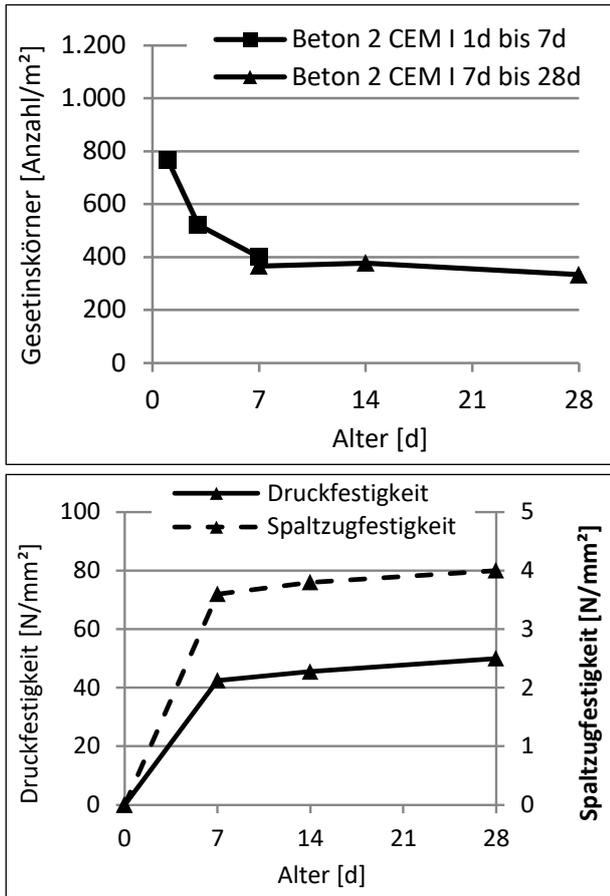
Der Frost-Tausalz-Widerstand der ist in Abbildung 149 dargestellt.



**Abbildung 149:** Frost-Tausalz-Widerstand der Texturen in Abhängigkeit des Grindingzeitpunkts (Prüfalter: 28 d): Oben: Beton 2 mit CEM I, unten: Beton 2 mit CEM III/A

Die Ergebnisse zeigen, dass die Abwitterungen beim CEM-III-Beton deutlich höher als die des CEM-I-Betons sind. Dies könnte mit einer für CEM-III-Betone unzureichenden Nachbehandlung im Zusammenhang stehen. Ein Einfluss des Grindingzeitpunkts auf den Frost-Tausalz-Widerstand ist weder beim CEM-I- noch beim CEM-III-Beton zu beobachten. Somit scheint unter den hier vorliegenden Randbedingungen, wie Betonzusammensetzung, verwendete Laborgrindingmaschine, Textur, während des Grindings bzw. Groovings keine Schädigung in den oberflächennahen Bereich eingetragen worden zu sein, die zu einer verminderten Dauerhaftigkeit der Oberfläche führt.

Zur Klärung, ob beim CEM-I-Beton durch ein Grinding/Grooving im Alter von mehr als sieben Tagen die Anzahl der herausgelösten Gesteinskörner noch weiter reduziert werden kann, wurden in einer zweiten Versuchsreihe weitere Platten hergestellt und nach sieben, 14 und 28 Tagen texturiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 150 dargestellt.



**Abbildung 150:** Oben: Anzahl der beim Grinding und Grooving herausgelösten Gesteinskörner (beide Versuchsreihen des Beton 2 mit CEM I), unten: Druck- und Spaltzugfestigkeit der zweiten Versuchsreihe des Beton 2 mit CEM I

Die Ergebnisse zeigen, dass ab einem Alter von sieben Tagen die Menge an herausgelöster Gesteinskörnung nicht weiter reduziert wird. Aus den Ergebnissen lässt sich zusammen mit den zu den Grindingzeitpunkten ermittelten Festigkeiten ableiten, dass für die hier vorliegenden Randbedingungen ab einer mittleren Druckfestigkeit von rd. 40 MPa bzw. einer mittleren Spaltzugfestigkeit von rd. 3,5 MPa die besten Textureigenschaften erzielt wurden.

### 5.5.5 Einfluss Nachbehandlung

Durch eine mangelnde Nachbehandlung geht dem Beton im oberflächennahen Bereich infolge Verdunstung Wasser verloren. Dies kann neben Schwindrissen zu einer Störung der Hydratation und damit verbunden zu verminderten Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons führen. Wenn das Grinding zur Texturierung von Neubaustrecken eingesetzt wird, stellt sich neben dem frühestmöglichen Zeitpunkt für das Grinding die Frage, wie der Beton bis dahin nachzubehandeln ist. Es wäre möglich, dass durch das Grinding der

gesamte von der Nachbehandlung betroffene oberflächennahe Bereich entfernt wird und unabhängig von der gewählten Nachbehandlungsmaßnahme der texturierte Beton im Bereich der Textur eine hohe Güte aufweist. Für die Untersuchungen wurde ebenfalls die Betonzusammensetzung des Betons 2 aus Tabelle 13 verwendet. Als Zement wurde ausschließlich der CEM I verwendet. Die hergestellten Betonplatten wurden nach der Herstellung wie folgt nachbehandelt:

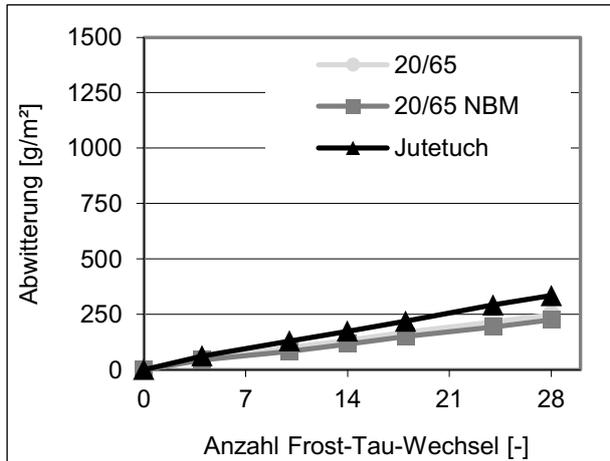
- **20/65:** Lagerung einer Platte bei 20°C/60% r.F. ohne weitere Nachbehandlungsmaßnahmen
- **20/65 NBM:** Lagerung einer Platte bei 20°C/60% r.F. und zusätzliches Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels (Praxisvariante)
- **Jutetuch:** Lagerung einer Platte bei 20°C/60% r.F. und Abdecken mit Folie bzw. Abdecken mit feuchtem Jutetuch ab einem Alter von einem Tag bis zum Alter von sieben Tagen (Optimum)

Im Alter von sieben Tagen wurden die Platten mit dem Wellenbesatz aus Tabelle 29 texturiert. Ziel des Grindings war es, so wenig wie möglich Beton abzutragen, um auch hier ein Pessimum zu erreichen. Aus diesem Grund betrug die Schneidtiefe 3 statt 4 mm. Auf ein zusätzliches Grooving wurde aus diesem Grund ebenfalls verzichtet.

Textur	Grinding	
	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]
8	2,4	1,8

**Tabelle 26:** Wellenbesatz der Textur 8

Durch das Grinding konnten keine Schädigungen der Oberfläche in Abhängigkeit der jeweiligen Nachbehandlungsmaßnahme festgestellt werden. Daher wurden keine weiteren Untersuchungen der Textureigenschaften durchgeführt. Im Anschluss an das Grinding wurden aus den Platten je drei Probekörper mit den Abmessungen L x B x H = 150 mm x 150 mm x 70 mm herausgesägt und im Alter von 28 Tagen an der texturierten Seite der Frost-Tausalz-Widerstand in Anlehnung an den CDF-Test geprüft (Abbildung 151).



**Abbildung 151:** Frost-Tausalz-Widerstand der Texturen in Abhängigkeit der Nachbehandlung (Beton 2 CEM I, Prüfalter: 28 d)

Die Abwitterungen der Betone betragen nach 28 Tagen rd. 300 g/m². Ein Einfluss der Nachbehandlung ist nicht zu beobachten. Zum einen scheint zuzutreffen, dass beim Grinding zumindest ein Teil der oberflächennahen Schicht, die von der Nachbehandlung beeinflusst ist, abgetragen wird. Des Weiteren weisen CEM-I-Betone häufig eine geringe Nachbehandlungsempfindlichkeit auf [FE 08.0194/2008/LGB].

Die in Abbildung 149 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung eines CEM III der Einfluss der Nachbehandlung wesentlich größer sein kann. Dies zeigen auch Untersuchungen zur Nachbehandlung von Waschbetonfahrbahndecken [FE 08.0194/2008/LGB].

Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass bei Verwendung eines CEM I das in der Praxis übliche Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels eine ausreichende Maßnahme darstellt, um die Dauerhaftigkeit des Betons sicherzustellen.

## 5.6 Änderung der akustischen Eigenschaften

### 5.6.1 Methodik

An allen Prüfkörpern wurden von Müller-BBM jeweils im unbeanspruchten und (soweit vorliegend) im beanspruchten Zustand Messungen der akustisch relevanten Fahrbahnoberflächenparameter durchgeführt: Dies sind

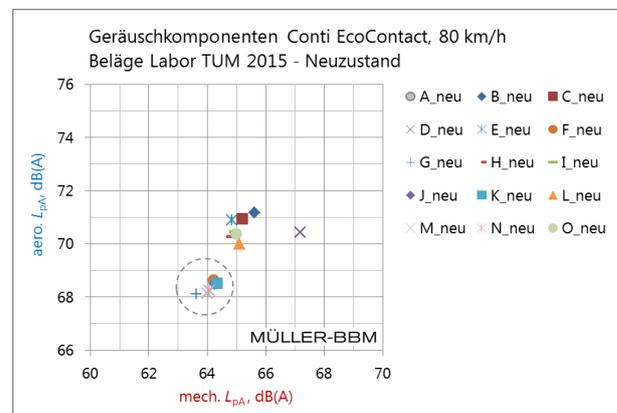
- die Oberflächentextur
- der texturinduzierte Strömungswiderstand im Reifen-Fahrbahn-Kontakt.

Die Messergebnisse wurden in das Rechenmodell SPERoN® eingespeist, um eine direkte Aussage

über die akustische Wirkung der Grinding-Texturen zu erhalten und eine Auswahl der akustisch besten Grinding-Konfigurationen treffen zu können.

### 5.6.2 Simulationsergebnisse

Das Simulationsverfahren erlaubt es, die aus unterschiedlichen Geräuschenstehungsmechanismen hervorgehenden Anteile des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs getrennt auszuweisen und die Berechnungen für verschiedene Reifen und Geschwindigkeiten durchzuführen. Dazu zählt die mechanisch induzierte Geräuschkomponente  $L_{pA,mech}$ , die mit der Schwingungsanregung und Schallabstrahlung des Reifens durch den Rollvorgang auf der rauen Fahrbahnoberfläche zusammenhängt sowie die aerodynamisch induzierte Geräuschkomponente  $L_{pA,aero}$ , die aus den Luftströmungsvorgängen im Reifen-Fahrbahn-Kontakt herrührt. Im **Anhang 6** und beispielhaft in Abbildung 152 sind die Rechenergebnisse für den Reifen Continental EcoContact bei Geschwindigkeiten von  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h für den Neuzustand des Probekörpers und für den Zustand nach der Beanspruchung durch den Raveling-Tester ARTE aufgetragen. Dargestellt sind die berechneten Rollgeräuschkomponenten  $L_{pA,mech}$  und  $L_{pA,aero}$  in Abhängigkeit von der Oberflächentextur. Die gestrichelten Kreise umfassen die Gruppe der optimalen Grinding-Beton-Kombinationen (Durchmesser der Kreise:  $\pm 0,5$  dB(A)).



**Abbildung 152:** Berechnete Rollgeräuschkomponenten  $L_{pA,mech}$  und  $L_{pA,aero}$  in Abhängigkeit von der Oberflächentextur im Neuzustand,  $v = 80$  km/h, Gestrichelte Kreise: Gruppe der optimalen Grinding-Beton-Kombinationen (Durchmesser der Kreise:  $\pm 0,5$  dB(A)).

### 5.6.3 Diskussion der Simulationsergebnisse

Die Rollgeräuschberechnungen haben folgendes ergeben:

- die aerodynamische Geräuschkomponente  $L_{pA,aero}$  streut über alle Texturen im beanspruchten Zustand der Probekörper sowohl bei der

niedrigen als auch der hohen Geschwindigkeit in einem Pegelbereich von mehr als 7 dB(A);

- da die aerodynamische Komponente  $L_{pA,aero}$  bei höheren Geschwindigkeiten das gesamte Rollgeräusch dominiert, kommt dem Einfluss der Grinding-Textur auf die aerodynamische Komponente größte Bedeutung zu. Für eine akustisch optimierte Grindingtextur ist eine Maximierung des Luftströmungswiderstands im Reifen-Fahrbahn-Kontakt anzustreben. Dies könnte den Bestrebungen nach einer Minimierung des Strömungswiderstands für Wasser im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zur Sicherstellung der Griffbarkeit im nassen Zustand der Fahrbahn entgegenstehen;
- durch die Beanspruchung der Texturen im ARTE findet eine Umverteilung der Pegelwerte statt. Auffallend ist, dass die akustisch optimalen Texturen, also diejenigen Texturen, die bereits im Neuzustand zu den niedrigsten Geräuschpegeln führen, von den Veränderungen weniger betroffen sind als die anderen.

#### 5.6.4 Schlussfolgerungen für akustisch günstige Grinding-Texturen

In den Berechnungsergebnissen bilden sich zwei Gruppen heraus, die nicht zu den akustisch optimalen Texturen zu zählen sind und die sich auch im Beanspruchungstest negativ bemerkbar machen. Dies sind

- alle kombinierten Grinding/Grooving-Texturen sowie
- alle reinen Grindingtexturen mit einer Segmentbreite von 3,2 mm (> 2,8 mm) oder einer Distanzscheibenbreite von > 2,0 mm.

Bei der Erstellung akustisch optimierter Grindingtexturen sind entsprechend der o. g. Simulation also alle derartigen Grinding-Konfigurationen als nicht zielführend zu verwerfen (vgl. Abschnitt 8.3.2).

## 6 3-D-FEM-Voruntersuchungen und Dimensionierungsberechnungen für den praxisrelevanten Einsatz

Die Verwendung alternativer Oberbetone kann einerseits zu anderen Dicken des Oberbetons im Gesamtpaket Betondecke und andererseits ggf. zu stark differierenden mechanischen Eigenschaften gegenüber dem Unterbeton führen. Die strukturelle

Substanz der Gesamtbetondecke unter Berücksichtigung von Erhaltungszyklen, die ggf. zu einer weiteren Reduzierung der Deckendicke führt, soll im Rahmen dieses Projekts rechnerisch untersucht werden. Zur Abschätzung der Lebensdauer sind Dimensionierungsberechnungen erforderlich. Diese werden mit dem Verfahren der rechnerischen Dimensionierung nach [RDO Beton 09] durchgeführt.

Mit den [RDO Beton 09] wird zurzeit ein semiprobabilistisches Verfahren angewandt. Dabei werden unterschiedliche Sicherheitsfaktoren (Teilsicherheitsfaktoren) angesetzt, die die unterschiedlichen Streubreiten der Einflussgrößen berücksichtigen und die entsprechend dem erforderlichen Sicherheitsniveau variiert werden können.

Im Teilsicherheitskonzept (Last-, Anpassungs- und Materialfaktoren) gehen rund 40 Einzeleinflüsse in das einwirkende bzw. in das aufnehmbare Moment ein, deren Gegenüberstellung zum Dimensionierungsergebnis führt.

Die Dimensionierung für Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen wird mit dem Programm [AWDSTAKO] in der aktuellen Programmversion 1.7 vorgenommen.

Zur Untersuchung der baupraktischen Eignung werden in einem ersten Schritt 3-D-FEM Modelle aufgestellt, mit deren Hilfe unterschiedliche Dicken des Oberbetons simuliert werden [FE 09.0188/2011/ERB]. Dabei werden verschiedene Festigkeiten in Relation zum Unterbeton in Ansatz gebracht. Die Modelle werden praxisnah mit Belastungen aus Witterung und Verkehr untersucht [VI/KAY/KIE/PF/RI]. Insbesondere sind Spannungen in der jeweiligen Übergangsschicht zwischen Ober- und Unterbeton von Interesse, die durch ungleichmäßige Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der Ober- und Unterseite entstehen.

Mit den Ergebnissen werden im Folgeschritt Dimensionierungsberechnungen mit [AWDSTAKO] durchgeführt, wobei praxisrelevante Auflagerverhältnisse und Plattengeometrien in den Berechnungsfällen zugrunde gelegt werden.

Bei den Berechnungen wird sowohl ein einmaliges als auch ein zweimaliges Abtragen mittels Grinding während der Nutzungszeit berücksichtigt.

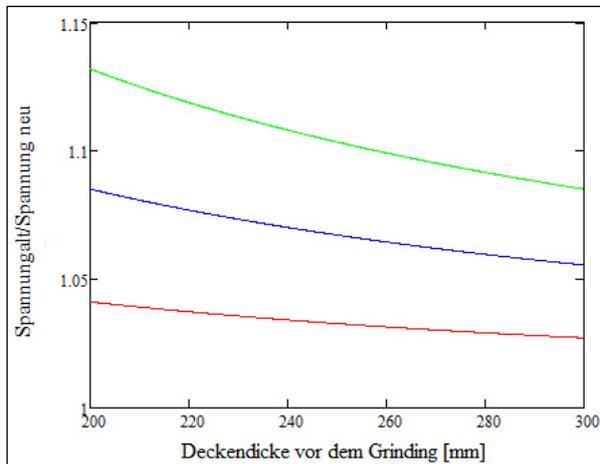
Im Ergebnis dieser Berechnungen werden die Folgen für die Gesamtbetondecke aufgezeigt, die durch die Wahl unterschiedlicher Oberbetone entstehen. Dabei wird auf die Regelwerke [RStO 12], [RDO Beton 09] und [ZTV Beton-StB 07] eingegangen.

## 6.1 Analyse der effektiven Querschnittsschwächung infolge Grindings

Der Grindingvorgang führt zu einer Reduzierung der wirksamen Deckendicke. Entsprechend Gleichung 5-1 ist die Biegespannung direkt von der Deckendicke abhängig.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M}{0,167 \cdot h_1^2} \quad (5-1)$$

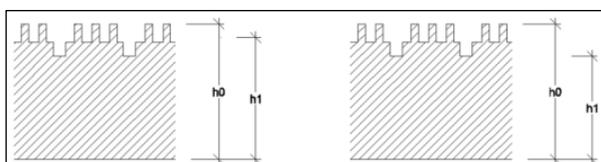
Abbildung 153 zeigt wie sich die Reduktion der Deckendicke bei konstantem Biegemoment auf das Verhältnis der Biegespannungen vor und nach dem Grinding auswirkt. Die rote Kurve zeigt die Spannungsverhältnisse bei einer Reduzierung der wirksamen Deckendicke um 8 mm. Die blaue und die grüne Kurve gelten für eine Verminderung um 16 mm bzw. 24 mm.



**Abbildung 153:** Verhältnis der Biegespannungen vor und nach dem Grinding

Rechtwinklig zur Grindingrichtung ist dabei die verbleibende wirksame Deckendicke gleichzusetzen mit der geringsten durch die Grindingtextur erzeugten Deckendicke.

In Grindingrichtung kann dagegen von einer mittragenden Wirkung der erzeugten Stege ausgegangen werden. Es darf also für die wirksame Deckendicke von einem mittleren Wert zwischen der Deckendicke vor dem Grinding und der geringsten verbliebenen Deckendicke ausgegangen werden. Die Spannung an der Querfuge (Nachweise 2, 4 und 6) werden also stärker beeinflusst als die Nachweise an der Längsfuge (Abbildung 154).

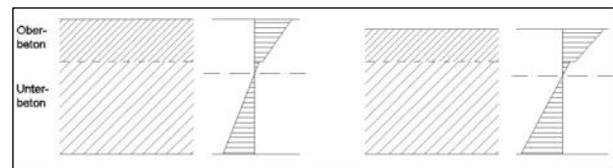


**Abbildung 154:** Wirkung an Längs- und Querfuge

Strenggenommen ergibt sich durch das Grinding eine orthotrope Platte.

Weil von dieser Reduktion ausschließlich der Oberbeton betroffen ist, verändert sich auch das Verhältnis von Oberbeton zu Unterbeton. Gleichung 5-1 gilt im strengen Sinne nur, wenn Ober- und Unterbeton identisch sind. Dies wird bei der Dimensionierung im Allgemeinen vernachlässigt. Wenn der Oberbeton von höherer Festigkeit als der Unterbeton ist, dann ist aber damit zu rechnen, dass das Grinding sich deutlicher auf die Biegespannungen auswirkt als bei einer homogenen Decke.

Umgekehrt sind bei minderer Festigkeit des Oberbetons die Auswirkungen geringer (Abbildung 155).



**Abbildung 155:** Spannungen im Querschnitt bei unterschiedlicher Betonqualität

Die Deckendicke bestimmt nicht nur die Größe der Spannungen, welche sich aus einem Biegemoment ergeben, sondern sie beeinflusst auch die Größe des Biegemomentes selbst. Für eine fundierte Analyse der Auswirkungen des Grindings auf die maßgebenden Biegespannungen sind deshalb Berechnungen an einem komplexeren Modell notwendig.

### 6.1.1 Definition eines FEM-Modells zur Spannungsanalyse im gegrindeten Querschnitt

Um die Auswirkungen des Grindings auf die Spannungen zu analysieren, wurde ein Finite-Elemente-Volumenmodell definiert. Die Softwarebasis bildet das Programmsystem CalculiX [Calc 2013].

Als Basismodell wurde eine Einzelplatte mit 5 m Länge, 4 m Breite und 29 cm Dicke modelliert. Das Plattenmodell wurde vollständig aus 20-Knoten-Brickelementen aufgebaut. Die Spannungen innerhalb der Elemente werden mit einem quadratischen Funktionsansatz beschrieben. Die Verwendung linearer Elemente war nicht möglich, weil hier ausgeprägte Lockingeffekte zu erwarten sind.

Um eine Differenzierung zwischen Ober- und Unterbeton zu ermöglichen, wurde eine feine Elementierung realisiert. Dabei wurden über die Querschnittshöhe fünf Elemente angeordnet. Das obere Element hat eine Dicke von 5 cm. Die Dicke der anderen vier Elemente ergibt sich jeweils als ein Viertel der restlichen Plattendicke. Das Längenverhältnis der Elementkanten sollte nicht größer sein als 2:1. Deshalb wurden 50 Elemente in Längsrichtung und

40 Element in Querrichtung angeordnet. Die genannte Bedingung ist damit eingehalten.

Die Unterlage der Platte wurde mit einem Volumenblock aus 8-Knoten-Brickelementen simuliert. Dieser einfachere Ansatz ist möglich, weil der Unterbau nicht durch Biegemomente beansprucht wird und deshalb kein Shearlocking zu erwarten ist. Die Materialparameter für den Unterbau wurden als linear vorausgesetzt und so eingestellt, dass sich realistische Werte für die Einsenkung der Plattenecken ergeben (Abbildung 156).

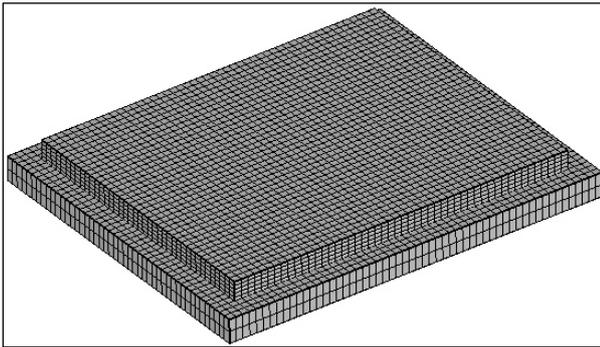


Abbildung 156: Modell der Platte mit Unterlage

Die Interaktion zwischen Platte und Unterlage wurde über eine Kontaktformulierung beschrieben. Diese erlaubt in der Kontaktfuge nur die Übertragung von Druckspannungen. Das Modell verhält sich damit geometrisch nichtlinear.

### 6.1.2 Ansatz der Belastungen

Die Belastungen wurden so gewählt, dass eine hohe aber für die Praxis relevante Plattenbeanspruchung entsteht.

Der Ansatz der Verkehrslast orientiert sich an den [RDO Beton 09]. Entsprechend wurde eine einzelne Radlast von 80kN in der Mitte des langen Plattenrandes angeordnet.

Für die Temperaturbeanspruchung wurden zwei Fälle unterschieden:

- Heißer Sommertag (TLF 1): In diesem Fall liegt im Betonquerschnitt ein nach oben hin progressiv ansteigender Temperaturverlauf vor. An der Oberseite der Platte wurde eine Temperatur von 45°C angenommen. Für die Unterseite wurden 20°C angesetzt. Der komplette Temperaturverlauf ist in Abbildung 157 dargestellt. Dieser Temperaturverlauf erzeugt die maximale Zugspannung an der Plattenunterseite.
- Heißer Sommertag mit Regenschauer (TLF 2): Für diesen Temperaturlastfall wurde angenommen, dass ein Regenschauer zu einer plötzlichen Abkühlung der Oberflächen führt. Dies bewirkt eine Umkehrung der Gradienten im oberen

Bereich. Der komplette Temperaturverlauf ist in Abbildung 158 dargestellt. Dieser Temperaturverlauf erzeugt vertikale Zugspannungen im Querschnitt und wird deshalb angesetzt, um die mögliche Größenordnung dieser Spannungen zu ermitteln.

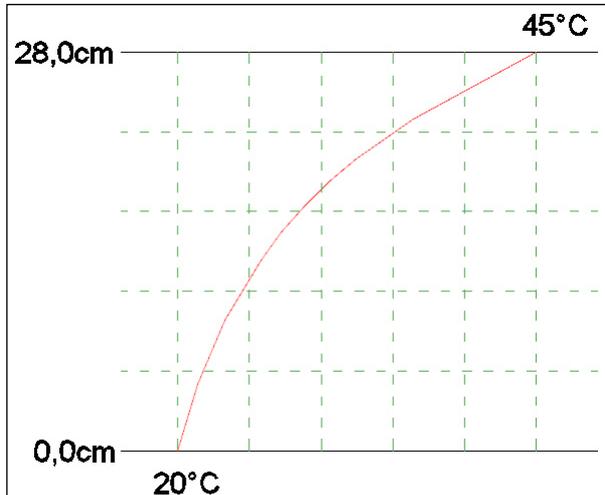


Abbildung 157: Temperaturgradient im TLF 1

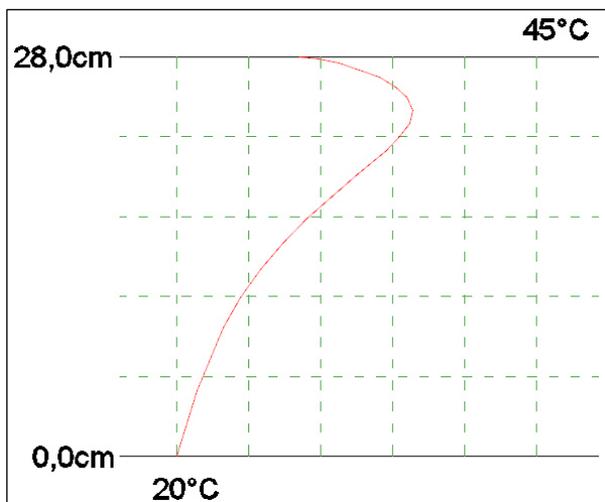


Abbildung 158: Temperaturgradient im TLF 2

### 6.1.3 Ansatz der Materialparameter

Der Plattenbeton wird als elastisches Material modelliert. Entsprechend sind nur die beiden Parameter Elastizitätsmodul und Querdehnzahl vorzugeben.

Für den Unterbeton wird immer ein E-Modul von 41000 MPa angesetzt. Für den Oberbeton werden drei Varianten untersucht:

- Variante 1: Oberbeton mit besserer Qualität ( $E = 44000$  MPa)
- Variante 2: Oberbeton in gleicher Qualität wie der Unterbeton ( $E = 41000$  MPa)

- Variante 3: Oberbeton mit minderer Qualität (E = 37000 MPa).

Für jeden Beton wird die Wärmedehnzahl  $10 \cdot 10^{-6}$  1/K festgelegt. Die Betondichte beträgt immer 24k N/m<sup>3</sup>.

Die Materialparameter für den Unterbau werden immer gleichbleibend angenommen:

E-Modul: 300 MPa

Querdehnzahl: 0,2.

### 6.1.4 Berechnungsprogramm

Für die Berechnung der maximalen Zugspannungen in der Platte, welche für den Versagensfall maßgebend sind, wird der Temperaturlastfall 1 und die Radlast angesetzt. Um die maximalen vertikalen Zugspannungen, insbesondere im Bereich der Grenzfläche zwischen Unter- und Oberbeton zu studieren, wird der Temperaturlastfall 2 angesetzt.

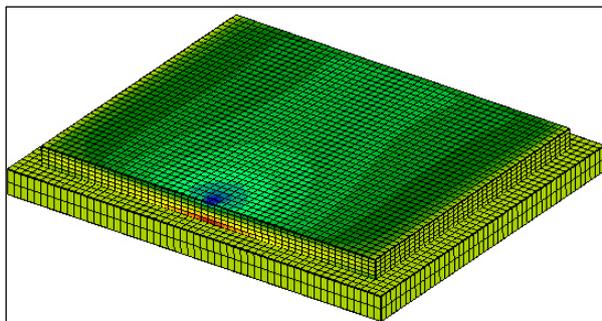
Für beide Temperaturlastfälle werden alle drei Materialvarianten für den Oberbeton untersucht.

Für jede dieser Parameterkombinationen wird der ungeschwächte Querschnitt, sowie der Querschnitt nach einem Grindingvorgang und nach zwei Grindingvorgängen berechnet. Insgesamt entstehen damit 18 Berechnungsfälle.

Für die Berechnungen wird festgelegt, dass der aus einem Grindingvorgang resultierende Materialabtrag 0,5 cm beträgt. Der Temperaturverlauf im Querschnitt wird durch das Grinding nicht verändert, sondern nur am unteren Ende verkürzt.

### 6.1.5 Berechnungsergebnisse

Die maximalen Zugspannungen für die Berechnungsfälle mit dem Temperaturlastfall 1 ergeben sich unmittelbar unter der Radlast an der Plattenunterseite (Abbildung 159).



**Abbildung 159:** horizontale Spannungen in Fahrtrichtung

Die berechneten Spannungen sind in Tabelle 27 und Tabelle 28 zusammengestellt.

Es ist zu erwarten, dass die Spannungen mit jedem Grindingvorgang ansteigen, da das Widerstandsmoment der Platten reduziert wird. Weiter ist zu vermuten, dass die Zugspannungen an der Plattenunterseite sich verkleinern, wenn die Steifigkeit des Oberbetons erhöht wird.

	Verhältnis E-Modul Oberbeton (Eo) / E-Modul Unterbeton (Eu)		
	Eo > Eu	Eo = Eu	Eo < Eu
Ungeschwächter Querschnitt	2,25	2,27	2,31
Querschnitt nach 1 x Grinding	2,32	2,34	2,38
Querschnitt nach 2 x Grinding	2,39	2,41	2,45

**Tabelle 27:** maximale horizontale Zugspannung infolge Radlast in Fahrtrichtung [MPa]

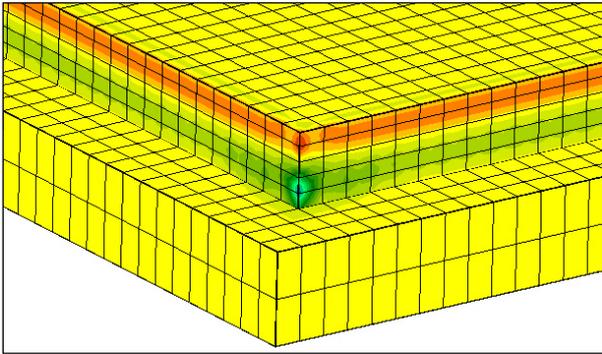
Die Zugspannungen, welche sich allein aus den Radlasten ergeben (Tabelle 27), folgen auch diesem erwarteten Muster. In den Platten mit weicherem Oberbeton (Eo < EU) entstehen um ca. 3% höhere Spannungen als in den Platten mit steiferem Oberbeton (Eo > Eu). Durch jeden Grindingvorgang werden die Spannungen um ca. 3% erhöht. Bei steiferem Oberbeton wirkt sich das Grinding etwas stärker aus als bei weicherem Oberbeton.

	Verhältnis E-Modul Oberbeton (Eo) / E-Modul Unterbeton (Eu)		
	Eo > Eu	Eo = Eu	Eo < Eu
Ungeschwächter Querschnitt	5,00	5,34	5,27
Querschnitt nach 1 x Grinding	5,33	5,57	5,57
Querschnitt nach 2 x Grinding	5,59	5,68	5,68

**Tabelle 28:** maximale horizontale Zugspannung infolge Radlast und Temperaturgradient in Fahrtrichtung [MPa]

Wenn neben der Radlast ein Temperaturgradient berücksichtigt wird, dann ergeben sich deutlich höhere Spannungen (Tabelle 28). Auch die Unterschiede, welche sich aus den verschiedenen Oberbetonen ergeben, nehmen zu. Gleichzeitig führt ein insgesamt weicherer Querschnitt aber auch dazu, dass sich die aufgewölbte Platte eher auf den Untergrund drücken lässt. Damit ist wiederum eine Verminderung der Spannungen verbunden. Dies erklärt die vergleichsweise moderaten Spannungen in der rechten Spalte der Tabelle 27 (Fall Eo < Eu). Die maximale berechnete Spannungserhöhung, welche aus einem Grindingvorgang resultiert, beträgt 6,6%.

Wenn im Plattenquerschnitt ein Temperaturverlauf entsprechend Temperaturlastfall 2 auftritt, dann bilden sich, besonders in den Eckbereichen vertikale Zugspannungen heraus (Abbildung 160).



**Abbildung 160:** Vertikalspannungen an der Plattenecke (rot: Zugspannungen, grün/blau: Druckspannungen) beim Temperaturlastfall 2

Die maximalen Vertikalspannungen, welche mit dem Temperaturlastfall 2 berechnet wurden, sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

Es ist zu beachten, dass bei einer FEM-Berechnung die Spannungen in diskreten Punkten berechnet werden. Zwischen diesen Punkten werden die berechneten Werte geradlinig interpoliert. Weil das Spannungsmaximum in diesem Fall lokal konzentriert ist, muss man davon ausgehen, dass nicht der tatsächliche Maximalwert der Spannung ermittelt werden konnte. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

	Verhältnis E-Modul Oberbeton ( $E_o$ ) / E-Modul Unterbeton ( $E_u$ )		
	$E_o > E_u$	$E_o = E_u$	$E_o < E_u$
Ungeschwächter Querschnitt	1,69	1,61	1,45
Querschnitt nach 1 x Grinding	1,99	1,91	1,72
Querschnitt nach 2 x Grinding	2,01	1,95	1,75

**Tabelle 29:** maximale vertikale Zugspannung infolge Radlast und Temperaturgradient in Fahrtrichtung [MPa]

Die Ergebnisse zeigen, dass ein steiferer Oberbeton zu deutlich höheren Vertikalspannungen führt. Die ermittelte Maximalspannung tritt jeweils in der Nähe der Kontaktfläche zwischen Ober- und Unterbeton auf.

Die Werte in Tabelle 29 lassen weiterhin eine Steigerung der Spannungen durch die Grindingvorgänge vermuten. Der Anstieg der ermittelten Spannungswerte wird aber wahrscheinlich allein durch die oben beschriebene Berechnung in diskreten Punkten verursacht. Die Berechnungspunkte rücken durch die Querschnittsreduzierung näher an den Ort der Maximalspannung.

Die berechneten vertikalen Zugspannungen erreichen im berechneten Beispiel zwar eine relevante Größenordnung, sie bleiben aber deutlich unter der Zugfestigkeit des Betons. Wenn weitere ungünstige Faktoren hinzukommen, kann aber die Bildung von

Horizontalrisen möglich werden. Das gilt in besonderer Weise für sehr jungen Beton.

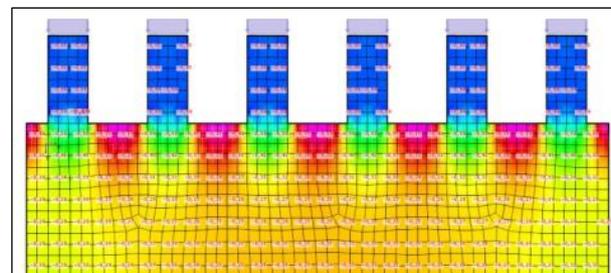
### 6.1.6 Hinweise für die Dimensionierung

Das Grinding führt zu einer Erhöhung der maßgebenden Zugspannungen. Auch wenn der prozentuale Spannungszuwachs nicht sehr hoch ist, so ist doch zu beachten, dass das gesamte Spannungskollektiv entsprechend verstärkt wird. Damit kann eine deutliche Beschleunigung der Betonermüdung verbunden sein. Wenn die potentielle Möglichkeit für ein Oberflächengrinding geschaffen werden soll, ist also ein entsprechender Dickenzuschlag bereits bei der Dimensionierung vorzusehen. Dabei ist es ausreichend, den zu erwartenden Grindingabtrag als Dickenzuschlag zu wählen. Wenn der Oberflächenbeton einen höheren E-Modul hat als der Unterbeton, dann werden die Auswirkungen des Grinding verstärkt. In diesem Fall ist ein weiterer Sicherheitszuschlag von 0,5 cm erforderlich.

## 6.2 Analyse der mechanischen Widerstandsfähigkeit der Grindingtextur

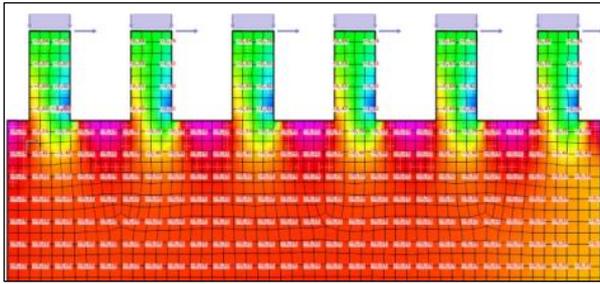
### 6.2.1 Spannungen infolge Radlast

Unter den Rädern ergeben sich innerhalb der Grindingtextur Spannungskonzentrationen (Abbildung 161). Diese überlagern sich mit den aus der Plattenbiegung resultierenden Spannungen.



**Abbildung 161:** Spannungskonzentrationen unter der Radlast

Besonders im Kurvenbereich gibt es zusätzliche Horizontalbeanspruchungen, welche zu zusätzlichen Biegespannungen in den Stegen führen. (Abbildung 162).



**Abbildung 162:** Biegespannungen infolge Horizontallast

Wenn die Spannungen die Betonfestigkeit überschreiten, kommt es zu einem Abbruch der Stege.

Die in Abbildung 161 und Abbildung 162 gezeigten Spannungsbilder wurden durch Berechnungen an einem zweidimensionalen FE-Modell erzeugt und zeigen ein zutreffendes Bild der qualitativen Spannungsverteilung. Eine realitätsnahe Berechnung der tatsächlich vorhandenen Spannungen ist aber problematisch, weil bei der Feinheit der Grindtextur nicht mehr von einem homogenen Material ausgegangen werden kann. Hier wären Betrachtungen auf Mesoebene notwendig.

### 6.2.2 Empfehlungen zur Festlegung der Grindtextur

Bei filigranen Grindtexturen ist mit einer schnellen Erosion des Oberflächenmusters zu rechnen. Die theoretisch und experimentell prognostizierten Eigenschaften gehen damit verloren. Bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit einer Grindtextur ist es notwendig, theoretische Betrachtungen mit Praxiserfahrungen zu verbinden.

## 7 Maschinentechnik Grinding

### 7.1 Auswahl und Ausrüstung der für das Grindingverfahren anzuwendenden Maschinen- und Schneidtechnik

Für die Ausführung stehen Maschinen im Leistungsbereich von 130 – 630 PS und Wellenbreiten von 0,40 - 1,40 m zur Verfügung.

Die für den Einsatz geplante Grindingmaschine „GRex 55.10“ verfügt über eine Arbeitsbreite von 1,40 m und 630 PS Leistung. Die Anzahl der Überlappungsbereiche wird durch die große Wellenbreite erheblich reduziert. Hohe Tagesleistungen mit wenigen Überlappungsbereichen sorgen so für hohe Qualität und wirtschaftliches Arbeiten.

Die optimale Schnittfreudigkeit der Diamantwerkzeuge wird durch steuerbare Grindingwellen-Drehzahlen erreicht. Auf Grund des hohen Drehmomentes liefert das Antriebsaggregat auch bei niedrigen Motordrehzahlen maximale Lastübertragung.

Für Wellenantrieb und Nebenaggregate stehen zwei voneinander getrennte Antriebsmotoren zur Verfügung. Hierdurch kann auch bei maximaler Grindleistung auf die volle Versorgungsleistung für Antrieb und Absaugung zugegriffen werden.

Fein justierbare Stellmotoren sorgen für die optimale Höheneinstellung der Werkzeuge im Schneidbetrieb. Um den Einfluss von Schwingungen auf die Texturen zu minimieren, wurde bei der Konstruktion der Maschine auf das Vibrations-Schwingungs- und Verwindungsverhalten besonderes Augenmerk gelegt.

Das Gerät verfügt bereits über eine elektronische Steuerung (SPS). Dieses wird im Rahmen des Forschungsvorhabens für Sonderfunktionen z. B. für das Lenksteuerungssystem genutzt.

Diese Systeme, welche von der Fa. OAT derzeit entwickelt werden, sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens getestet werden.

Im Zentrum des die Maschinentechnik betreffenden Arbeitspaketes steht die Installation der Sensorik zur Erfassung der Ebenheit schon während des Grindingprozesses, um auf dieser Basis den Grindingprozess steuern und optimieren zu können.

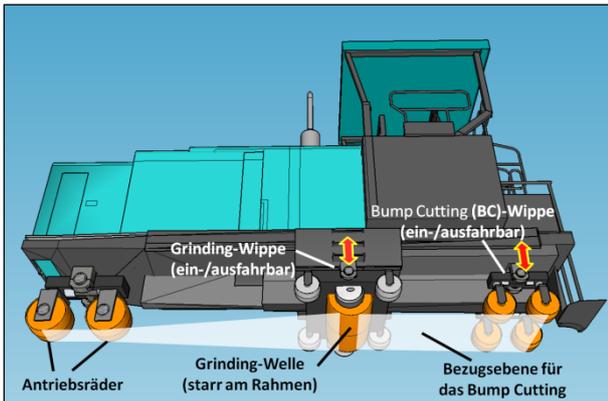
### 7.2 Entwicklung von Mess- und Steuerungssystemen an der Grindingmaschine zur Beseitigung von Unebenheiten

In diesem Kapitel wird das gewählte Messkonzept zur Optimierung der Ebenheit vorgestellt. Um die Maßnahmen zur Optimierung bewerten zu können, muss zunächst bekannt sein, über welche Ebenheitsperformance“ die Grindingmaschine ohne elektronische Steuerung/Regelung bereits verfügt. Daher ist im Laufe des Forschungsprojektes ein wichtiger Arbeitsschwerpunkt, nämlich die Simulation der Grindingmaschine, hinzugekommen. Mittels der Simulation kann beurteilt werden,

- welche Leistungsfähigkeit die Maschine bereits besitzt,
- welches Messkonzept die beste Ebenheitsverbesserung verspricht und
- welche Verbesserung noch zu erzielen ist.

### 7.2.1 Erstellung eines Simulationsmodells der Grindingmaschine

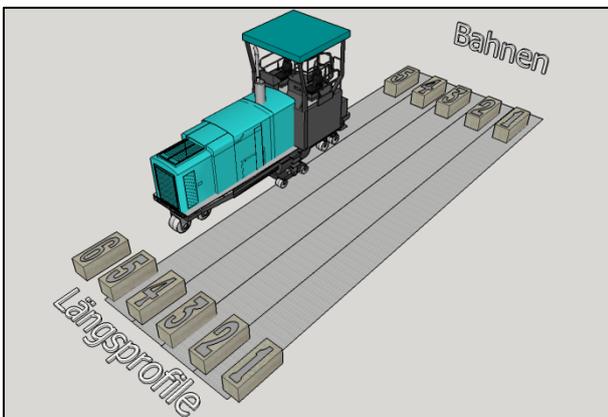
Das Simulationsmodell (Abbildung 163) ist als räumliches Modell konzipiert, das die BumpCutting-(BC-)Wippen, die Grinding-Welle und die vorderen Antriebsräder (ebenfalls aufgehängt an einer Wippe) als wesentliche Elemente enthält. Es kann den BumpCutting-Prozess in mehreren aneinander anschließenden, parallelen Bahnen abbilden.



**Abbildung 163:** räumliche Abbildung des Simulationsmodells

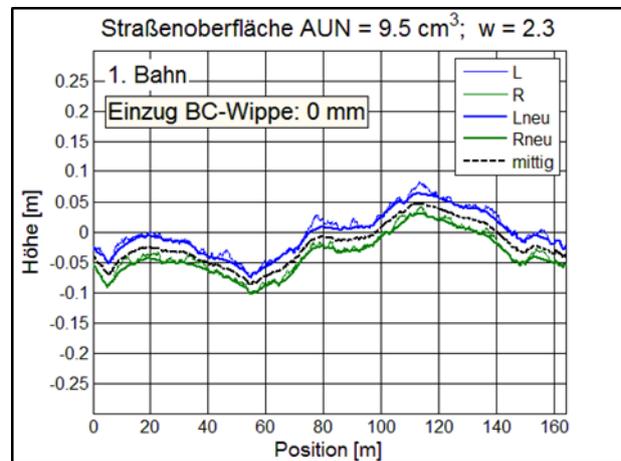
Dem Modell liegen die realen Abmessungen der Grindingmaschine zugrunde. Die räumlichen Abmessungen der Räder an den Wippen sowie ihre Deformierbarkeit in den Kontaktzonen werden ebenfalls durch Moving-Average-Filter berücksichtigt, wobei auch den unterschiedlichen Durchmessern von vorderen Antriebsrädern und hinteren Rädern an den BC-Wippen Rechnung getragen wurde. Der Materialabtrag wird über den Einzug der BC-Wippen gesteuert (Abbildung 163).

Der Anschluss geschieht wie im realen Prozess so, dass die rechte Kante einer fertiggestellten Bahn durch „Abtasten“ zur linken Seite der neuen Grindingbahn wird (Abbildung 164).



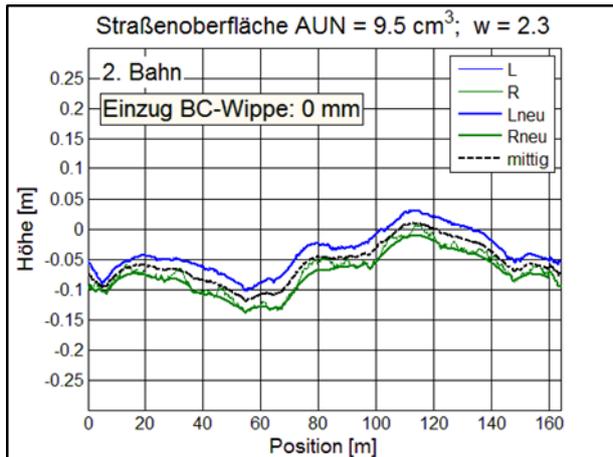
**Abbildung 164:** Lage und Reihenfolge der Bahnen im BumpCutting-Prozess

Die folgenden Bilder geben beispielhaft das Ergebnis einer Simulationsrechnung wieder. In diesem Beispiel wird die Straßenoberfläche durch 6 parallele, ca. 160 m lange Längsprofile mit einem seitlichen Abstand von 1,40 m zueinander abgebildet. Der Abstand zueinander entspricht genau der Fräsbreite der Grindingmaschine, sodass die Profile die jeweiligen linken und rechten Ränder der Fräsbahnen markieren. Es handelt sich um eine sehr unebene Straße mit ausgeprägten langen Wellen. Mit einem Unebenheitsmaß von  $AUN = 9.5 \text{ cm}^3$  liegt sie über dem Schwellenwert für Bundesautobahnen. Die Straße besitzt ein Quergefälle von 2.0% - vom linken zum rechten Fahrbahnrand fallend. Die Anordnung der Bahnen, d.h. die Abfolge der Bearbeitungsschritte erfolgt, in Fahrtrichtung gesehen, von links nach rechts.



**Abbildung 165:** Simulationsergebnis für die 1. Grindingbahn

Abbildung 165 zeigt das Simulationsergebnis für die 1. Bahn. Die dünnen Linien zeigen das linke (L) Längsprofil in blau und das rechte Längsprofil (R) in grün an. Die beiden dickeren Linien sind die Profile der gegrindeten Oberfläche, jeweils für den linken Rand (Lneu, in blau) und den rechten Rand (Rneu, in grün). Die gestrichelte schwarze Linie stellt den Mittelwert beider Profile für die gegrindete Fläche dar. Für dieses Ergebnis waren die BC-Wippen nicht eingezogen, d.h. die Aufstandspunkte der Wippenräder befanden sich in der Ebene, die durch die Unterkante der Grindingwelle und den vorderen (Antriebs)rädern aufgespannt wird (Abbildung 163). Man erkennt deutlich, dass die kürzeren Unebenheiten abgefräst werden und dass - langwellig gesehen - die Grindingmaschine natürlich dem vorgegebenen Profil folgt. Bei der vorgegebenen Einstellung (Einzug BC-Wippe = 0 mm) können sich aufgrund der großen Unebenheiten Frästiefen bis zu 2 cm ergeben. Über weite Bereiche wird Material abgetragen. Aber es bleiben auch Bereiche, in denen kein Materialabtrag zu verzeichnen ist.

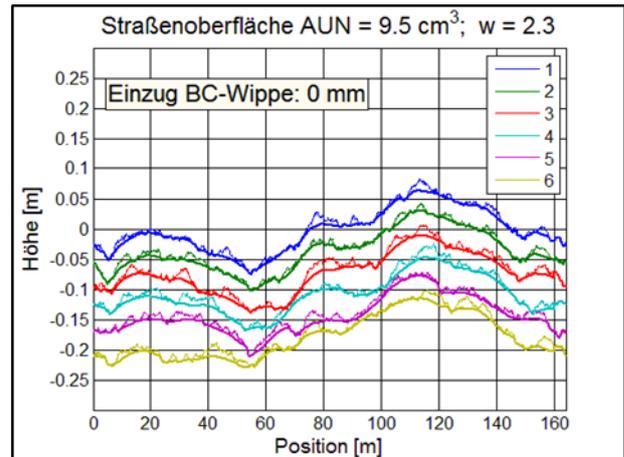


**Abbildung 166:** Simulationsergebnis für die 2. Grinding-Bahn

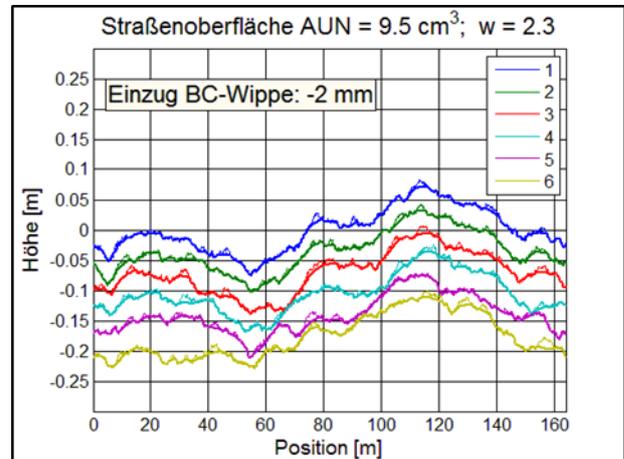
Abbildung 166 zeigt das Simulationsergebnis für die zweite Bahn, die sich unmittelbar rechts an die 1. Bahn anfügt. Die neue rechte Seite der 1. Bahn wird zur linken Seite der neuen Bahn, da das Programm so eingestellt ist, dass sich die Grindingmaschine daran orientieren soll. Das „Nachfahren“ erfolgt mit der (in Fahrtrichtung gesehen) linken hinteren Wippeneinstellung (BC-Wippe), kann aber wahlweise auch über die linke Grinding-Wippe vorgenommen werden. Die rechte hintere Wippeneinstellung bleibt bei ihrer statischen Voreinstellung (Einzug BC-Wippe = 0 mm). Wegen des beabsichtigten plangleichen Anschlusses entspricht das neue linke Profil (Lneu) dem „alten“ Profil (L), welches wiederum dem neuen rechten Profil (Rneu) der vorigen Bahn entspricht. In Wirklichkeit ist so ein exakter Anschluss natürlich nicht herstellbar.

Abbildung 167 stellt das Gesamtergebnis über alle 5 Bahnen (= 6 Profile) dar. Die dünnen Linien repräsentieren die unbearbeitete Fläche, während die dickeren Linien die gegrindeten Flächen abbilden.

Das Ergebnis gilt für den Fall, dass sich die Aufstandspunkte der Räder der BC-Wippen in einer Ebene mit dem theoretischen Aufstandspunkt des Antriebsrades und der Unterkante der Grindingwelle befinden. Außerdem wird vorausgesetzt, dass der Rahmen der Maschine idealsteif ist. Allerdings wird das Eindringen der Räder – sowohl der vorderen Antriebsräder als auch der Räder der BC-Wippen – berücksichtigt. Gegenwärtig wird angenommen, dass die kleineren BC-Wippenräder eine Aufstandslänge von 2 - 3 cm und die Antriebsräder eine Aufstandslänge von 4 - 5 cm haben. Diese Einstellung muss gegebenenfalls noch angepasst werden.



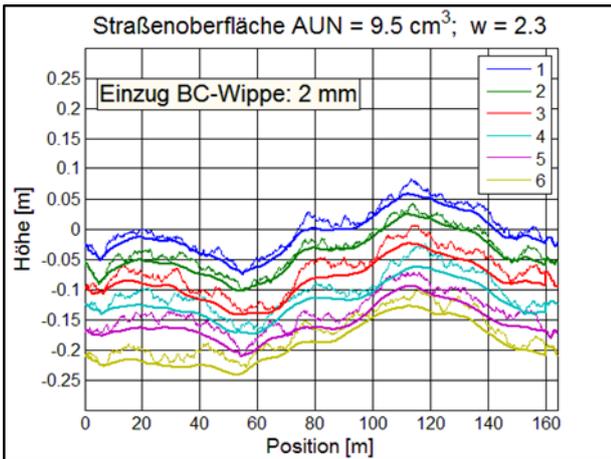
**Abbildung 167:** Gesamtergebnis für alle Grinding-Bahnen



**Abbildung 168:** Gesamtergebnis für um 2 mm „ausgefahrene“ BumpCutting (BC)-Wippe

Wenn die BC-Wippe „ausgefahren“ bzw. nach unten gefahren wird, hebt sich die Grindingwelle an. Das Ergebnis ist, dass geringere Frästiefen erzielt werden. Das soll mit der nächsten Abbildung 168 veranschaulicht werden. Sie stellt das Fräsergebnis für den Fall dar, dass die Wippen um 2 mm ausgefahren sind. Beim Vergleich zwischen Abbildung 168 und Abbildung 167 kann man sehr deutlich die geringeren Frästiefen erkennen. Ein Abtrag erfolgt nur noch an wenigen Stellen. Der größte Teil der Fläche bleibt unbearbeitet.

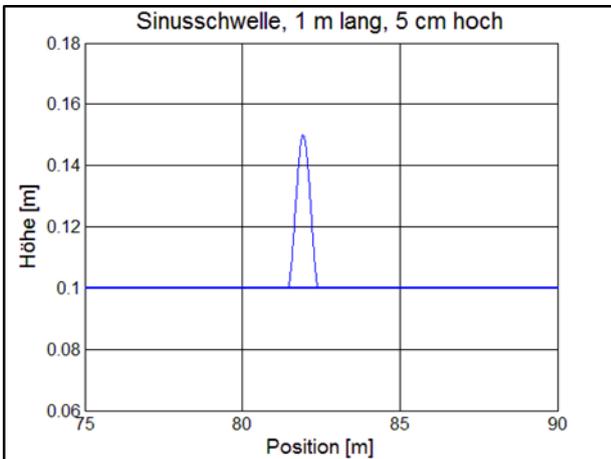
Das Gegenteil ist der Fall, wenn die Wippen um 2 mm eingezogen werden, was an Abbildung 169 demonstriert werden soll. Hier erfolgt der Abtrag, bis auf wenige Ausnahmen, praktisch auf der ganzen Bearbeitungslänge. Aufgrund der großen Unebenheiten würden sich die Frässcheiben an einigen Stellen bis in eine Tiefe von 3 cm eingraben, wenn man mit konstanter Einstellung fahren und keine Korrekturen vornehmen würde.



**Abbildung 169:** Gesamtergebnis für um 2 mm „eingezogene“ BumpCutting (BC)-Wippe

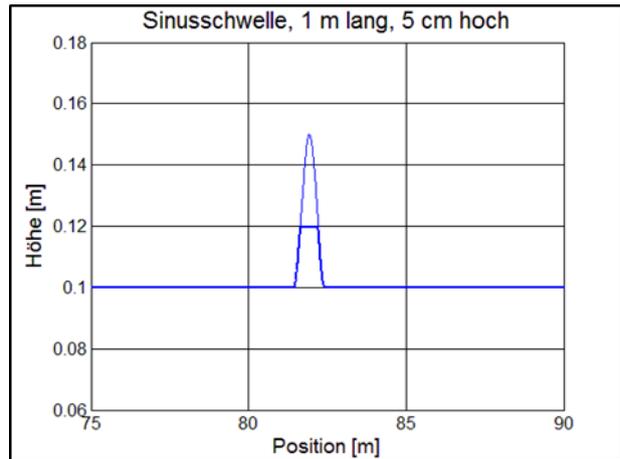
Aus den Untersuchungen wird deutlich, welche großen Auswirkungen durch vergleichsweise kleine Einstellungsänderungen (im Millimeterbereich) ausgelöst werden. Die Maschine reagiert also sehr sensibel auf entsprechende Steuerbefehle.

Um die Ergebnisse einer ersten Plausibilitätsuntersuchung zu unterziehen, sind in den kommenden Abbildungen Überfahrten über eine 1 Meter lange und 5 cm hohe Schwelle dargestellt, die sich auf einer vollkommen ebenen Fläche befindet.



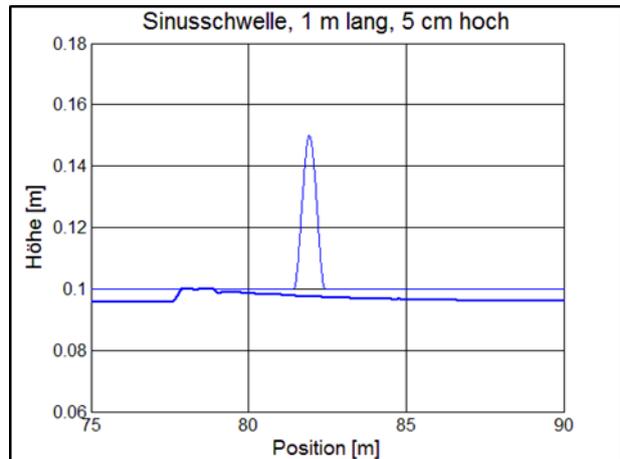
**Abbildung 170:** Überfahrt über ein 1 m langes und 5 cm hohes Einzelhindernis (Einzug BC-Wippe: 0 mm)

Abbildung 170 zeigt das Simulationsergebnis für den Fall, dass der Einzug der BC-Wippe 0 mm beträgt. Das ist der Fall, wenn sich die Aufstandspunkte der BC-Wippe in einer Ebene mit den Aufstandspunkten der Antriebsräder und der Unterkante der Grindingwelle befinden. In diesem Fall wird das Hindernis vollkommen abgefräst (dicke blaue Linie).



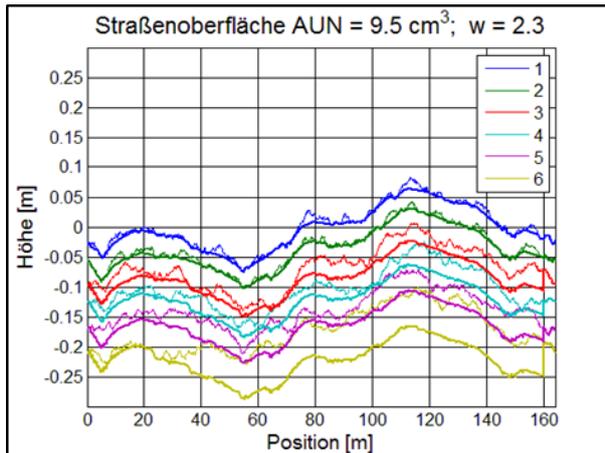
**Abbildung 171:** Überfahrt über ein 1 m langes und 5 cm hohes Einzelhindernis (Einzug BC-Wippe: -20 mm)

Abbildung 171 zeigt das Ergebnis für den Fall, dass die Wippe um 2 cm aus- bzw. heruntergefahren ist (Einzug BC-Wippe = -20 mm). In diesem Fall hebt sich die Grindingwelle um ca. 20 mm über die ebene Fahrbahn an und fährt in dieser Höhe über die 5 cm hohe Schwelle. Im Ergebnis wird diese in der Höhe um 3 cm reduziert. Ein „Stumpf“ mit einer Höhe von ca. 2 cm bleibt stehen (dicke blaue Linie).



**Abbildung 172:** Überfahrt über ein 1 m langes und 5 cm hohes Einzelhindernis (Einzug BC-Wippe: 1 mm)

Abbildung 172 schließlich zeigt das Ergebnis für den Fall, dass die BC-Wippe um 1 mm eingezogen ist. In diesem Fall wird die ebene Fläche um ca. 4.3 mm abgefräst. Ca. 5 m vor der Schwelle hebt sich das Niveau der gegrindeten Fläche allerdings fast auf das ungegrindete Niveau wieder an. Das kommt daher, weil die Vorderräder hier über die Schwelle fahren und die Grindingwelle (aufgrund der großen Höhe der Schwelle) merklich anheben. Im Zuge der Weiterfahrt wird das ursprüngliche Höhenniveau der gegrindeten Fläche (-4.3 mm) dann wieder erreicht.



**Abbildung 173:** Simulationsergebnis für das „Kopier“-Grinding (Einzug BC-Wippe: 0 mm)

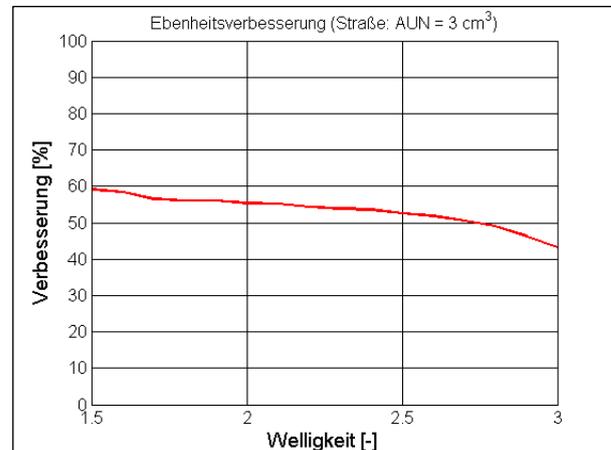
Zum Schluss dieser Plausibilitätsuntersuchungen sei noch angemerkt, dass mit dem Simulationsmodell auch das reine „Kopier“-Grinding simuliert werden kann. Das soll anhand von Abbildung 173 am Beispiel der bereits mehrfach verwendeten Straße schlechter Ebenheit verdeutlicht werden. Bei dieser Simulation ist die 1. Bahn zunächst mit der Einstellung „Einzug BC-Wippe = 0 mm“ gefahren worden. Danach wurde die rechte BC-Wippe von der linken BC-Wippe gesteuert, und zwar so, dass beide Wippen zeitgleich immer die gleichen Vertikalbewegungen ausgeführt haben.

Als Fazit aus den dargestellten Untersuchungen kann festgehalten werden, dass ein räumliches Simulationsmodell der Grindingmaschine erstellt worden ist, das die Arbeitsweise im BumpCutting-Modus realistisch nachbilden kann. Damit liegt nun ein Instrument vor, mit dem unterschiedliche Konzepte der Ebenheitskontrolle untersucht und ein geeignetes Konzept zur Erfassung und Steuerung der Ebenheit herausgearbeitet werden kann.

### 7.2.2 „Ist“-Performance der Grindingmaschine ohne Ebenheitssteuerung bzw. -regelung

Unter „Ist“-Performance wird in diesem Falle verstanden, welche ebenheitsverbessernde Wirkung die Grindingmaschine im BumpCutting-Mode bereits jetzt (also ohne Ebenheitsregelung bzw. Steuerung) besitzt. Dazu wurde ein Programm geschrieben, mit dessen Hilfe verschiedene Unebenheitsformen generiert werden können: sinusförmige Wellen unterschiedlicher Wellenlänge und Wellenhöhe, sinusförmige Einzelhindernisse unterschiedlicher Länge und Höhe sowie regellose Unebenheiten unterschiedlicher Ausprägung und Wellenlängencharakteristik. Dieses Programm wurde auch zur Erzeugung der in Kapitel 7.2.1 gezeigten Unebenheiten eingesetzt.

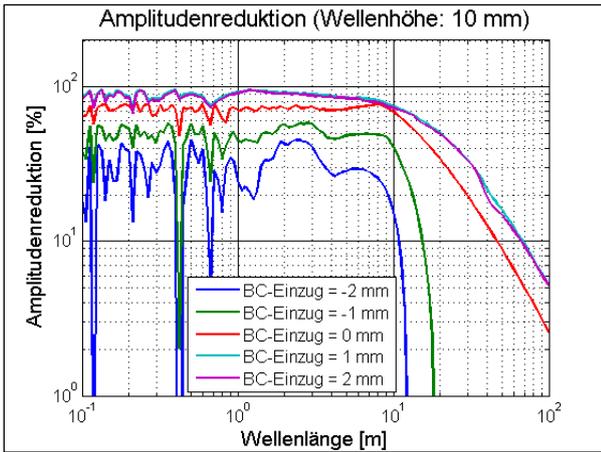
Ferner wurde ein Programm entwickelt, mit dessen Hilfe verschiedene Ebenheitsindikatoren berechnet werden können. Dieses ist nötig, um die von der Grindingmaschine erzeugten Ebenheiten bewerten und einen Vorher/Nachher-Vergleich anstellen zu können.



**Abbildung 174:** Durchschnittliche Verbesserung der Ebenheit im Mittel aller berechneten Indizes bei regellosen Unebenheiten (Einzug BC-Wippe: 0 mm)

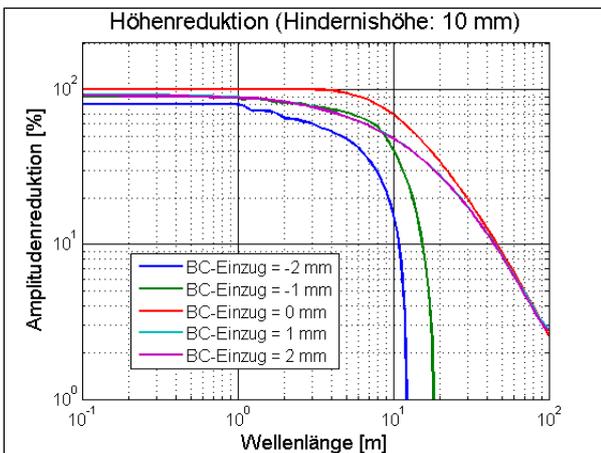
Folgende Indizes wurden berechnet: Allgemeines Unebenheitsmaß (AUN), Bewertetes Längsprofil (BLP), Längsebenheitswirkindex (LWI), Abweichungen unter der 4-m-Latte (PGR) und International Roughness Index (IRI).

Abbildung 174 zeigt am Beispiel von Straßen mittelmäßiger Ebenheit ( $AUN = 3 \text{ cm}^3$ ), um wieviel Prozent die Ebenheit durch das BumpCutting-Verfahren im Mittel aller genannten Indikatoren verbessert werden kann. Das Ergebnis hängt von der Wellenlängencharakteristik (Welligkeit) der Straße ab und besagt, dass die Ebenheit von Straßen durch die Arbeitsmaschine um 45 bis 60% verbessert werden kann. Herrschen kurze Wellen vor (Welligkeit klein), kann eine Verbesserung um 60% erreicht werden. Herrschen lange Wellen vor (Welligkeit groß), kann eine Verbesserung um etwa 50% erreicht werden. Weitergehende Untersuchungen haben gezeigt, dass diese prozentualen Verbesserungen unabhängig von der Ausgangsebenheit der Straße sind, d.h. unabhängig davon, ob es sich um eine vergleichsweise ebene oder unebene Fahrbahn handelt. Die Kurve in Abbildung 174 ist also allgemeingültig.



**Abbildung 175:** Durchschnittliche Reduzierung der Amplituden bei sinusförmigen, periodischen Unebenheiten

Abbildung 175 zeigt die ebenheitsverbessernde Wirkung der Grindingmaschine im BumpCutting-Mode für sinusförmige, periodische Unebenheiten im Wellenlängenbereich von 0,1 bis 100 Meter. Der Simulation war jeweils eine Wellenhöhe von 10 mm zugrunde gelegt. Für den Fall BC-Wippen-Einzug = 0 mm (rote Linie) kann eine Amplitudenreduktion von 70% für Wellenlängen bis zu 8 m erreicht werden!

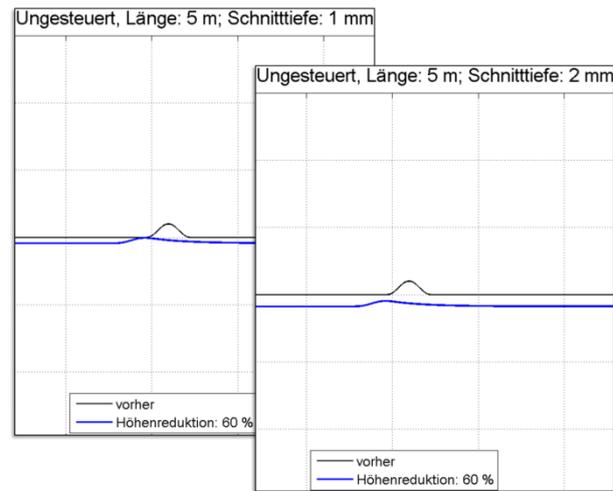


**Abbildung 176:** Durchschnittliche Höhenreduzierung bei sinusförmigen Einzelhindernissen

Abbildung 176 zeigt die ebenheitsverbessernde Wirkung der Grindingmaschine im BumpCutting-Mode für sinusförmige, Einzelunebenheiten im Längenbereich von 0,1 bis 100 Metern. Auch hier war der Simulation jeweils eine Hindernishöhe von 10 mm zugrunde gelegt. Für den Fall BC-Wippen-Einzug = 0 mm (rote Linie) kann eine Amplitudenreduktion von 100% für Unebenheiten bis 4 Metern Länge und 70% für Unebenheiten bis 8 Metern Länge erreicht werden!

Auf den ersten Blick mag es erstaunen, dass die Kurven für „BC-Einzug 1 mm“ und „BC-Einzug

2 mm“ praktisch identisch sind – dass es bei positivem BC-Wippen-Einzug also anscheinend keinen Unterschied macht, wie stark die BC-Wippe eingezogen wird. Dasselbe ist auch in Abbildung 175 zu beobachten. Erläuternd hierzu zeigt Abbildung 177 das Beispiel für ein sinusförmiges Einzelhindernis, das einmal mit „BC-Einzug 1 mm“ und einmal mit „BC-Einzug 2 mm“ überfahren wird. Man erkennt, dass trotz unterschiedlicher Schnitttiefen (bedingt durch unterschiedliche BC-Einzüge) das resultierende „Schnittbild“ praktisch identisch ist - nur um einen konstanten Betrag gegen einander versetzt. Die Höhenreduzierung liegt in diesem Beispiel für beide Fälle bei 60% (Abbildung). Das gleiche Phänomen trifft bei anderen Unebenheiten genauso zu. Das liegt daran, dass das Schnittbild der ungesteuerten Maschine entscheidend von der Unebenheitsform und -höhe abhängt. Sobald die Vorderräder über die Unebenheit fahren, hebt sich bzw. senkt sich die Grindingwelle um einen bestimmten Betrag. Dieser Betrag ist geometrisch bedingt fast ausschließlich von der Höhe der Unebenheit und praktisch gar nicht von der momentanen Schnitttiefe abhängig. Das gilt wohlgerneht nur für BC-Einzüge größer als Null.

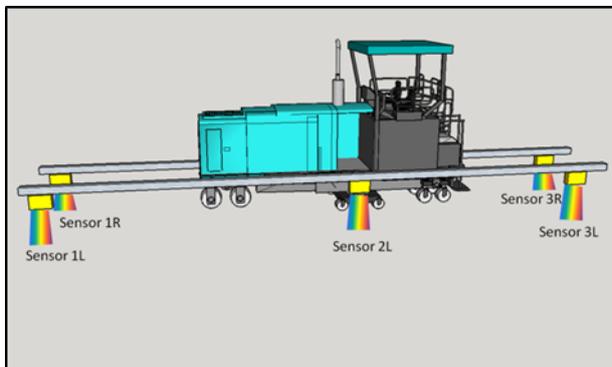


**Abbildung 177:** Profilbild für „BC-Einzug 1 mm“ und „BC-Einzug 2 mm“ am Beispiel eines 5 m langen und 1 cm hohen sinusförmigen Einzelhindernisses

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Grindingmaschine bereits im unregulierten Modus ein enormes Potential zur Ebenheitsverbesserung mitbringt. Alle diese Ergebnisse gelten für die einfache Überfahrt. Bei mehrmaliger Überfahrt potenziert sich diese Wirkung im Prinzip. Bei zweimaliger Überfahrt eines 8 m langen Einzelhindernisses etwa verbleiben von der ursprünglichen Höhe nur noch  $30\%^2 = 9\%$ ; das heißt, dass die Höhe in diesem Fall um 91% reduziert werden könnte.

### 7.2.3 Konzeption des Messverfahrens zur Anwendung an Grindingmaschinen

Da eine messtechnische Lösung unter Verwendung von Totalstationen sowie Rotationslasern seitens des Maschinenbetreibers nicht erwünscht war, kam nur ein Messkonzept in Frage, das die Arbeitsmaschine selbst als Referenz für die Ebenheitsmessung nutzt. Eine Vergrößerung des Wellenlängenbereiches, den die Grindingmaschine bearbeiten kann, kann nur durch eine Verlängerung der Referenzlänge der Maschine erreicht werden. Das wiederum kann durch einen mit der Maschine starr verbundenen, in sich starren Messbalken erreicht werden, der nach vorn und hinten aus der Maschine herauskragen kann und mit Sensoren bestückt ist, die den Abstand der Straßenoberfläche zum Messbalken bestimmen.



**Abbildung 178:** Darstellung des Messkonzeptes zur Anwendung an der Grindingmaschine

Das Messkonzept (Abbildung 178) sieht so aus, dass auf jeder Seite der Grindingmaschine ein Messbalken befestigt wird, der mit jeweils drei Abstandssensoren bestückt ist - einer vor der Arbeitsmaschine, einer an der Grindingwelle und einer hinter der Arbeitsmaschine. Die von den Sensoren gemessenen 3 vertikalen Abstände zur Straßenoberfläche werden zu einem mittleren Referenzniveau verrechnet, das als Eingangsgröße für die Steuerung der Wellenhöhe verwendet wird. Die Steuerung kann über die BC-Wippen erfolgen, wird aber am besten direkt an der Welle über die Grinding-Wippen vorgenommen. Die Wippen werden so gesteuert, dass die Unterseite der Welle sich an diesem Referenzniveau orientiert. Die Steuerung bzw. Regelung erfolgt für die linke und rechte Maschinenseite getrennt.

Nachdem die erste Bahn fertiggestellt ist, wird nur noch die rechte Seite der Maschine über 3 Sensoren geregelt. Die linke Seite benötigt nur noch den mittleren (sich an der Welle befindenden) Sensor, über den die Differenz zwischen der Straßenoberfläche und der Unterseite der Grindingwelle erfasst wird. Diese Differenz muss immer „Null“ sein, um einen nahtlosen Anschluss zur vorherigen Bahn zu

gewährleisten. Das Signal des mittleren Sensors findet Eingang in die Steuerung bzw. Regelung der linken BC-Wippe oder bevorzugterweise der linken Grindingwippe (Abbildung 163).

### 7.2.4 Auswahl und Beschaffung geeigneter Komponenten der Messtechnik

Für die Abstandsmessung zwischen der Maschine als Referenz und der Straßenoberfläche kommen im Prinzip nur drei verschiedene Methoden in Frage:

- Mechanische Abtastung,
- Abtastung über Lasermesstechnik und
- Abtastung über Ultraschallmesstechnik.

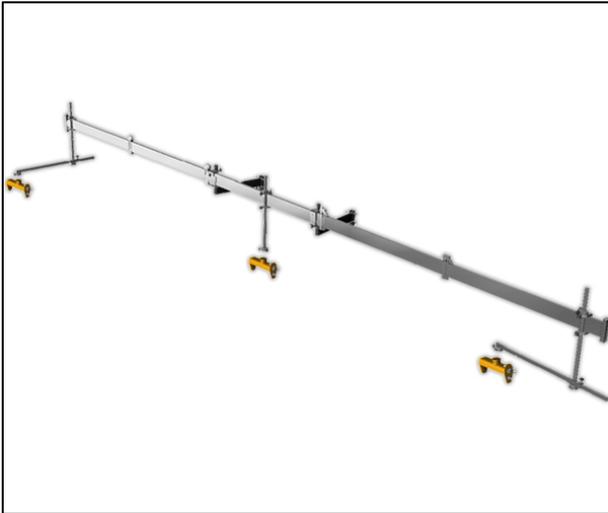
Die mechanische Abtastung müsste über Abtasträder erfolgen. Wartungsfreundlicher, da über keinerlei mechanische Teile verfügend, sind berührungslos arbeitende Sensoren. In der Baubranche haben sich Ultraschallsensoren für die Messung des Abstandes zwischen einer Arbeitsmaschine und der zu bearbeitenden Fläche (der Straße) durchgesetzt. Sie erreichen zwar prinzipbedingt nicht die Genauigkeit von Laserabstandssensoren, sind dafür aber unempfindlicher gegenüber Vibrationen, Schmutz und Staub. Da insbesondere der Grinding- bzw. BumpCutting-Prozess eine sehr raue Arbeitsumgebung darstellt, ist die Ultraschallmesstechnik vorzuziehen. Für sie gibt es am Markt bereits bewährte Lösungen, die für diese Messaufgabe in Frage kommen.

Für die Applikation an die Grindingmaschine wird das System „Big Sonic-Ski Modular“<sup>®</sup> der Firma MOBA-Mobile Automation [MOBA 1] vorgeschlagen (Abbildung 179). Es entspricht in seiner Funktionsweise dem in Abbildung 178 bereits dargestellten Messkonzept bestehend aus einem starren Messbalken mit jeweils 3 Ultraschall-Abstandssensoren „Sonic-Ski“<sup>®</sup> (Abbildung 180).

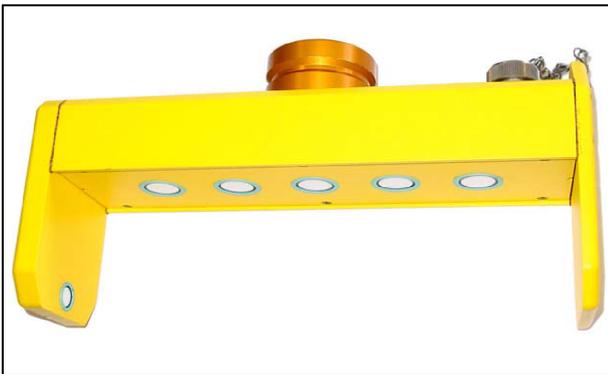
Das besondere an diesen Abstandssensoren ist, dass sie aus mehreren Ultraschallschwingern (Einzelsensoren) bestehen: fünf Sensoren ermitteln die Distanz und einer dient zur Temperaturkompensation. Bei der Abtastung der Straßenoberfläche werden aus fünf gleichzeitigen Ultraschallmessungen zwei mit der größten Abweichung in positiver und negativer Richtung zum ursprünglichen Abgleich aussondert. Die übrigen drei werden zur Bildung eines Mittelwertes herangezogen. Dadurch werden Ungenauigkeiten oder Hindernisse direkt von der Mittelwertberechnung ausgeschlossen [MOBA 2].

Durch die zweifache Mittelung der Signale - einmal in jedem Sensor selbst und einmal über jeweils drei dieser Sensoren auf jeder Seite der Arbeitsma-

schine - kann das Referenzniveau der Straße zuverlässig und mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.



**Abbildung 179:** System „Big Sonic Ski“ Modular® [MOBA 1]



**Abbildung 180:** Sensor Sonic-Ski® [MOBA 2]

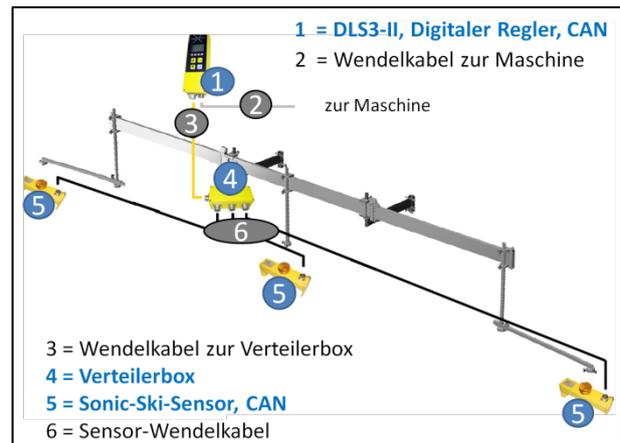
Das Gesamtsystem besteht aus 2 Systemen, dem „Big Sonic-Ski Modular“ und einem Nivellierungssystem „MOBA-matic“. Die MOBA-matic (Abbildung 181) ist ein digitales Höhen- und Neigungsregelsystem. Sie integriert Controller und eine intuitive Mensch-Maschine-Schnittstelle in einem Gehäuse und ermöglicht die Einbindung einer großen Zahl verschiedenartiger Sensoren zur Höhen- und Neigungsbestimmung [MOBA 3]. Die MOBA-matic findet bereits weite Verbreitung auf Asphaltfräsen.



**Abbildung 181:** Nivelliersystem MOBA-matic® [MOBA 3]

### 7.2.5 Schnittstellenanalyse für die Verwendung der Ebenheitsinformation im Grindingprozess

Das vorgeschlagene Nivelliersystem MOBA-matic® verfügt über eine automatische Sensorerkennung und ist an jede Hydraulik adaptierbar. Sie basiert auf der CAN-Technologie mit einheitlichen Kabelverbindungen. Der Controller besitzt eine einfache 4-Tasten-Bedienung, über die eine individuelle Parametereinstellung erfolgen kann. Da die Ansteuerung der Grindingmaschine bislang allerdings über Stellmotoren erfolgte, musste die Schnittstelle zwischen der MOBA-matic® und der Grindingmaschine neu geschaffen werden. Dazu hat sich der Hersteller der Maschine mit dem Hersteller MOBA zusammengesetzt. Abbildung 182 stellt den Messaufbau mit allen benötigten Einzelkomponenten noch einmal dar: das komplette System besteht aus dem Regler (1), den Sensoren (5), einer Verteilerbox (4) sowie Kabelverbindungen vom Regler zur Maschine (2), vom Regler zur Verteilerbox(3) und schließlich von der Verteilerbox zu den Sensoren (5).



**Abbildung 182:** Messaufbau mit Einzelkomponenten

### 7.2.6 Simulation eines geregelten BumpCutting-Prozesses

Zur optimalen Lage der Abstandssensoren an der Grindingmaschine sowie zur Untersuchung des Steuerungskonzeptes wird der BumpCutting-Prozess für den gesteuerten Fall mittels des unter Kapitel 7.2.1 vorgestellten mathematischen Modells nachgebildet. Dazu wurde die Abtastung der Fahrbahnoberfläche durch Sensoren vor und hinter der Maschine, sowie an der Grindingwelle simuliert. Die durch die virtuellen Sensoren „gemessenen“ Abstände wurden zur Steuerung der Grindingwelle über die rechte Grinding-Wippe verwendet (Abbildung 163). Der höhengleiche Anschluss an die Vorgängerbahn erfolgt über die linke Grindingwippe. Zu ihrer Steuerung wird nur das Abstandssignal des

mittleren Sensors benötigt, der sich direkt an der Grindingwippe befindet. Die erste Bahn wird allerdings beidseitig gesteuert gefahren. Während des gesteuerten Betriebes befinden sich die beiden vorderen sowie der rechte mittlere Sensor über der noch unbearbeiteten Fläche und die beiden hinteren sowie der linke mittlere Sensor auf der schon bearbeiteten Fläche. Dazu werden die hinteren Sensoren etwas zur Maschinenmitte hin eingezogen. Der linke mittlere Sensor liegt allerdings nur dann auf der schon bearbeiteten Fläche, wenn in Bearbeitungsrichtung gesehen auf der linken Seite schon eine Bahn vorgelegt ist. Bei der ersten Bahn ist dies nicht der Fall. Da befindet sich auch der mittlere linke Sensor noch über der unbearbeiteten Fläche.

Die Position der Sensoren ist in Abbildung 203 dargestellt. Sie befinden sich in einer gedachten Ebene, die durch die Antriebsräder, die Grindingwelle und die BC-Wippen in Nullstellung aufgespannt wird. Praktisch gesehen entspricht diese Position einer „Nullung“ der Sensoren in der Ausgangsposition der Maschine, wenn die BC-Wippen so eingezogen sind, dass die Grindingwelle gerade auf der Straßenoberfläche aufliegt (Abbildung 184: Grundeinstellung der Maschine).

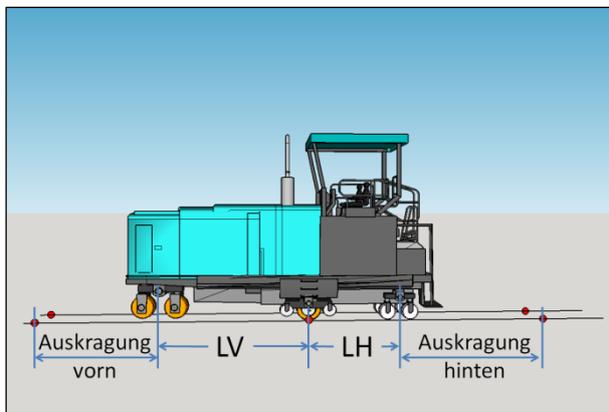


Abbildung 183: Position der Sensoren

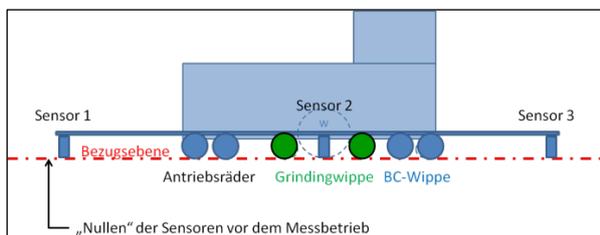


Abbildung 184: Grundeinstellung der Maschine

Im weiteren Verlauf des Berichtes wird die vordere Sensorposition mit „Auskrägung vorn“ beschrieben. Sie bezeichnet den Abstand zwischen den Antriebsrädern und dem Sensor. Die hintere Sensorposition

wird mit „Auskrägung hinten“ beschrieben und bezeichnet den Abstand zwischen Sensor und BC-Wippe (Abbildung 183).

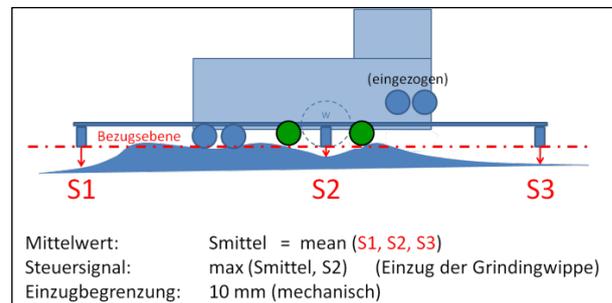


Abbildung 185: Steuerungskonzept

Für die Steuerung der Maschine wurden verschiedene Konzepte untersucht. Das Steuerungskonzept, das die beste Ebenheitsverbesserung erbrachte, ist in Abbildung 185 dargestellt. Die Skizze stellt die Maschine im Grinding-Mode dar: die BC-Wippen sind eingezogen und die Ebenheits-Steuerung geschieht über die Grinding-Wippe (grüne Räder), die – je nach Steuersignal – hoch oder runter gefahren wird.

Für das Steuersignal wird zunächst an jeder Maschinenposition der Mittelwert aus allen drei Sensorsignalen gebildet. Steuersignal an dieser Maschinenposition ist dann das Maximum aus dem Mittelwert und dem Sensorwert an der Grindingwelle (Abbildung 185):

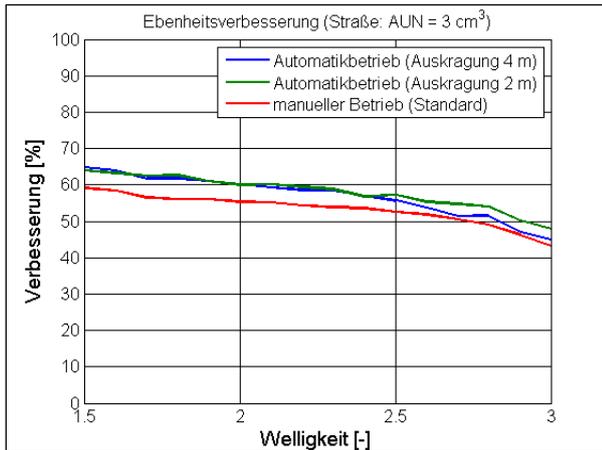
$$\text{Steuersignal} = \max(S_{\text{mittel}}, S2)$$

Um den Wert des Steuersignales wird die Grinding-Wippe aus der Grundstellung (Abbildung 184) entweder hochgefahren (wenn positiv) oder aber heruntergefahren (wenn negativ).

Um einen zu tiefen Einschnitt in das Material zu verhindern, wird der Abtrag im Simulationsmodell auf 10 mm begrenzt. Das kann an der realen Maschine durch eine mechanische Begrenzung des Grinding-Wippeneinzugs auf maximal 10 mm von der Grundstellung sichergestellt werden.

## 7.2.7 Vergleich zwischen geregelterm und ungeregelterm BumpCutting

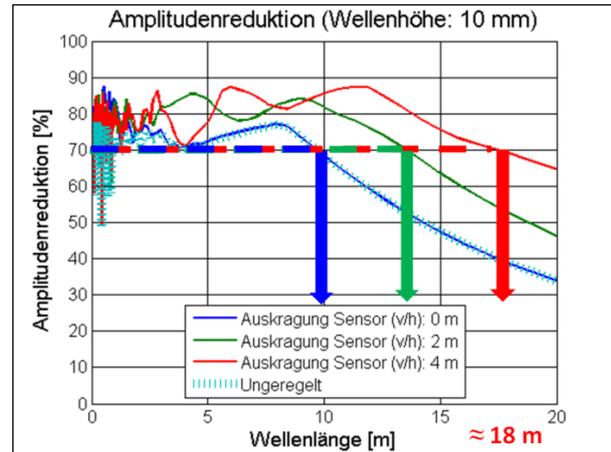
Im Folgenden werden die Simulations-Ergebnisse für den gesteuerten und ungesteuerten BumpCutting-Betrieb einander gegenübergestellt. Untersucht wurde – wie schon für den ungesteuerten Fall in Kap. 7.2.2 dargestellt – die Ebenheitsverbesserung bei regellosen Straßenoberflächen (Allgemeinunebenheit), wellenförmigen periodischen Unebenheiten und wellenförmigen Einzelunebenheiten.



**Abbildung 186:** Durchschnittliche Verbesserung der Ebenheit im Mittel aller berechneten Indizes bei regellosen Unebenheiten (Einzug BC-Wippe: 0 mm); Vergleich zwischen gesteuertem und ungesteuertem Betrieb.

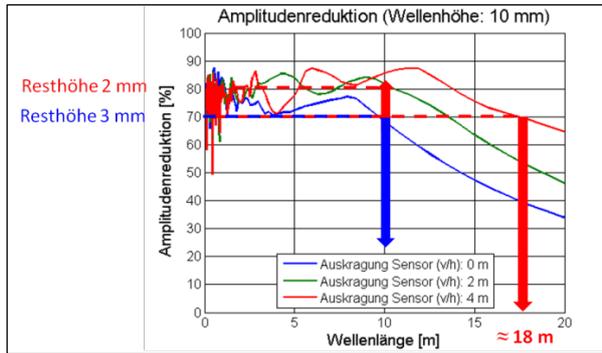
Abbildung 186 stellt das Ergebnis im Falle der regellosen Unebenheiten dar. Die mögliche Verbesserung hängt von der Straßencharakteristik ab. Dominieren kurze Wellen (Welligkeit klein), sind Verbesserungen von bis zu 60% möglich; dominieren lange Wellen die Ebenheit (Welligkeit groß), sind Verbesserungen um 50% möglich. Die rote Kurve in Abbildung 186 stellt den ungesteuerten Fall dar, die blaue Kurve den gesteuerten mit einer Auskragung der Sensoren von 4 Metern und die grüne Kurve den gesteuerten mit einer Auskragung von 2 Metern nach vorn und hinten. Für die Ebenheitscharakterisierung wurde ein Mix aus fünf Ebenheitsindikatoren gewählt (Mittelwert der fünf auf ihre Abnahmewerte referenzierten Indikatoren): Allgemeines Unebenheitsmaß (AUN), Bewertetes Längsprofil (BLP), Längsebenheitswirkindex (LWI), Abweichungen unter der 4-m-Latte (PGR) und International Roughness Index (IRI).

Befinden sich keine Periodizitäten oder Einzelhindernisse in der Straße – also bei Vorliegen einer rein regellosen Ebenheitscharakteristik – sind nach Abbildung 186 im Mix der gängigen Ebenheitsbewertungsverfahren keine großen Verbesserungen des gesteuerten gegenüber dem ungesteuerten Betrieb zu erwarten (eine Differenz von etwa 0%). Sind allerdings Periodizitäten und/oder Einzelhindernisse in der Fahrbahn, die beseitigt werden müssen, weist der gesteuerte Betrieb größere Vorteile auf, wie aus den nachfolgenden Abbildungen hervorgeht.

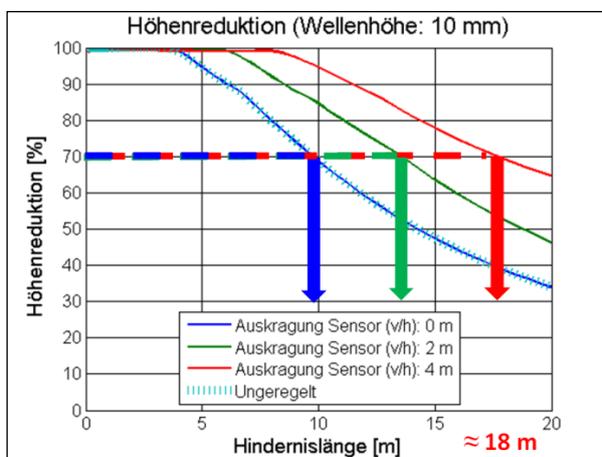


**Abbildung 187:** Durchschnittliche Reduzierung der Amplituden bei sinusförmigen, periodischen Unebenheiten; Vergleich zwischen gesteuertem und ungesteuertem Betrieb

Abbildung 187 zeigt die durchschnittliche Reduzierung der Amplituden bei sinusförmigen, periodischen Unebenheiten. Für den ungesteuerten, also manuellen Betrieb gilt die hellblaue, gestrichelte Linie. Sie besagt, dass periodische, wellenartige Unebenheiten bis zu einer Wellenlänge von etwa 10 m um 70% in der Amplitude durch das BumpCutting-Verfahren reduziert werden können. In etwa das gleiche Ergebnis liefert das Gerät im gesteuerten Modus, wenn die Sensoren direkt an der Antriebswippe, der Grindingwelle und der BC-Wippe angebracht werden (Auskragung = 0 m; dunkelblaue Kurve). Das ist einsichtig, weil eine deutliche Verbesserung nur durch eine künstliche Verlängerung der Bezugsbasis der Maschine erreicht werden kann. Lässt man die Sensoren um 2 m nach vorn und hinten aus der Maschine herauskragen, kann man eine künstliche Verlängerung der Bezugsbasis von 4 m erreichen. Als Folge verbreitert sich der Wellenlängenbereich von 10 m auf etwa 14 m (siehe grüne Kurve). Bei einer Auskragung von 4 m nach vorn und hinten erweitert sich der Wellenlängenbereich sogar von 10 m auf etwa 18 m. Das ist mehr als eine Verdoppelung. Doch nicht nur eine Erweiterung des Wellenlängenbereiches ist zu verzeichnen, sondern auch eine Verbesserung der Amplitudenreduktion, wie man aus Abbildung 188 entnehmen kann: die ungesteuerte Maschine würde die Amplitude von anfangs 10 mm auf 3 mm reduzieren – und das in einem Wellenlängenbereich bis 10 m (blaue Kurve). Die gesteuerte Maschine hingegen würde im selben Wellenlängenbereich die Amplituden sogar von 10 mm auf 2 mm reduzieren (s. grüne und rote Kurve).



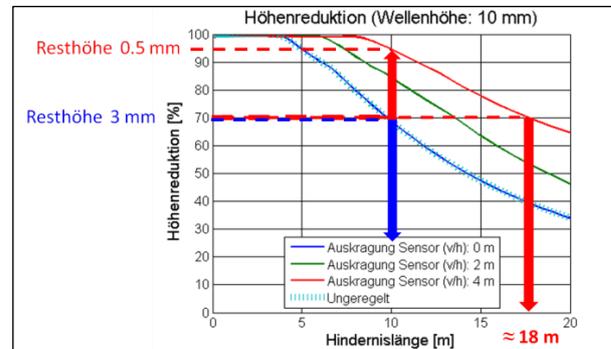
**Abbildung 188:** Vergleich von gesteuertem und ungesteuertem Betrieb; Verbesserung im Wellenlängen- und Amplitudenbereich bei wellenförmigen periodischen Unebenheiten



**Abbildung 189:** Durchschnittliche Reduzierung der Amplituden bei sinusförmigen Einzelunebenheiten; Vergleich zwischen gesteuertem und ungesteuertem Betrieb

Abbildung 189 zeigt die durchschnittliche Reduzierung der Höhen von sinusförmigen Einzelunebenheiten. Für den ungesteuerten, also manuellen Betrieb gilt die hellblaue, gestrichelte Linie. Sie besagt, dass wellenartige Einzelunebenheiten bis zu einer Länge von etwa 10 m um 70% in der Höhe durch das BumpCutting-Verfahren reduziert werden können. Das gleiche Ergebnis liefert das Gerät im gesteuerten Modus, wenn die Sensoren direkt an der Antriebswippe, der Grindingwelle und der BC-Wippe angebracht werden (Auskrägung = 0 m; dunkelblaue Kurve). Wie schon anhand der periodischen Unebenheiten ausgeführt, erweitert sich der bearbeitbare Hindernislängenbereich mit der Verwendung der Steuerung; und zwar in einem Maße, das durch die Auskrägung der Sensoren nach vorn und hinten vorgegeben ist. Das bedeutet bei einer Auskrägung um je 2 m eine Erweiterung auf 14 m und bei einer Auskrägung von je 4 m eine Erweiterung auf 18 m. Neben einer Erweiterung des Hindernislängenbereiches ergibt sich auch eine Verbesserung der Höhenreduktion, wie man aus Abbildung 190 entnehmen kann: die ungesteuerte Maschine würde die Höhe von anfangs 10 mm auf

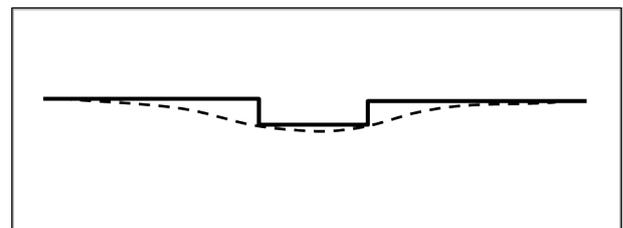
3 mm reduzieren – und das in einem Wellenlängenbereich bis 10 m (blaue Kurve). Die gesteuerte Maschine hingegen würde im selben Wellenlängenbereich die Amplituden sogar von 10 mm auf 0.5 mm reduzieren (s. rote Kurve). Das stellt schon eine erhebliche Verbesserung dar.



**Abbildung 190:** Vergleich von gesteuertem und ungesteuertem Betrieb; Verbesserung im Hindernislängen- und -höhenbereich bei wellenförmigen Einzelunebenheiten

## 7.2.8 Anwendung des manuellen Betriebes

Es gibt, zumindest theoretisch, die Sonderform der „Negativunebenheit“. Eine Mulde in einer ansonsten idealen Ebene wäre z.B. eine reine Negativunebenheit. Eine andere reine Negativunebenheit ist in Abbildung 191 gezeigt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in Bereichen offensichtlicher Negativunebenheiten vom automatischen Betrieb in den manuellen Betrieb gewechselt werden sollte, weil die Steuerung auf diese Sonderform nicht ausgelegt ist. Die Simulationsrechnungen haben ergeben, dass, wenn man beispielsweise im Bereich einer 1 cm tiefen Negativunebenheit in den manuellen Betrieb und wieder zurück wechselt (das kann über das Display der MOBA-matic® erfolgen) und man eine konstante Schneidtiefe von 1 mm wählt, sich die Grindingwelle in einer allmählichen Schneidbewegung in die Oberfläche hinein- und wieder hinauszieht, wie in der gestrichelten Kurve in Abbildung 191 dargestellt. Auf diese Weise können Negativunebenheiten adäquat behandelt werden.



**Abbildung 191:** Negativunebenheit (Beispiel)

Es sollte an dieser Stelle noch mal erwähnt werden, dass im Allgemeinen eine Straße natürlich aus beidem - Negativ- und Positivunebenheiten - besteht.

Für solche Formen ist die Steuerung geeignet. Ebenfalls für reine Positivunebenheiten. Die einzige Einschränkung sind die besagten Sonderformen der „reinen“ Negativunebenheit. Nur im Umfeld solcher Stellen sollte der manuelle Betrieb mit einer konstanten Schneidtiefe (z.B. 1 mm) gefahren werden. Dabei spielt die Erfahrung des Bedienpersonals eine entscheidende Rolle.

### 7.2.9 Einfluss der Sensorreferenz

Der Steueralgorithmus der Maschine im Automatikbetrieb benötigt den Mittelwert aus vorderem, mittlerem und hinterem Sensor als Maschinenreferenz, mit der die augenblickliche Lage der Grindingwelle jederzeit verglichen werden kann. Dabei spannen die Sensoren auf beiden Seiten der Maschine eine gedachte Referenzebene auf. Da die Sensoren nicht exakt höhengleich an der Maschine positioniert werden können, werden diese am Anfang des Betriebes durch eine „Nullung“ auf eine gedachte gemeinsame Höhe „Null“ über der Bearbeitungsfläche gebracht. Aber auch durch die „Nullung“ kann keine ideal ebene Referenz hergestellt werden, weil diese dafür auf einer ideal ebenen Fläche stattfinden müsste, die es in der Realität jedoch nicht gibt. Als Folge davon stellt sich immer ein leichtes „Offset“ der Referenz ein, das dafür sorgt, dass in der Realität mehr oder weniger Material abgetragen wird als es mit der „idealen“ Referenz der Fall wäre. Im praktischen Betrieb vor Ort begegnet man dem so, dass man den Anfang und das Ende eines Loses immer noch manuell steuern wird, um einen sauberen Anschluss oder Übergang zu den Bereichen davor und dahinter zu garantieren. Hier spielt die Erfahrung des Bedieners die entscheidende Rolle. Erst wenn sich ein stabiler und visuell einwandfreier Bearbeitungsmodus mit einer gewünschten Schnitttiefe eingestellt hat, wird man im laufenden Betrieb von dem manuellen in den automatischen Betrieb umschalten.

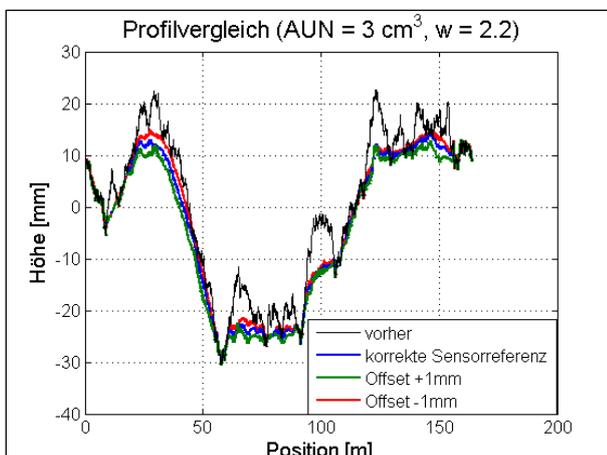


Abbildung 192: Einfluss des Referenzfehlers

Abbildung 192 zeigt beispielhaft den Einfluss einer Referenzabweichung von +1 mm bzw. -1 mm auf das resultierende Längsprofil der Bearbeitungsfläche. Die schwarze Linie stellt das ursprüngliche, unbearbeitete Längsprofil der Straße dar. Die blaue Kurve ist das Profil, wie es sich ergeben würde, wenn man die Maschinenreferenz optimal einstellen könnte. Die grüne Kurve markiert das Bearbeitungsergebnis, wenn die Referenz durch die anfängliche „Nullung“ um 1 mm zu hoch, und die rote, wenn sie um 1 mm zu niedrig fixiert wäre. Die Abbildung macht deutlich, dass es zu unterschiedlichen Abtragsleistungen käme. In dem einen Fall (+1 mm) käme es zu einem erhöhten, in dem anderen (-1 mm) zu einem verringerten Abtrag. Wie bereits erwähnt, wird die „Referenz“ aber am Anfang eines Bearbeitungsschrittes immer noch manuell nachjustiert werden können.

### 7.2.10 Einfluss des Steueralgorithmus

Das eingesetzte Ebenheitskontrollsystem ist „von Haus aus“ mit einem Steueralgorithmus ausgerüstet, der auf die Anwendung an Straßenfertigern ausgelegt ist. Es hat sich im Laufe der Untersuchungen herausgestellt, dass für den Einsatz an der Grindingmaschine ein modifizierter Algorithmus besser geeignet ist. In diesem Abschnitt soll kurz auf den Unterschied zwischen den beiden Algorithmen eingegangen werden.

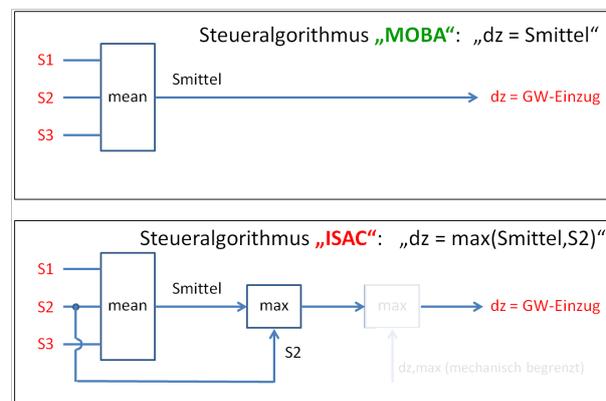


Abbildung 193: Steueralgorithmen

Abbildung 193 zeigt die beiden verwendeten Steueralgorithmen. Mit „MOBA“ ist der standardmäßige Algorithmus bezeichnet, der als Steuersignal den Mittelwert aus dem vorderen, dem mittleren und den hinteren Sensor an die Grindingwelle gibt und die Welle um jeweils diesen Betrag anhebt. Mit „ISAC“ ist der modifizierte Algorithmus bezeichnet, der sich für die Anwendung an der Grindingmaschine als der geeignetere erweist.

Er verwendet als Steuersignal das jeweilige Maximum (auf dem Zahlenstrahl von  $-\infty$  bis  $+\infty$ ) aus dem

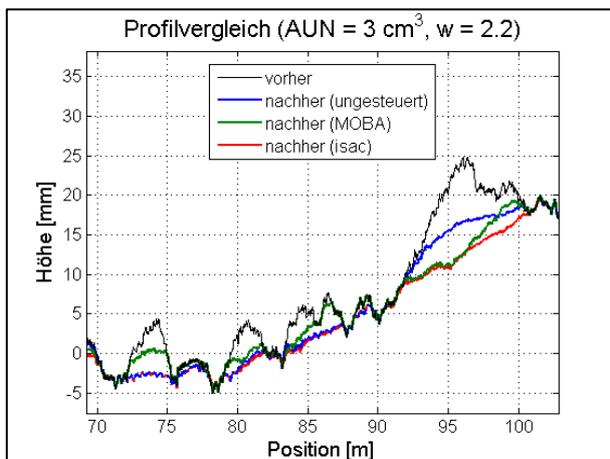
Mittelwert der 3 Sensoren und dem Sensorwert an der Grindingwelle, S2, und sorgt dafür, dass

- der Wellenlängenbereich der bearbeitbaren Unebenheiten auf eine Länge ausgedehnt wird, die nunmehr durch den Abstand zwischen vorderem und hinterem Sensor bestimmt wird,
- die Grindingwelle niemals „in der Luft hängt“, sondern sich immer entweder auf der Fahrbahnoberfläche oder im Material befindet.

Weiterhin ist eine mechanische Begrenzung vorgesehen, die dafür sorgt, dass die Welle sich nicht tiefer in den Belag eingraben kann als ein vorgegebener Grenzwert (z.B. 10 Millimeter).

Dieser „ISAC“-Algorithmus erzeugt insgesamt das ausgewogenere, „harmonischere“ Schnittbild als der „MOBA“-Algorithmus. Stellvertretend aus einer Fülle von Beispielen sei das an dieser Stelle anhand von Abbildung 194 veranschaulicht, die ein 35m langes Längsprofil (schwarze Linie) zeigt. In blau ist das Profil gezeigt, das die ungesteuerte Maschine beim BumpCutting erzeugen würde. In grün ist das Profil zu sehen, das mittels des „MOBA“-Algorithmus und in rot, das mittels des „ISAC“-Algorithmus erzeugt worden ist. Drei Dinge werden an diesem Beispiel deutlich:

- mit „ISAC“-Algorithmus kann die Maschine Wellenberge bearbeiten, die sie ungesteuert nicht „ganz wegbekommt“ (s. Bereich 90-100 m),
- über weite Teile liefert der „ISAC“-Algorithmus das gleiche Ergebnis wie die ungesteuerte Maschine (s. Bereich 70-90 m),
- der „MOBA“-Algorithmus hinterlässt z.T. Unebenheiten, die nicht stehen bleiben dürfen und die selbst die ungesteuerte Maschine besser bearbeiten kann (s. Bereiche 72-75 m und 78-88 m).



**Abbildung 194:** Unterschiede im gegründeten Längsprofil durch unterschiedliche Steueralgorithmen

Dieses Beispiel soll an dieser Stelle genügen, um zu unterstreichen, dass der „ISAC“-Algorithmus das

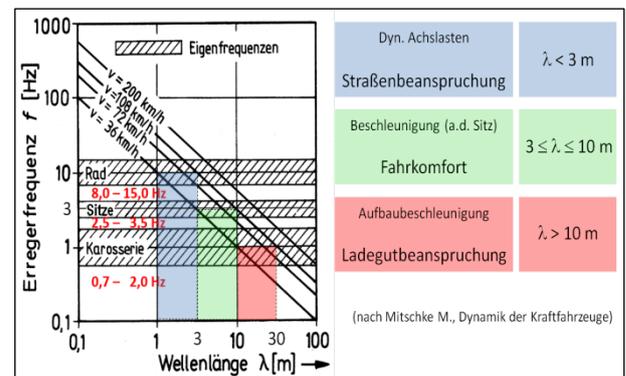
insgesamt ausgewogenere und „harmonischere“ Schnittbild von den beiden Algorithmen liefert.

### 7.2.11 Fazit der Simulationsrechnungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Grindingmaschine im manuellen Betrieb schon eine sehr gute „Performance“ im Hinblick auf die Ebenheitsverbesserung im BumpCutting-Modus aufweist. Im Wellenlängenbereich bis 4 m können die Amplituden bzw. Unebenheitshöhen um 100% und im Bereich bis 10 m um 70% verringert werden. Regellose Unebenheiten werden – je nach Unebenheitscharakteristik – um 45 bis 60% in der Ebenheit verbessert, wenn man fünf gängige Ebenheitsindikatoren (AUN, BLP, LWI, IRI und 4 m-Latte) zu ihrer Bewertung heranzieht.

Ein Ebenheitssteuerungs- bzw. -regelsystem kann die Performance der Maschine noch mal steigern. Mit dem untersuchten Mess- und Steuerungskonzept kann der Wellenlängenbereich der bearbeitbaren Unebenheiten in Bezug auf die obigen Werte jeweils verdoppelt werden. Das stellt eine deutliche Verbesserung dar, wenn man bedenkt, dass sich die Schwingungsanregung durch wellenförmige Unebenheiten im selben Maße reduziert, wie sich die Unebenheitshöhe reduziert.

Abbildung 195 macht den Gewinn, der durch eine Steuerung erzielt werden kann, noch mal auf andere Weise deutlich:



**Abbildung 195:** Eigenfrequenzen und Wellenlängen

Es zeigt die für den Straßenverkehr maßgeblichen Wellenlängen und Fahrzeug-Eigenfrequenzen auf. Für die Straßenbeanspruchung sind beispielsweise die Radeigenfrequenzen entscheidend. Legt man einen Geschwindigkeitsbereich bis etwa 100 km/h zugrunde, so ergibt sich aus der Graphik, dass Wellenlängen bis etwa 3 m die Straßenbeanspruchung bestimmen. Dieser Bereich wird durch die ungesteuerte Grindingmaschine bereits zu 100% abgedeckt. Was nun durch die Hinzunahme der Steuerung noch hinzukommt, ist der ganze Bereich des Fahrkomforts - der Schwingungsbeanspruchung

der Fahrzeuginsassen. Nach Abbildung 195 ist hierfür der Wellenlängenbereich von 3 bis 10 m ausschlaggebend. Die Simulationsergebnisse der gesteuerten Grindingmaschine haben ergeben, dass die Amplituden dieser Wellenlängen sehr wirksam reduziert werden können und damit der Fahrkomfort wesentlich verbessert werden kann.

Auf regellosen Unebenheiten fällt der Unterschied zwischen gesteuertem und manuellem Betrieb, ausgedrückt durch einen Mix aus den o.g. fünf Ebenheitsindikatoren, etwas geringer aus: je nach Straßencharakteristik (langwellig oder kurzwellig) werden Ebenheitsverbesserungen zwischen 50 und 60% gegenüber 45 bis 60% beim ungesteuerten Betrieb erzielt. Das liegt vermutlich daran, dass in dem gewählten „Mix“ aus Ebenheitsindikatoren der Fokus hauptsächlich auf die kürzeren Wellenlängen bis 10 m gelegt wird, in dem sich der Unterschied zwischen gesteuertem und ungesteuertem Modus noch nicht so deutlich bemerkbar macht.

Wie in Abschnitt 7.2.8 beschrieben, sollte im Bereich reiner Negativunebenheiten allerdings manuell gefahren werden, weil die Steuerung für reine Negativunebenheiten nicht ausgelegt ist. Die MOBA-matic® bietet die Möglichkeit, jederzeit im laufenden Betrieb vom Automatik- in den manuellen Betrieb und zurück zu wechseln.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich das Simulationsmodell als eine sehr nützliche Entscheidungshilfe für die Auswahl der Mess- und Steuerungstechnik zur Ebenheitskontrolle erwiesen hat. Es ermöglicht, die Wirkung des ebenheitsverbessernden Nivelliersystems im Voraus einschätzen zu können. Die Ergebnisse sind physikalisch plausibel und decken sich mit den Erwartungen.

### 7.2.12 Applikation der Messtechnik an das Grinding-Arbeitsgerät

Die Ebenheitssteuerung wurde im Winter 2014/2015 an die Grindingmaschine appliziert und erste Funktionsüberprüfungen verliefen positiv: die Befehle der Ebenheitssteuerung werden erfolgreich in entsprechende Bewegungen der Grindingwippe umgesetzt. Die folgenden Bilder vermitteln einen visuellen Eindruck von der Sensorik an der Maschine (Abbildung 196 bis Abbildung 199).



Abbildung 196: Sensoren vorn



Abbildung 197: Sensoren hinten

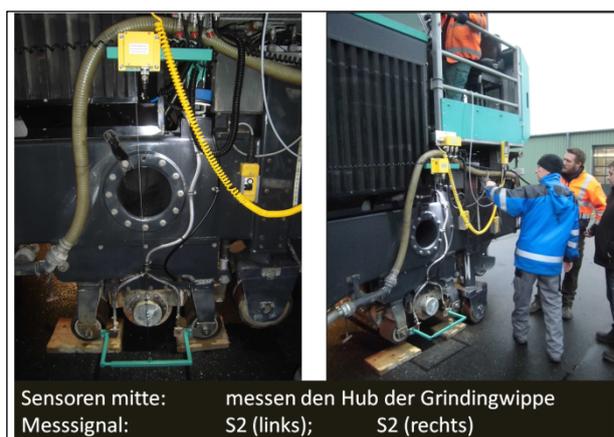


Abbildung 198: Sensoren mitte

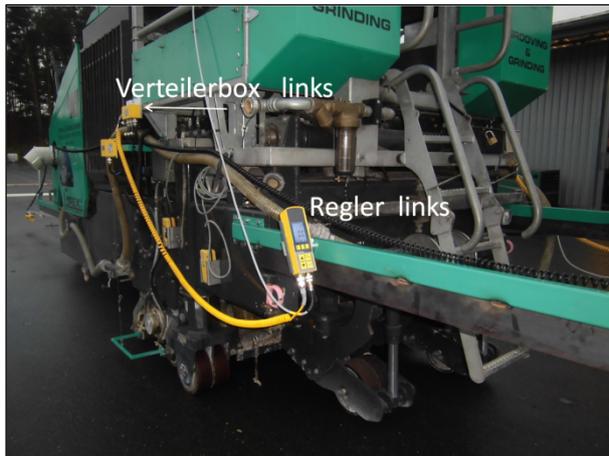


Abbildung 199: Regler und Verteilerbox links

Eine endgültige Aussage über die Wirksamkeit der Ebenheitskontrolle kann allerdings erst durch entsprechende Versuche erfolgen, bei denen die Unebenheiten – insbesondere im mittleren und längeren Wellenlängenbereich – zuvor und nach dem BumpCutting einander gegenübergestellt werden müssen. Diese Untersuchungen übersteigen jedoch den Horizont des Projektes und müssten gesondert erfolgen.

### 7.3 Entwicklung von Mess- und Steuerungssystemen zur Vermeidung von Überlappungsbereichen während des Grindings

#### 7.3.1 Stand der Technik

Nach derzeitigem Stand der Technik erfolgt die Steuerung der Maschine visuell über ein oder mehrere am Gerät angebrachte Zeiger. Die Lage und Geradlinigkeit der Grindingspuren wird durch ein vor der Maschine montiertes Frontvisier (Abbildung 200) generiert. Dieses Frontvisier wird als Abtastung entlang einer aufgetragenen Markierung oder einer vorher ausgeführten Grindingspur über die Lenkbewegungen der Grindingmaschine manuell gesteuert. Dieses erfordert eine ununterbrochen hohe Konzentration des Maschinisten. Kurvenradien, Gefälle oder Neigungswechsel führen zu einer Veränderung der Spurlage während des Betriebes von teilweise mehr als 20 cm. Diese Schwankungen müssen vom Bedienpersonal durch Verstellen des Visiers während des Grindingprozesses ausgeglichen werden. Die Breite der Überlappungsbereiche ist somit von den Streckenverhältnissen, der Qualifikation und nicht zuletzt von der Tagesform der Mitarbeiter abhängig. Überlappungsbereiche von 3 bis 10 cm sind daher gängige Praxis.



Abbildung 200: Visier des GReX 5510



Abbildung 201: Überlappungsbereich

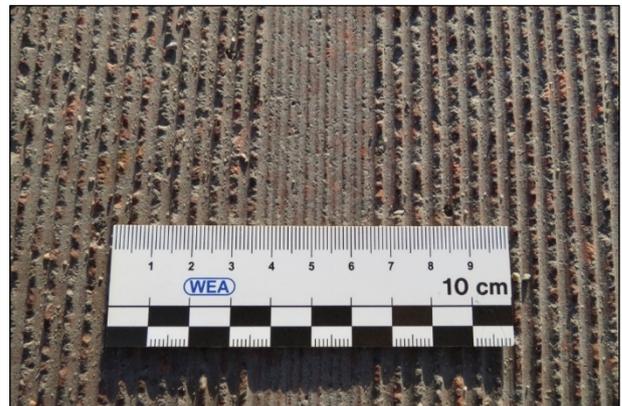


Abbildung 202: Überlappungsbereich im Detail

In den Überlappungsbereichen (Abbildung 201 und Abbildung 202) kommt es zu Texturveränderungen durch Überschneidung, was letztendlich einen Einfluss auf die Gesamtqualität der Fahrbahnoberfläche hat. Ziel ist es daher, einerseits die Anzahl der Überlappungsbereiche durch leistungsstarke Maschinen mit breiten Grindingwellen zu reduzieren und andererseits die Überlappungsbereiche so schmal wie möglich zu halten. Um die Überlappungsbereiche konstant schmal zu halten, ist eine automatisierte Steuerung der Maschine notwendig. Hierfür muss die Schnittkante des Übergangsberei-

ches zwischen vorhergehender und neu herzustellender Grindingbahn durch ein Erkennungssystem festgestellt werden.

### 7.3.2 Entwicklung und Programmierung des Messalgorithmus

Für die Detektion der Schnittkante waren sowohl mechanische als auch optische Systeme denkbar. Beide Systeme wurden hinsichtlich Wirkungsweise und Einsatzmöglichkeiten analysiert und bewertet.

Auf Grund wechselnder Grinding- und Groovingtexturen müssten mechanische Systeme immer wieder durch entsprechende Adapter auf die wechselnden Oberflächen angepasst werden. Diese Anpassung lässt sich bei optischen Systemen durch eine entsprechende Auswertungssoftware so programmieren, dass mit einem System verschiedenste Oberflächen zuverlässig detektiert werden können.

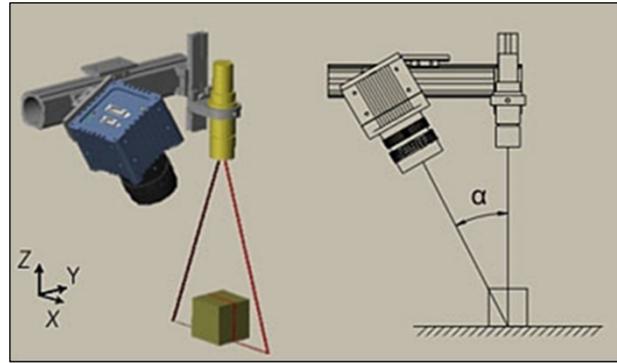
Die Steuerung der Maschine soll daher durch die Detektion der Fräskante mittels Laserschnitttechnik erfolgen. Hier handelt es sich um ein robustes Messverfahren, das unempfindlich gegen Änderungen von Farbe und Helligkeit der Materialoberfläche, z. B. aufgrund von Schmutz oder Öl, ist.

Beim Lichtschnittverfahren wird ein Laserstrahl über eine Linienoptik auf die Oberfläche des zu vermessenden Objektes abgebildet. Mit Hilfe einer Matrix-Kamera wird ein Bild der Laserlinie unter einem Triangulationswinkel  $\alpha$  aufgenommen. Infolge dieser Triangulationsanordnung von Laser und Kamera führt jede Änderung der Oberflächengestalt unterhalb der Laserlinie zu einer definierten Auslenkung der Laserlinie im Kamerabild. In der Abbildung 203 ist eine typische Lichtschnittanordnung aufgezeigt. Für die angegebene Approximation der Höhenauflösung soll die folgende Nomenklatur verwendet werden:

- $dX$  = Auflösung entlang der Laserlinie,
- $dY$  = Auflösung senkrecht zur Laserlinie (in Bewegungsrichtung des Objektes oder der Kamera)
- $dZ$  = Auflösung in der Höhenrichtung.

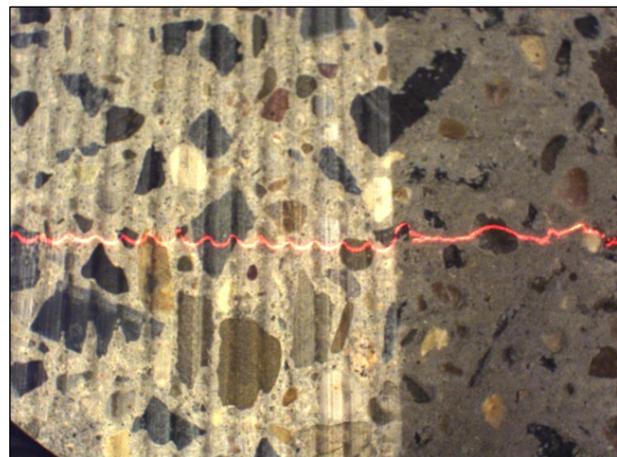
Der Laser steht senkrecht zur Oberfläche und die Kamera ist um den Triangulationswinkel  $\alpha$  gedreht. Die Höhenauflösung kann approximiert werden mit:

$$dZ = dX / \sin\alpha.$$

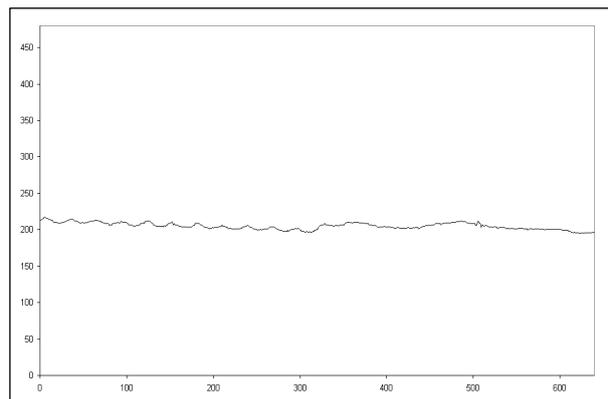


**Abbildung 203:** Messprinzip des Lichtschnittverfahrens (Quelle: Automation Technology)

Abbildung 204 zeigt den Lichtschnitt einer Grindingoberfläche und Abbildung 205 die digitalisierte Form der Aufnahme.



**Abbildung 204:** Lichtschnitt einer Grindingoberfläche



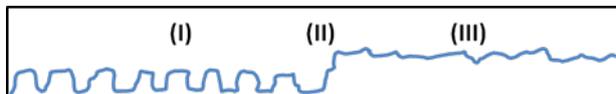
**Abbildung 205:** Digitalisierte Aufnahme eines Lichtschnittes

Abbildung 206 stellt drei zu unterscheidende Bereiche dar:

- (I) die gegrindete Oberfläche, die eine gewisse Regelmäßigkeit, auch wieder Unregelmäßigkeit aufweist,
- (II) die eigentliche Kante, die im Lichtschnittprofil durch einen mehr oder weniger deutlichen

Übergang von einem tieferen mittleren Höhenniveau auf ein höheres mittleres Höhenniveau gekennzeichnet ist und ebenfalls Unregelmäßigkeiten durch Gesteinsausbrüche aufweisen kann, und

- (III) den unbearbeiteten Teil, der ebenfalls durch Unregelmäßigkeiten geprägt ist.



**Abbildung 206:** Lichtschnitt, wie er bei der Überlappungskontrolle auftreten könnte

Diese Unregelmäßigkeiten der drei Strukturbereiche werden in dem Profil der Laserlinie und entsprechend in den Messdaten vorzufinden sein. Damit ist eine unmittelbare Kantendetektion für eine gescannte (gemessene) Profillinie nicht möglich. Aus diesem Grund muss die Fräse eine noch zu bestimmende Strecke gefahren sein, damit entsprechend viele Profillinien-Daten vorliegen. Erst aus diesen Profillinien-Daten kann eine Kantenerkennung softwaremäßig mit Hilfe eines noch zu entwickelnden Algorithmus durchgeführt werden, der diese Schwankungen der Strukturbereiche fortlaufend glättet. Darüber hinaus muss der Algorithmus in einer Profillinie fehlende Messpunkte ausgleichen und Fehlmesspunkte eliminieren, falls welche vorhanden sind.

Das Anfahren an die bereits linksseitig vorhandene Fräskante muss nach wie vor visuell durch den Fräsenfahrer erfolgen, bis der Profillaser-Scanner in seinem Messbereich (Laserlinie) ist. Zunächst sollte nur ein Profillaser-Scanner zum Einsatz kommen, um aus den Messdaten den Kantenerkennungs-Algorithmus zu entwickeln und die Zuverlässigkeit des Laserprofil-Scanners und den Algorithmus zu testen. Die Fräskante könnte auf einem LCD-Monitor in einer Grafik dargestellt werden; z.B. über eine waagerechte Skala, mit Mitte = 0-Wert (entspricht auch Mitte der Laserlinie), nach links negative, nach rechts positive Zahlenwerte. Über die Skala läuft ein Pfeil (Zeiger) der die Kanten-Position anzeigt (wenn möglich mit automatischer Skalierung für den Feinbereich in der Nähe der Mitte (0-Wert)). Die Differenz von der Mitte (0-Wert) wird als Zahlenwert angezeigt. Weiterhin kann eine Anzeige die gemittelte Kantentiefe darstellen. Der Profillaser-Scanner sollte mittig mit seiner Laserlinie zum ersten äußeren Fräsblatt ausgerichtet sein.

Um die Signalgenauigkeit zu erhöhen, soll die Kantendetektion in der Praxis parallel mit drei Lasern erfolgen, welche von einer Kamera erfasst, digitalisiert und von einer Auswertungssoftware in Steuerungsimpulse umgewandelt werden. Eine Signalausgabe erfolgt nur dann, wenn mindestens zwei

identische Messwerte pro Messintervall ermittelt wurden.

Im ersten Praxisschritt soll die Signalausgabe über eine Leuchtdiodenanzeige mit Rechts/Links-Funktion visualisiert werden. Im Weiteren ist geplant, das System in den Steuerkreis der Lenkhydraulik zu integrieren, so dass abschließend eine vollautomatische Maschinensteuerung zur Verfügung steht.

### 7.3.3 Beschaffung geeigneter Messtechnik

Wegen der anspruchsvollen Einsatzbedingungen muss die Messtechnik hohe Anforderungen erfüllen hinsichtlich:

- Baustellentauglichkeit,
- Robustheit des Lasers und des Rechners gegenüber Vibrationen,
- Spritzwasserschutz,
- Kompatibilität mit der Bordspannung der Grindmaschine,
- Tauglichkeit der programmierten Software für verschiedene Oberflächenmaterialien,
- Tauglichkeit der programmierten Software für Grinding- und Groovingtexturen,
- Aufspreizung der Messgenauigkeit,
- kompakter Abmessungen.

Die Herstellung und Programmierung der Messtechnik einschl. Software wurde bei der Fa. IWS Messtechnik in Auftrag gegeben. Entscheidend für die Zusammenarbeit mit der Fa. IWS Messtechnik waren neben der hohen Kompetenz auch die lokale Nähe und die einschlägigen Erfahrungen im Bereich Oberflächentexturen.

Die Beschaffung und Entwicklung der Messtechnik ist nicht Bestandteil des Forschungsprojektes und wird von Seiten der Fa. OAT eigenständig durchgeführt und wird daher nur umrissen dargestellt.

Um die externen Einflüsse wie Kurvenradien und Querneigungswechsel auf die Lage der Grindingbahnen so gering wie möglich zu halten, war die Installation der Detektionseinheit so nah wie möglich an der Grindingwelle zu wählen. Außerdem muss auf Grund unterschiedlicher Wellenbreiten und zur Feineinstellung die horizontale Verschiebbarkeit des Detektors auch während des Betriebes, gewährleistet werden. Abbildung 207 zeigt die am Geräteträger montierte Detektionseinheit. Außerdem ist zur visuellen Darstellung der Spurlage ein Anzeigemodul mit Leuchtdioden erforderlich. (Abbildung 208 und Abbildung 209)

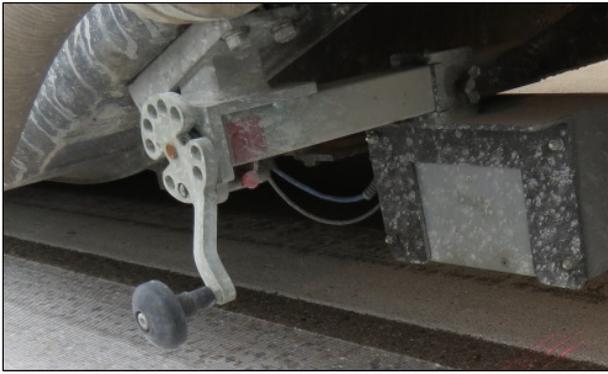


Abbildung 207: Geräteträger mit Verstelleinheit



Abbildung 208: Anzeigemodul

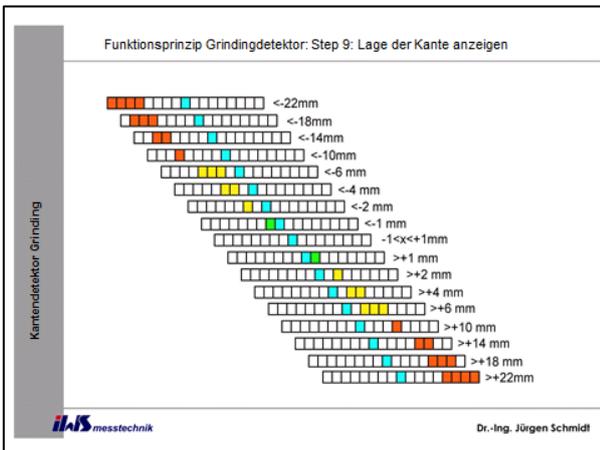


Abbildung 209: Funktionsprinzip Anzeigemodul

### 7.3.4 Erprobung der Messtechnik

Im ersten Schritt wurde die Detektionseinheit auf einer Testfläche in Verbindung mit einem Kleingerät getestet. Hierzu wurde speziell eine Grindungsfläche mit verschiedenen Schneidtiefen 0 – 5 mm auf einer Länge von ca. 70 m angelegt.

Bei ersten Tests konnte die Lokalisierung der Grindungskante nur temporär erfolgen. Nach Auswertung der Messdaten wurde festgestellt, dass die anfallenden Datenmengen nur unzureichend verarbeitet werden konnten. Außerdem konnte bei direkter

Sonneneinstrahlung kein bearbeitbares Kamerabild erzeugt werden.

Im zweiten Versuch, mit abgedunkelter Lasereinheit, erfolgte eine fehlerfreie Kantenerkennung, jedoch musste die Auflösung der Signalgenauigkeit deutlich aufgespreizt werden, da die Steuerung bereits im Zehntelmillimeterbereich reagierte.

Nachdem die Detektionseinheit auf der Versuchsfläche weiteren umfangreichen Tests unterzogen wurde, erfolgte die Installation der Messtechnik an der Grindmaschine GReX 5510. Hierfür wurde bereits bei der Planung der Grindmaschine ein entsprechender Montageort unmittelbar vor der Schneidwelle vorgesehen.

Der erste Baustellentest wurde auf der Baustelle A 93 durchgeführt (Abbildung 210).



Abbildung 210: Testbetrieb auf der A 93

Nach schrittweisen Anpassungen der Messgenauigkeit konnte die Schnittkante im späteren Verlauf zuverlässig detektiert werden. Abbildung 211 zeigt die Detektionseinheit im Betriebsmodus. Die Anzeige erfolgte hierbei visuell über die eingebaute LED-Anzeige (Abbildung 212). Eine systembedingte Abweichung konnte auf Grund der hohen Genauigkeit des Systems nicht festgestellt werden.



Abbildung 211: Detektionseinheit im Betriebsmodus



**Abbildung 212:** Visuelle Anzeige

Um weiterführende Aussagen zur Zuverlässigkeit der Detektionseinheit anstellen zu können, muss die Detektionseinheit auf weiteren Baustellen unter verschiedenen Witterungsbedingungen und auf unterschiedlichen Belägen (auch auf Asphalt) getestet werden.

Sollten die weiteren Tests erfolgreich verlaufen, wird die Detektionseinheit im nächsten Schritt in den Hydraulikkreislauf des Lenksystems integriert, so dass eine vollautomatisierte Steuerung der Maschine erfolgen kann.

## 7.4 Entwicklung und Herstellung von Diamantscheiben mit einer Breite von < 2,8 mm

### 7.4.1 Einfluss der Rillenbreite auf die Stegfläche

Ausgehend von den bisherigen Messergebnissen hat die bei den Grindingtexturen entstehende Stegbreite (Scheibenabstand) einen signifikanten Einfluss auf die Geräuschentwicklung und die Dauerhaftigkeit einer Grindingtextur.

Während Grindingtexturen mit breiteren Stegen zu texturstabilen Oberflächen bei vergleichsweise höherer Geräuschentwicklung führen, kann durch die Ausbildung schmalere Stege der Geräuschpegel weiter reduziert werden. Die Ausbildung schmalere Stege führt jedoch zu einer Abnahme der Stegfläche insgesamt und somit zu einer Reduzierung der Verschleißreserve der Textur. Die Verschleißreserve einer Grindingtextur wird neben der Qualität des Betons und der verwendeten Zuschlagstoffe durch die zur Verfügung stehende Stegfläche und deren -höhe (Steghöhe) definiert.

Um der Abnahme der Stegfläche bei geringeren Stegbreiten entgegenzuwirken, kann durch den Einsatz von schmalere Diamantscheiben die Anzahl

der Stege und somit die Stegfläche insgesamt, welche letztendlich die Verschleißfläche der Textur bildet, erhöht werden.

Als rechnerische Anhaltsgröße kann hierfür der Anteil der Stegfläche an der Fahrbahnoberfläche nach folgender Formel ermittelt werden:

$$SF = (100/(SB+RB))*SB$$

mit

*SB* Segmentabstand (Stegbreite)

*RB* Scheibenbreite (Rillenbreite)

*SF* Stegfläche

Daraus ergeben sich die in Tabelle 30 dargestellten Stegflächen als prozentualer Anteil an der Fahrbahnoberfläche. Stegflächen mit zu geringer Verschleißreserve sind rot dargestellt.

Stegbreite SB in mm (Scheibenabstand)	Rillenbreite RB in mm (Scheibenbreite)	Stegfläche SF in %
2,00	3,20	38,46
2,00	2,80	41,67
2,00	2,40	45,45
2,00	2,00	50,00
1,80	3,20	36,00
1,80	2,80	39,13
1,80	2,40	42,86
1,80	2,00	47,37
1,50	3,20	31,91
1,50	2,80	34,88
1,50	2,40	38,46
1,50	2,00	42,86
1,20	3,20	27,27
1,20	2,80	30,00
1,20	2,40	33,33
1,20	2,00	37,50

**Tabelle 30:** Stegflächen als prozentualer Anteil an der Fahrbahnoberfläche

Aus technischen Gründen war die Herstellung von Diamantscheiben mit einer Breite von < 2,8 mm bisher nicht möglich. Somit war eine Neuentwicklung von Diamantscheiben für den Bereich Grinding in den Breiten 2,4 und 2,0 mm erforderlich.

Die Firma Otto Alte-Teigeler GmbH hat im Rahmen des FV die Firma Heger beauftragt, zu prüfen, in wie fern es möglich ist, Diamantwerkzeuge in den Breiten 2,4 und 2,0 mm herzustellen.

Zielsetzung war eine Diamantsegmentabmessung (Länge x Breite x Höhe) von 24 x 2,4 x 12 und 24 x 2,0 x 12 mm.

Die Scheiben in der Breite von 2,4 mm wurden bereits produziert und auf A 12 und der A 93 erfolgreich eingesetzt.

Die Herstellung von 2,0 mm breiten Scheiben ist generell möglich, ein Test der Werkzeuge in situ steht jedoch noch aus.

#### 7.4.2 Beschreibung des Entwicklungs- und Herstellungsprozesses der Scheiben

Bei der Herstellung von Diamantscheiben werden Metallpulver und Diamanten vermischt, vorgepresst und gesintert. Diese werden dann mit Laserschweißautomaten auf Stahl-Trägerkörper aufgeschweißt.

Das Knowhow bei der Herstellung von Diamantwerkzeugen liegt einerseits in der Auswahl der Metallbindung und der Diamantzusammensetzung und andererseits im Herstellungsprozess. Aus diesem Grund kann der Ablauf der Produktentwicklung nur allgemein beschrieben werden. Details zu den eingesetzten Materialien und Produktionsdetails werden aus Geheimhaltungsgründen vom Hersteller nicht zur Verfügung gestellt.

Bei der Produktion von Diamantsegmenten werden verschiedene feine Metallpulver gemischt. Diese bilden eine Metallmatrix oder Bindung, in die Diamanten eingebunden werden. Für die weitere Verarbeitbarkeit muss aus dieser Metallpulver-Diamantenmischung ein Granulat hergestellt werden. Die Größe der Granulate bestimmt die Schüttdichte des Materials, welches dann direkten Einfluss auf die Dichte des fertigen Segmentes hat.

Im nächsten Schritt wird dieses Granulat volumetrisch vorgepresst. Das heißt, eine Kavität wird definiert mit dem Granulat gefüllt und zu einem Grünling gepresst. Dieser wird üblicherweise in Grafitformen unter hohem Druck und hoher Temperatur zum Segment versintert.

Für die weitere Verarbeitung (Laserschweißen) ist es notwendig, dass jedes Diamantsegment eine diamantfreie Zone (Segmentfuß) hat. Diese muss eine feste Verbindung mit dem diamantimprägnierten Teil bilden und gut schweißbar sein.

Für die Herstellung von Diamantscheiben für Grinding wählt man in der Regel sehr harte und dichte Metallbindungen ( $P > 9\text{kg/dm}^3$  und bis zu 120 HRB), die zusätzlich mit Wolframcarbitpartikeln versetzt werden. Solche Pulver sind generell schwer zu verarbeiten und im Grünzustand äußerst spröde. Beim Sintern wird eine Verdichtung mit Faktor 1,6 erreicht, was bedeutet, dass die Grünlinge in der Verpressrichtung um diesen Faktor größer sind, als das fertige Segment.

Bei der Herstellung der Grünlinge gibt es zwei Möglichkeiten des Pressvorgangs. Beim stehenden Pressen muss somit ein Grünling von 24 x 2,0 x 19,2 mm hergestellt werden. Die Öffnung der Kavität beträgt lediglich 2 mm, wodurch eine Befüllung nur in mehreren Schritten möglich ist. Eine weitere Bearbeitung eines solch dünnen und spröden Grünlings ist nur mit sehr hohen Ausschussraten möglich.

Aus diesen Gründen wurde für die Herstellung der 2,0 mm und 2,4 mm breiten Segmente die flache Variante gewählt, sodass der Grünling 24 x 3,2 x 12 mm misst. Hierbei ist die Schwierigkeit, die diamant-imprägnierte Bindung von der Fußbindung sicher und zuverlässig zu trennen. Nur so ist später eine feste Verbindung zum Stahlträger gewährleistet. Bisher wurde bei solchen Bindungen eine Minimaldicke von 2,8 mm erreicht. Dies entspricht 4,5 mm beim Grünling.

Erste Versuche haben dann gezeigt, dass die üblichen Granulate für Segmente  $< 2,8$  mm zu grob waren. Es musste also zuerst ein feineres Granulat hergestellt werden. Dabei ändern sich natürlich auch die Größenverhältnisse zu den Diamantkristallen und den Wolframkarbidpartikeln.

Diese Problematik wird dadurch erhöht, dass die Diamantkonzentration erhöht werden musste. Die um 40% geringere Schneidoberfläche soll ja die gleichen Schneidparameter erfüllen. Somit muss die bei dieser Anwendung ohnehin hohe Diamantkonzentration nochmals erhöht werden. Dies erhöht wiederum die Gefahr von Diamantlunkern in der Bindung. Eine Reduzierung der Diamantkristallgröße hätte zu einer Verschlechterung der Schneidparameter geführt. Durch ein verbessertes Mischverfahren und das feinere Granulat konnte letztendlich die optimale Diamantkornverteilung erreicht werden.

Die optimierten und angepassten Fertigungsparameter haben letztendlich zum gewünschten Ziel geführt. Die Scheiben in der Breite von 2,4 mm wurden bereits auf der A 12 und der A 93 erfolgreich eingesetzt.

Bei herkömmlichen Trennscheiben gibt es in der Regel einen Überstand von Diamantsegment zu Stahlkern. Dieser beträgt üblicherweise mindestens 0,5 mm je Seite. Dieser Überstand dient dazu, einen vorzeitigen Verschleiß des Trägerkörpers durch abrasive Schneidschlämme zu verhindern. Da die Texturtiefe beim Grinding in der Regel geringer ist als die Segmenthöhe, kommen die Stahlkerne erst dann mit Schneidschlämme in Kontakt, wenn die Diamantsegmente bereits zu einem Großteil verschliffen sind. Wichtig sind dennoch eine ausreichende Kühlwasserzufuhr sowie eine optimale Absaugung der anfallenden Schneidschlämme.

In Anbetracht von Maschinenleistung und -gewicht kamen auch keine dünneren Stahlkerne als 2 mm in Frage. Hier würde das Risiko verlaufender Texturrillen deutlich größer sein, als das Risiko vorzeitigen Kernverschleißes.

Nach dem Laserschweißen werden die Diamanttrennscheiben seitlich und stirnseitig angeschärft und abgerichtet. Beim üblichen Überstand von 0,5 mm oder mehr ist dies kein Problem. Wenn bereits nominell kein Überstand vorhanden ist, heißt das, dass die Diamantsegmente generell mit einer Plus-toleranz gefertigt werden müssen und die Laserschweißung absolut zentriert erfolgen muss.

Hierzu mussten somit die Fertigungstoleranzen beim Laserschweißen verengt und überprüft werden.

## 8 Erprobungsstrecken

### 8.1 Vorgehen

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Laborversuchen und den Simulationsrechnungen werden Betonzusammensetzungen und Texturgeometrien ausgewählt, die für die Erprobungsstrecken zum Einsatz kommen. Insgesamt sollen vier verschiedene Oberbetone verwendet werden und jeder Oberbeton mit drei Grindingvarianten texturiert werden. Die Erprobungsstrecken werden so gewählt, dass die für Messung der Geräuschemission (SPB- und Kontrollierten Vorbeifahrt) erforderlichen Randbedingungen eingehalten werden. Im Bereich der Erprobungsstrecke sind daher auszuschließen:

- Fahrbahnen in hoher Dammlage,
- Fahrbahnen im Einschnitt,
- bestehende Lärmschutzeinrichtungen,
- Ingenieurbauwerke,
- fahrbahnahe Bebauung.

Für die Erprobungsstrecken werden die Vergabeunterlagen modifiziert, indem die Regelquerschnitte, die Baubeschreibung und das Leistungsverzeichnis bezüglich der herzustellenden Oberbetone und den vorgesehenen Grindingmaßnahmen geändert und angepasst werden. Dabei werden besondere beton-technologische Aspekte, die Ausschreibung einer erweiterten Erstprüfung und Aspekte des Grindings beschrieben und in Leistungstexte gefasst.

Der Bau der Erprobungsstrecke wird durch Bestimmung der Frischbetoneigenschaften wie Konsistenz, Luftporengehalt und Mörtelschichtdicke vom Forschungsnehmer begleitet. Des Weiteren werden Probekörper für Druck- und Spaltzugfestigkeitsprüfungen und das Laborgrinding hergestellt.

Während des Grindingprozesses wird die Ebenheit vor und hinter der Grindingwelle gemessen und aufgezeichnet. Die Messergebnisse werden im Nachgang zu den Versuchen ausgewertet, um den Erfolg der Ebenheitsmessung und -kontrolle zu überprüfen.

Der gegrindeten Oberfläche werden Bohrkerne entnommen, an denen die Druckfestigkeit nach [DIN EN 12390-3] und Spaltzugfestigkeit nach [AL Sp-Beton] sowie der Frost-Tausalz- bzw. der Verschleiß-Widerstand bestimmt werden.

An der fertig gestellten Erprobungsstrecke erfolgt zunächst die Charakterisierung der Grobtextur mit dem Messgerät ELAtextur. Die berührungslose Abtastung der Fahrbahnoberfläche mit einer horizontalen Auflösung des Lasersensors von 0,2 mm sowie einer vertikalen Auflösung von 0,01 mm mit 2000 Messpunkten auf einer Spiralbahn mit 400 mm Umfang erlaubt eine genügend genaue Beschreibung der erzeugten Grindingtextur.

Im Ergebnis dieser Messung werden die Auswertungskenngrößen Gestaltfaktor, MPD (Mean Profile Depth) gemäß [DIN EN ISO 13473-1] und ETD (Estimated Texture Depth), vergleichbar mit dem MTD des Sandfleck-Verfahrens gemäß [DIN EN ISO 13473-1] ermittelt.

Des Weiteren war ursprünglich vorgesehen, eine kontinuierliche Texturmessung der Oberfläche mit dem schnellfahrenden Texturmesssystem von Müller-BBM durchzuführen. Um den Nachweis der Geräuschminderung zu führen, sollten an den Testfeldern kontrollierte Vorbeifahrtmessungen durchgeführt werden. An den für die Vorbeifahrtmessungen vorgesehenen Fahrbahnquerschnitten wurden zusätzlich Messungen der Oberflächentextur mit dem 3D-Texturmesssystem und mit dem Laserprofilometer durchgeführt. Zusätzlich wurden Messungen des texturinduzierten Strömungswiderstands vorgenommen.

Die Griffigkeit der Oberfläche wird im Zuge der regulären Kontrollprüfung nach dem SKM-Verfahren bestimmt. Zur Anknüpfung an die Laborversuche wird die Griffigkeit zusätzlich mit dem SRT-Pendel kombiniert mit ELAtextur-Messungen bewertet.

Da die Aussagekraft des SKM-Messergebnisses bei derart ausgeprägten anisotropen Texturen möglicherweise begrenzt ist, werden in Ergänzung dynamische Griffigkeitsmessungen mit dem LFC-Messverfahren ViaFriction durchgeführt. Im Rahmen von Vergleichsfahrten zwischen ViaFriction und SKM auf herkömmlichen (weitestgehend isotropen) Fahrbahnbelägen konnte eine gute Korrelation zwischen beiden Messverfahren nachgewiesen werden.

## 8.2 Erprobungsstrecke A 12

### 8.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der baulichen Erhaltung von Verkehrsflächen war im Bereich der A 12 auf der linken Richtungsfahrbahn zwischen km 34,100 und km 36,500 (Abbildung 213) auf einer Länge von 2,400 km die vollständige Erneuerung des Oberbaus im Tiefeinbau in Betonbauweise vorgesehen.

Mit dem Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg konnte in Abstimmung mit der BAST eine Übereinkunft erzielt werden, dass innerhalb der geplanten Erneuerungsmaßnahme ein Abschnitt von km 34,100 bis km 35,000 als erste Erprobungsstrecke in besonderer Betonbauweise hergestellt werden soll.

Die Festlegung erfolgte im Ergebnis einer gemeinsamen Streckenbegehung mit dem Landesbetrieb Straßenwesen.



**Abbildung 213:** Erprobungsstrecke auf der A 12 bei km 35,1 vor der grundhaften Erneuerung

Auf dieser Erprobungsstrecke wurden drei verschiedene Oberbetone eingebaut und jeweils mit drei Grindingvarianten texturiert (Abbildung 214 und Abbildung 215). In allen Abschnitten wurde als Unterbeton der gleiche Beton verwendet, der für die übrige Baumaßnahme als Unterbeton verwendet wurde. Im Abschnitt 1 wurde dieser Unterbeton zusätzlich auch als Oberbeton eingebaut. In Abschnitt 2 wurde als Oberbeton ein Waschbeton mit Ausfallkörnung und in Abschnitt 3 ein Waschbeton mit stetiger Sieblinie eingebaut.

Abschnitt 1 km 34,100 - 34,400 Unterbeton GK 22 mm als Oberbeton			Abschnitt 2 km 34,400 - 34,700 Waschbeton Ausfallkörnung			Abschnitt 3 km 34,700 - 35,000 Waschbeton stetige Sieblinie		
100 m	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m	100 m
Textur 1	Textur 2	Textur 3	Textur 3	Textur 2	Textur 1	Textur 1	Textur 2	Textur 3

**Abbildung 214:** Oberbetone und Texturen der Erprobungsstrecke auf der A 12

Textur	Grinding			Grooving		
	Segmentbreite	Segmentabstand	Rillentiefe	Segmentbreite	Segmentabstand	Rillentiefe
Textur 1	2,4 mm	1,8 mm	Anschleifen	2,8 mm	22,8 mm	3,0 mm
Textur 2	2,4 mm	1,8 mm	fen der	-	-	-
Textur 3	2,4 mm	1,5 mm	groben GK	2,8 mm	21,0 mm	3,0 mm

**Abbildung 215:** Texturgeometrien der Erprobungsstrecke auf der A 12

Für alle Betone wurde Sand aus Hartmannsdorf und als grobe Gesteinskörnung Splitt aus Dönstedt eingesetzt. Die Betonzusammensetzungen sind in Tabelle 31 dargestellt.

	Unterbeton	WB Ausfallk.	WB stetig
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340	420	420
Zementart	CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N
w/z-Wert	0,45	0,45	0,45
Sand 0/2 [kg/m <sup>3</sup> ]	542	555	539
Splitt 2/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	248	-	1152
Splitt 5/8 [kg/m <sup>3</sup> ]	-	1134	-
Splitt 8/16 [kg/m <sup>3</sup> ]	397	-	-
Splitt 16/22 [kg/m <sup>3</sup> ]	680	-	-
LP-Gehalt [Vol.-%]	5,0	5,5	5,5

**Tabelle 31:** Betonzusammensetzungen auf der Erprobungsstrecke der A 12

Bei den Texturen 1 und 3 handelt es sich um eine Kombination aus Grinding und Grooving. Textur 2 ist eine reine Grindingtextur. Für das Grinding aller Texturen wurde eine Segmentbreite von 2,4 mm gewählt, da nach bisherigen Erkenntnissen davon ausgegangen wird, dass geringe Segmentbreiten einen positiven Einfluss auf die Lärminderungseigenschaften der Textur haben (bei konventionellen Grindingtexturen liegen die Segmentbreiten bei 2,8 bzw. 3,2 mm.). Des Weiteren wird bei geringen Segmentbreiten von einer höheren Griffigkeit ausgegangen, da infolge einer erhöhten Blattanzahl die

Steganzahl der Grindingtextur zunimmt. Das Grinding bei Textur 1 und Textur 2 ist mit einem Segmentabstand von 1,8 mm identisch. Bei Textur 3 beträgt der Segmentabstand 1,5 mm. Die für diese Texturen gewählten Segmentabstände sind deutlich niedriger als bei konventionellen Grindingtexturen, deren Segmentabstand in der Regel 2,2 mm beträgt. Nach bisherigem Kenntnisstand verbessern sich die Lärminderungseigenschaften von Grindingtexturen mit abnehmendem Segmentabstand, da homogenere Texturen mit weniger unregelmäßig gebrochenen Stegen entstehen. Bei diesen Oberflächen reduziert sich der Vibrationsanteil. Zusätzlich nimmt die Texturtiefe bei geringem Segmentabstand ab, wodurch der texturinduzierte Strömungswiderstand steigt und somit der aerodynamische Geräuschanteil sinkt. Der Vergleich der Oberflächeneigenschaften von Textur 1 und 2 soll Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss das zusätzliche Grooving bei Textur 1 auf die Lärminderung sowie die Griffbarkeit hat. Der Vergleich der Texturen 1 und 3 soll Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss der geringere Segmentabstand bei Textur 3 auf die Lärminderung sowie die Griffbarkeit hat.

### 8.2.2 Modifizierung der Vergabeunterlagen und Erstellung eines detaillierten Ablaufplanes

Die Baubeschreibung wurde folgendermaßen dem nunmehr erforderlichen Leistungsspektrum entsprechend angepasst:

#### Geplante Fahrbahnbefestigung

- Abschnitt 1 von km 34,100 bis km 34,400:
  - 29 cm Betondecke in einschichtiger Bauweise, C 30/37
  - 31 cm Schottertragschicht 0/32,  $E_{v2} \geq 150 \text{ MN/m}^2$
  - 60 cm Gesamtdicke,  $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$
- Abschnitt 2 und 3 von km 34,400 bis km 35,000:
  - 29 cm Betondecke mit Oberbeton aus 8 mm Größtkorn, C 30/37
  - 31 cm Schottertragschicht 0/32,  $E_{v2} \geq 150 \text{ MN/m}^2$
  - 60 cm Gesamtdicke,  $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$

#### Herstellung der Betondecke

- Abschnitt 1 von km 34,100 bis km 34,400:
  - Fertigung auf voller Breite
  - Einschichtig zweilagige Herstellung
- Abschnitt 2 und 3 von km 34,400 bis km 35,000:
  - Fertigung auf voller Breite
  - Zweischichtige Herstellung

#### Betondecke - Oberbeton

- Abschnitt 1 von km 34,100 bis km 34,400:
  - Dicke des einschichtigen Oberbetons: 29 cm.
  - Der Einbau der Betondecke hat zweilagig zu erfolgen.
  - Es gelten die Anforderungen der [TL Beton-StB 07] an die Gesteinskörnungen für einschichtigen Einbau (Anteil an gebrochenem Korn über 8 mm mind. 50 M.-%, am Gesamtgemisch mind. 35 M.-%).
  - Die Gesteinskörnungen dieses Betons müssen dem Anhang A der [TL Beton-StB 07], Spalte Oberbeton ( $D > 8$ ) entsprechen.
- Abschnitt 2 von km 34,400 bis km 34,700:
  - Dicke des Oberbetons: 7 cm.
  - Grobe Gesteinskörnungen ausschließlich aus gebrochenem Festgestein der Kategorie C<sub>100/0</sub>.
    - Sieblinie mit Ausfallkörnung aus den Korngruppen 0/2 und 5/8
  - Der verwendete Zement muss ein Bluten des Betons auf jeden Fall verhindern.
  - Oberflächenmörtel ist nicht zu entfernen.
- Abschnitt 3 von km 34,700 bis km 35,000:
  - Dicke des Oberbetons: 7 cm,
  - Grobe Gesteinskörnungen ausschließlich aus gebrochenem Festgestein der Kategorie C<sub>100/0</sub>.
    - Stetige Sieblinie aus den Korngruppen
      - 0/2 und 2/8 oder
      - 0/4 und 2/8 bzw.
      - 0/2 und 2/5 und 5/8 oder
      - 0/4 und 2/5 und 5/8
  - Der verwendete Zement muss ein Bluten des Betons auf jeden Fall verhindern.
  - Oberflächenmörtel ist nicht zu entfernen.

#### Betondecke - Unterbeton

- Abschnitt 2 und 3 von km 34,400 bis km 35,000:
  - Die Dicke des Unterbetons beträgt 22 cm.
  - Es gelten die Anforderungen der [TL Beton-StB 07] an die Gesteinskörnungen für einschichtigen Einbau (Anteil an gebrochenem Korn über 8 mm mind. 50 M.-%, am Gesamtgemisch mind. 35 M.-%).
  - Die Gesteinskörnungen des Unterbetons müssen dem Anhang A der [TL Beton-StB 07], Spalte Oberbeton ( $D > 8$ ) entsprechen.

#### Nachbehandlung der Fahrbahndecke

Für die Fahrbahndecke der Erprobungsstrecke von km 34,100 bis km 35,000 ist ein Nachbehandlungsmittel mit erhöhtem Hellbezugswert zu verwenden.

#### Bauablauf

Für die Erprobungsstrecke von km 34,100 bis km 34,400 und für die Erprobungsstrecke von km 34,400 bis km 34,700 sind Tagesansätze zu berücksichtigen. Auf die verminderte Tagesleistung von jeweils 300 m wurde hingewiesen.

Das Grinding der Betonoberflächen auf der Erprobungsstrecke von km 34,100 bis km 35,000 ist nicht Gegenstand des Ausschreibungsverfahrens, soll jedoch beim Bauablauf einkalkuliert werden. Die Dauer der Grindingarbeiten wurde mit ca. 5 Tagen veranschlagt.

Das Grinding soll nach dem Schneiden des Kerbschnittes der Fugen erfolgen.

Das Leistungsverzeichnis für die Baumaßnahme wurde dem nunmehr erforderlichen Leistungsspektrum entsprechend angepasst.

### 8.2.3 Bauberatung zur Ausführung der Betondecke und des Grindings

Vor Beginn der Baumaßnahme fand eine Beratung zur Qualitätssicherung beim Betondeckeneinbau mit dem AG, dem AN und Vertretern des Forschungsnehmers statt. Zur Einbindung des Forschungsvorhabens in die Baumaßnahme wurden Festlegungen getroffen hinsichtlich

- der genauen Abgrenzung der Abschnitte unterschiedlicher Betonrezepturen,
- der Koordinierung zwischen Betondeckeneinbau, Herstellen der Fugen und Grindingmaßnahme,
- des erweiterten Prüfprogramms im Forschungsvorhaben, das über die baubegleitenden Prüfungen hinausgeht.

### 8.2.4 Probekörperherstellung und Frischbetonprüfung

Für jeden Beton wurden sechs Würfel (150 mm), 12 Zylinder (d = 100 mm, h = 200 mm) sowie drei Platten (L x B x H = 400 mm x 350 mm x 90 mm) hergestellt. An jeweils drei Würfeln wurde die Druckfestigkeit im Alter von sieben Tagen (Zeitpunkt des Grindingbeginns) und 28 Tagen gemäß [DIN EN 12390-3] bestimmt. An sechs 5 cm dicken Zylinderscheiben wurde die Spaltzugfestigkeit ebenfalls nach sieben und 28 Tagen gemäß AL Sp-Beton bestimmt. Die Zylinderscheiben wurden zuvor von den Unterseiten der Zylinder abgesägt. Die hergestellten Platten werden mit der Laborgrindingmaschine texturiert. Die Texturen entsprechen denen der Erprobungsstrecke. An dem Beton, mit dem die Probekörper hergestellt wurden, wurden die Frischbe-

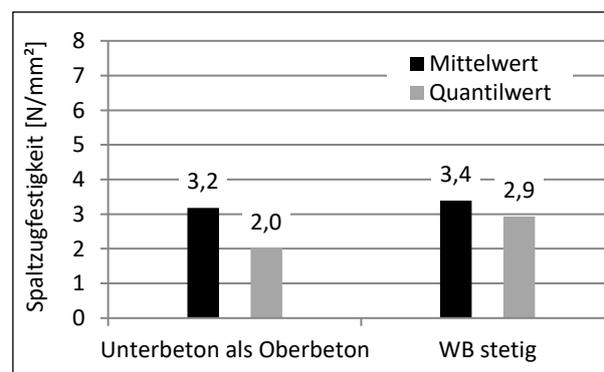
toneigenschaften Temperatur, Konsistenz und Luftporengehalt bestimmt. Die Frischbetoneigenschaften sind in Tabelle 32 dargestellt.

	Unterbeton	WB Ausfallk.	WB stetig
Betontemperatur [°C]	23,6	25,8	23,9
Verdichtungsmaß [-]	1,15	1,18	1,16
LP-Gehalt [Vol.-%]	5,8	5,8	6,5

**Tabelle 32:** Frischbetoneigenschaften der Oberbetone zum Zeitpunkt der Probekörperherstellung

### 8.2.5 Herstellung zielsicherer Texturen mit optimierten Gebrauchs- und Substanzeigenschaften

Aufgrund einer unzureichenden Ebenheit wurde zunächst über die gesamte Fläche der Erprobungsstrecke ein Ebenheitsgrinding mit folgendem Wellenbesatz durchgeführt: Segmentbreite: 2,8 mm, Segmentabstand: 2,2 mm. Der Beton hatte zu diesem Zeitpunkt ein Alter von fünf bis sieben Tagen. Vor dem Grinding/Grooving der Texturen 1 bis 3 wurden an zwei Betonen jeweils sechs Bohrkerne (d = 100 mm) entnommen, an denen die Spaltzugfestigkeit des Oberbetons gemäß [AL Sp-Beton] bestimmt wurde. Dies sollte zeigen, welche Spaltzugfestigkeit zum Zeitpunkt des Grindings/Groovings vorlag, um gegebenenfalls Rückschlüsse auf die Texturgeometrie ziehen zu können. Abbildung 216 zeigt die Spaltzugfestigkeiten der Bohrkernscheiben.



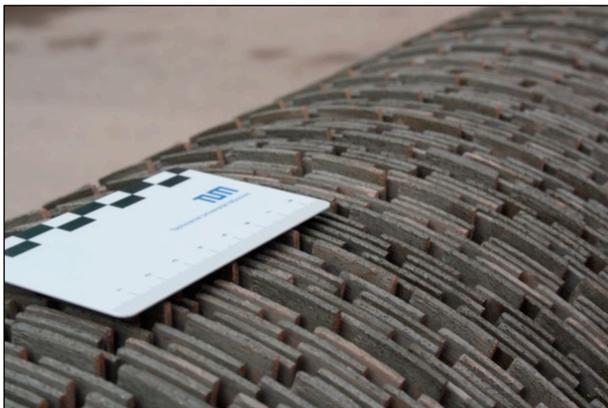
**Abbildung 216:** Spaltzugfestigkeit der Bohrkernscheiben des Oberbetons im Alter von sieben Tagen (Anmerkung: Am Waschbeton mit Ausfallkörnung wurden keine Bohrkerne entnommen)

Das Grinding/Grooving der Texturen 1 bis 3 erfolgte mit der Maschine G-Rex des Projektpartners OAT (Abbildung 217).



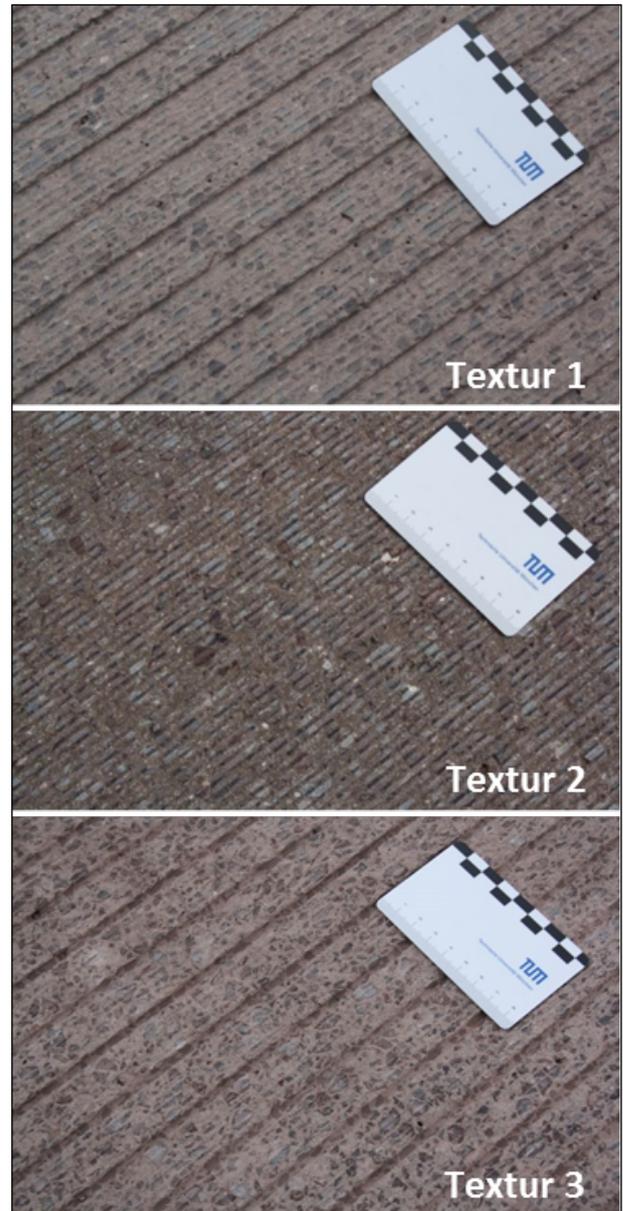
**Abbildung 217:** Grinding auf der Erprobungsstrecke A 12

Die Texturen 1 und 3 wurden in einem Arbeitsgang hergestellt. Das heißt, die Groovingrillen wurden durch zusätzliche Sägeblätter größeren Durchmessers, die sich auf der Grindingwelle befanden, erzeugt (Abbildung 218).



**Abbildung 218:** Grindingwelle mit Wellenbesatz für Textur 1

In Abbildung 219 sind die Texturgeometrien am Beispiel des Waschbetons mit Ausfallkörnung (Abschnitt 2) dargestellt.



**Abbildung 219:** Texturgeometrien am Beispiel des Waschbetons mit Ausfallkörnung

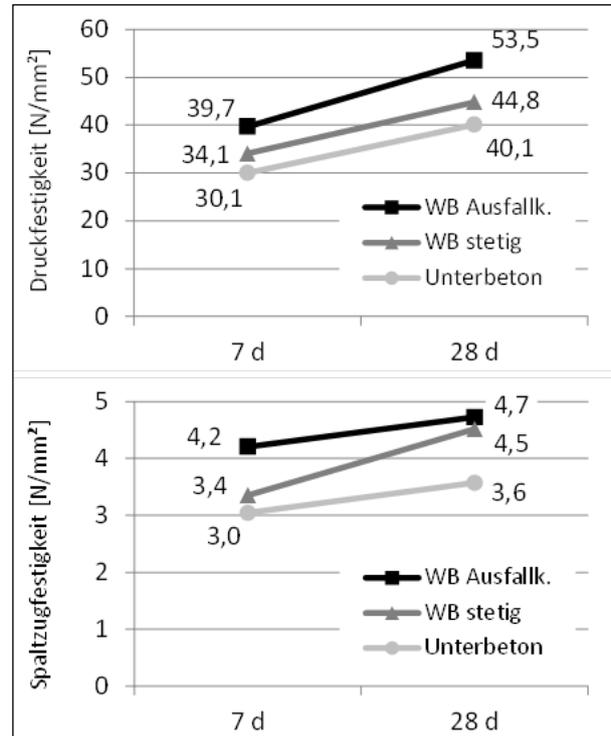
Es wurden in einigen Bereichen an den Kanten der Groovingrillen Kornausbrüche festgestellt (Abbildung 220). Möglicherweise war hier der Zeitpunkt des Grindings/Groovings zu früh, so dass die Festigkeit des Betons noch zu gering war.



**Abbildung 220:** Kornausbrüche entlang der Groovingrillen am Beispiel des Waschbetons mit Ausfallkörnung und Textur 3

### 8.2.6 Festbetonprüfungen an Würfeln und Zylindern

In Abbildung 221 sind die Druck- und Spaltzugfestigkeiten der auf der Baustelle hergestellten Würfel und Zylinder nach sieben und 28 Tagen angegeben.



**Abbildung 221:** Mittelwerte der Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone der Erprobungsstrecke A 12

Die höchsten Festigkeiten erreicht der Waschbeton mit Ausfallkörnung, dessen Druckfestigkeit rd. 10 MPa und dessen Spaltzugfestigkeit rd. 1 MPa über der des Unterbetons liegen. Die Spaltzugfestigkeiten des Unterbetons sowie des Waschbetons mit stetiger Sieblinie im Alter von sieben Tagen sind mit denen der Bohrkerne vergleichbar (Abbildung 154).

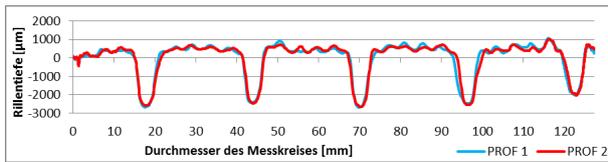
### 8.2.7 Beschreibung der Grindingtexturen sowie Nachweis der Homogenität auf der Erprobungsstrecke

#### 8.2.7.1 Texturmessungen

##### 8.2.7.1.1 Messgerät ELAtextur

Die nachfolgend betrachteten Messungen wurden am 13.01.2015 und am 01.09.2015 durchgeführt. In Abbildung 222 bis Abbildung 239 sind die Laserprofile und Fotos der Texturen sowie in Tabelle 33 bis Tabelle 41 die statistischen Kennwerte jedes einzelnen Testfeldes dargestellt.

**Testfeld 1.1, Abschnitt 1, Textur 1**



**Abbildung 222:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 1.1

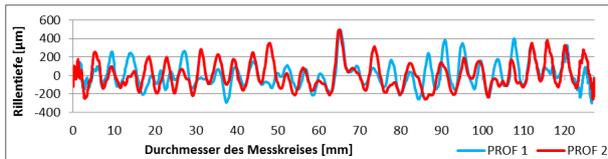


**Abbildung 223:** Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 1.1

Statistische Kennwerte	A 12, Testfeld 1.1
MPD-Mittelwert [mm]	0,77
Standardabweichung [mm]	0,05
Variationskoeffizient [%]	6,32
MPD-Minimalwert [mm]	0,70
MPD-Maximalwert [mm]	0,83

**Tabelle 33:** Texturkennwerte A 12, Testfeld 1.1

**Testfeld 1.1, Abschnitt 1, Textur 2**



**Abbildung 224:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 1.2

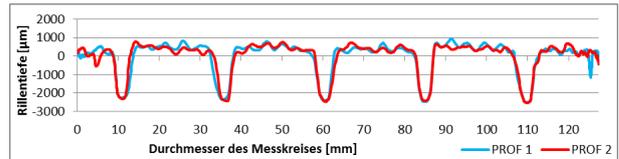


**Abbildung 225:** Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 1.2

Statistische Kennwerte	A 12, Testfeld 1.2
MPD-Mittelwert [mm]	0,43
Standardabweichung [mm]	0,06
Variationskoeffizient [%]	13,37
MPD-Minimalwert [mm]	0,36
MPD-Maximalwert [mm]	0,52

**Tabelle 34:** Texturkennwerte A 12, Testfeld 1.2

**Testfeld 1.1, Abschnitt 1, Textur 3**



**Abbildung 226:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 1.3

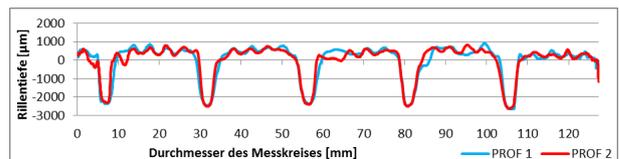


**Abbildung 227:** Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 1.3

Statistische Kennwerte	A 12, Testfeld 1.3
MPD-Mittelwert [mm]	0,81
Standardabweichung [mm]	0,11
Variationskoeffizient [%]	14,13
MPD-Minimalwert [mm]	0,69
MPD-Maximalwert [mm]	1,04

**Tabelle 35:** Texturkennwerte A 12, Testfeld 1.3

**Testfeld 2.3, Abschnitt 2, Textur 3**



**Abbildung 228:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 2.3



Abbildung 229: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 2.3

12	A 12, Testfeld 2.3
MPD-Mittelwert [mm]	0,84
Standardabweichung [mm]	0,08
Variationskoeffizient [%]	9,53
MPD-Minimalwert [mm]	0,75
MPD-Maximalwert [mm]	1,00

Tabelle 36: Texturkennwerte A 12, Testfeld 2.3

Testfeld 2.2, Abschnitt 2, Textur 2

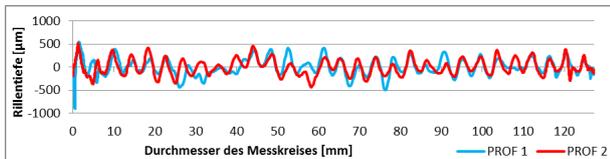


Abbildung 230: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 2.2



Abbildung 231: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 2.2

Statistische Kennwerte	A 12, Testfeld 2.2
MPD-Mittelwert [mm]	0,40
Standardabweichung [mm]	0,04
Variationskoeffizient [%]	10,39
MPD-Minimalwert [mm]	0,33
MPD-Maximalwert [mm]	0,46

Tabelle 37: Texturkennwerte A 12, Testfeld 2.2

Testfeld 2.1, Abschnitt 2, Textur 1

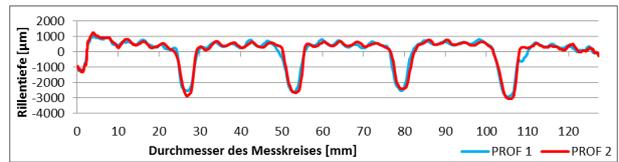


Abbildung 232: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 2.1



Abbildung 233: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 2.1

Statistische Kennwerte	A 12, Testfeld 2.1
MPD-Mittelwert [mm]	0,80
Standardabweichung [mm]	0,02
Variationskoeffizient [%]	2,35
MPD-Minimalwert [mm]	0,78
MPD-Maximalwert [mm]	0,83

Tabelle 38: Texturkennwerte A 12, Testfeld 2.1

Testfeld 3.1, Abschnitt 3, Textur 1

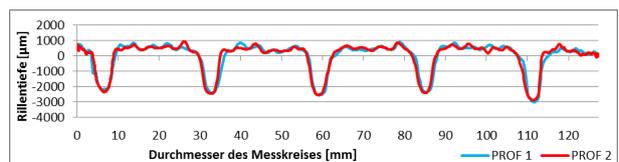


Abbildung 234: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 3.1

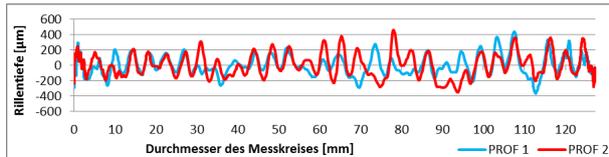


Abbildung 235: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 3.1

Statistische Kennwerte	A 12, Testfeld 3.1
MPD-Mittelwert [mm]	0,82
Standardabweichung [mm]	0,07
Variationskoeffizient [%]	8,09
MPD-Minimalwert [mm]	0,75
MPD-Maximalwert [mm]	0,93

**Tabelle 39:** Texturkennwerte A 12, Testfeld 3.1

**Testfeld 3.2, Abschnitt 3, Textur 2**



**Abbildung 236:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 3.2

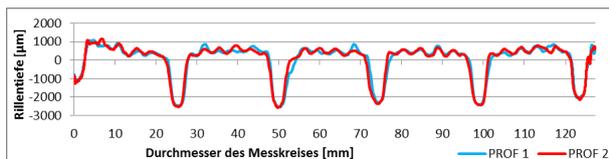


**Abbildung 237:** Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 3.2

Statistische Kennwerte	A 12, Testfeld 3.2
MPD-Mittelwert [mm]	0,36
Standardabweichung [mm]	0,03
Variationskoeffizient [%]	8,44
MPD-Minimalwert [mm]	0,33
MPD-Maximalwert [mm]	0,41

**Tabelle 40:** Texturkennwerte A 12, Testfeld 3.2

**Testfeld 3.3, Abschnitt 3, Textur 3**



**Abbildung 238:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 3.3



**Abbildung 239:** Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 3.3

Statistische Kennwerte	A 12, Testfeld 3.3
MPD-Mittelwert [mm]	0,80
Standardabweichung [mm]	0,05
Variationskoeffizient [%]	6,67
MPD-Minimalwert [mm]	0,73
MPD-Maximalwert [mm]	0,90

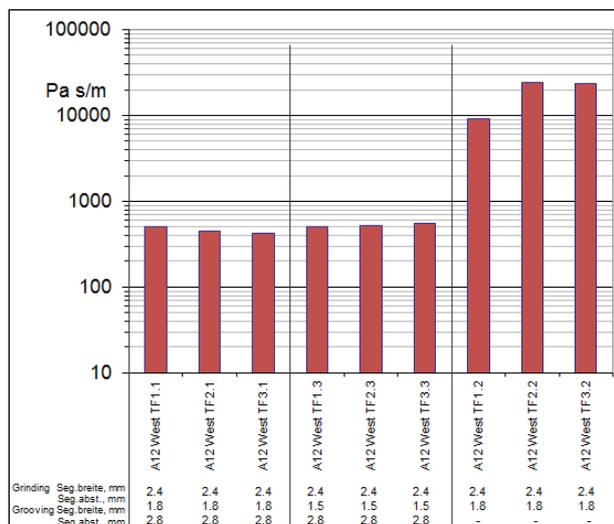
**Tabelle 41:** Texturkennwerte A 12, Testfeld 3.3

**8.2.7.1.2 Messung der 3D-Textur und des texturinduzierten Strömungswiderstandes**

Für die texturinduzierten Strömungswiderstände der Testfelder ergaben sich die in Tabelle 42 und Abbildung 240 aufgetragenen Werte.

Strecke	FR	Messquerschnitt	km	$R_s^*$ , Pa s/m Mittelwert
A 12	Berlin	TF1.1	34,15	513
A 12	Berlin	TF1.2	34,25	9.245
A 12	Berlin	TF1.3	34,35	510
A 12	Berlin	TF2.1	34,65	455
A 12	Berlin	TF2.2	34,55	23.944
A 12	Berlin	TF2.3	34,45	526
A 12	Berlin	TF3.1	34,75	426
A 12	Berlin	TF3.2	34,85	23.849
A 12	Berlin	TF3.3	34,95	556

**Tabelle 42:** Ergebnisse der Strömungswiderstandsmessungen



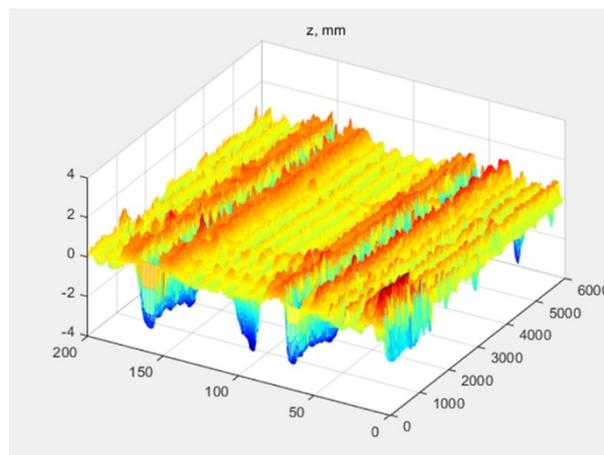
**Abbildung 240:** Spezifischer texturinduzierter Strömungswiderstand  $R_s^*$  für die Testfelder der A 12

Die Verfeinerung der Stegoberfläche durch Wahl minimaler Grindingparameter (Segmentbreite und Segmentabstand) auf den auf der A 12 realisierten Oberflächen erhöhen die Werte leicht von im Mittel 300 Pa s/m auf den Grindig-Versuchsstrecken (Kapitel 3.4.4.3) auf 500 Pa s/m, was akustisch nicht bedeutsam erscheint. Die hohen Werte für die Oberflächen ohne Grooving auf der BAB A 12 zeigen jedoch deutlich, dass durch das verfeinerte Grinding mit 2,4 mm Segmentbreite und 1,8 mm Segmentabstand tatsächlich eine sehr feinraue Oberfläche entsteht. Die Strömungswiderstände nehmen um mehr als eine Größenordnung auf Werte zwischen 9.000 und 24.000 Pa s/m zu.

Die Strömungswiderstände für die Oberflächen 1.2, 2.2 und 3.2 auf der A 12 sind mit denen von Splittmastixasphalten und feinkörnig abgestreuten Oberflächen (Oberflächenbehandlungen auf Asphalt und Abstreuerungen auf Gussasphalt mit 3 mm Größtkorndurchmesser) vergleichbar.

Die mit Hilfe des Lichtschnittverfahrens gemessenen 3D-Texturen sind für die einzelnen Testfelder der A 12 im **Anhang 7** und beispielhaft in **Abbildung 241** dargestellt.

Die z-Achse ist in mm abgetragen. Die x-Achse ist dimensionslos und enthält 200 Werte mit einem Abstand von 0,4 mm, die Auswertebreite beträgt 8 cm. Die y-Achse ist dimensionslos mit 5.033 Werten in einem Abstand von 0,4 mm, die Auswertelänge beträgt 201 cm.



**Abbildung 241:** Ergebnis der 3D-Texturmessung, Testfeld 1.1

Die Texturen mit Groovingrillen führen im Vergleich zu den Texturen ohne Groovingrillen zu Strömungswiderständen, die um den Faktor 40 niedrigere Werte aufweisen. Mit Groovingrillen ergeben sich Strömungswiderstände in der Größenordnung von 500 Pa s/m, die damit vergleichbar sind mit den Strömungswiderständen grob abgestreuter (Größtkorndurchmesser 8 mm) dichter Asphaltbeläge (Gussasphalt oder Oberflächenbehandlungen). Ohne Groovingrillen ergeben sich Strömungswiderstände in der Größenordnung von 20.000 Pa s/m. Vergleichbare Werte treten typischerweise auf Splittmastixasphaltdeckschichten mit 8 mm oder 11 mm Größtkorndurchmesser und auch auf Waschbetonoberflächen auf. Da die Strömungswiderstände rein texturinduziert sind, beeinflussen die Texturen die aerodynamischen Vorgänge der Geräuschenstehung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt (air pumping) ohne Beteiligung einer schallabsorptionsbedingten Verminderung der Schallabstrahlung und Schallausbreitung aus dem Kontakt. Hohe Strömungswiderstandswerte führen auf Fahrbahndeckschichten mit isotropen Texturen (alle herkömmlichen Asphaltdeckschichten, Waschbeton) zu niedrigeren strömungsinduzierten Rollgeräuschen als solche mit niedrigen Strömungswiderständen.

### 8.2.7.2 Messung der Geräuschemission

#### 8.2.7.2.1 Kontrollierte Vorbeifahrtmessung

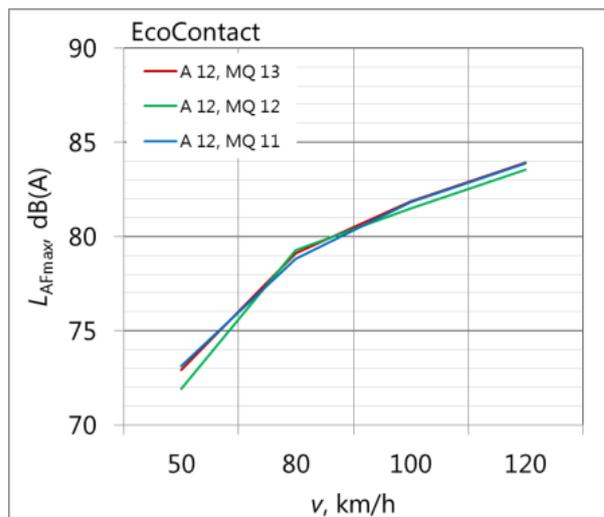
Die Messungen der Kontrollierten Vorbeifahrt (controlled pass by, CPB) auf der Erprobungsstrecke A 12 wurden am Sonntag, 12. Oktober 2014 entsprechend der in Abschnitt 3.8.1.1 und Abschnitt 3.8.1.2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Zum Zeitpunkt der CPB-Messungen war der Beton etwa 5 Wochen alt, das Grinding war seit etwa 4 Wochen abgeschlossen. Die Strecke war zum Zeitpunkt der CPB-Messungen noch nicht für den Verkehr freigegeben.

Die CPB-Messungen wurden an allen 9 Untersuchungsabschnitten der A 12 nacheinander durchgeführt. Der Untersuchungsabschnitt war zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch Baustelle, daher konnten die CPB-Messungen nur bis zur Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h durchgeführt werden.

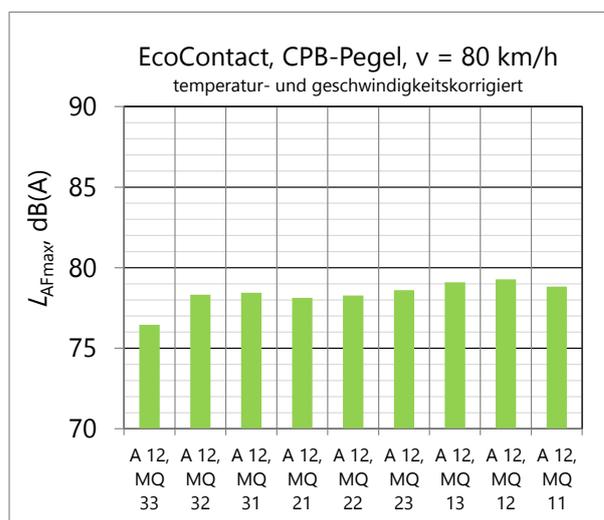
Die Messergebnisse wurden entsprechend der in Abschnitt 3.8.1.4 beschriebenen Vorgehensweise temperaturkorrigiert und auf die Referenzgeschwindigkeiten von 80 km/h, 100 km/h und 120 km/h umgerechnet.

In Abbildung 1 bis Abbildung 9 im **Anhang 8** und beispielhaft in Abbildung 242 sind die Ergebnisse der Vorbeifahrtmessungen für alle drei Reifen dargestellt. Jedes der drei Diagramme in einer Zeile enthält die Teilergebnisse für die drei Texturen pro Testfeld. In Abbildung 10 bis Abbildung 18 im **Anhang 8** und beispielhaft in Abbildung 243 zeigen die Vorbeifahrtpegel der einzelnen Reifen bei einer Geschwindigkeit auf den neun Testfeldern im Vergleich.

Die Messungen auf den Testfeldern der A 12 bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse auf den anderen Autobahnabschnitten. Auffallend ist jedoch, dass die drei Abschnitte auf dem Testfeld 1 (Unterbeton GK 22 als Oberbeton) zu den höchsten Vorbeifahrtpegeln führen, wogegen die Vorbeifahrtpegel auf den Abschnitten von Testfeld 2 (Waschbeton Ausfallkörnung) zu den niedrigsten Werten führen, hier insbesondere Textur 2 (Grinding ohne Grooving). Insgesamt bemerkenswert ist, dass es auf der A 12 offenbar nicht gelungen ist, eine untere Schranke von -3 dB(A) für die Geräuschminderung durch Grinding zu durchbrechen. Selbst mit optimiertem Grinding mit Textur 2 im Testfeld 2, das zu einer feinrauen Oberfläche führte, wurden Strömungswiderstandswerte gemessen, die denen von Splittmastixasphalt oder feinkörnig abgestreuten Gussasphaltoberflächen entsprechen (Abbildung 66). Eine weitere Rollgeräuschminderung gelang hier jedoch nicht. Die Untersuchung des Einflusses der regelmäßig angeordneten Fugen auf das Vorbeifahrtgeräusch muss deshalb einer der Schwerpunkte weiterer Untersuchungen sein.



**Abbildung 242:** CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ), Reifen EcoContact, Testfeld 1.1 bis 1.3 der Erprobungsstrecke A 12



**Abbildung 243:** Vergleich der CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) für Messreifen ECO für  $v = 80$  km/h auf allen untersuchten Grindingabschnitten der A 12

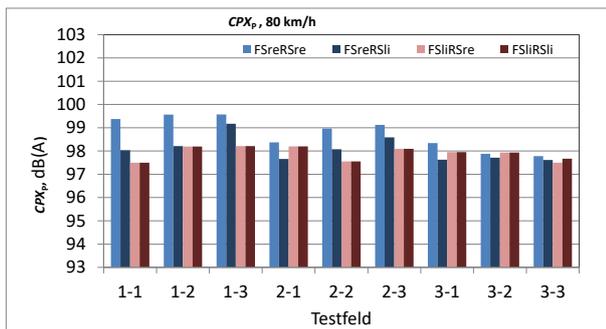
### 8.2.7.2.2 CPX-Messungen

Auf der Erprobungsstrecke A 12 wurden im Untersuchungsbereich Strecken-km 35,000 bis km 34,100 Messungen des Nahfeld-Rollgeräuschs nach der CPX-Methode durchgeführt. Die CPX-Methode ist in den Abschnitten 3.8.3.1 bis 3.8.3.4 beschrieben.

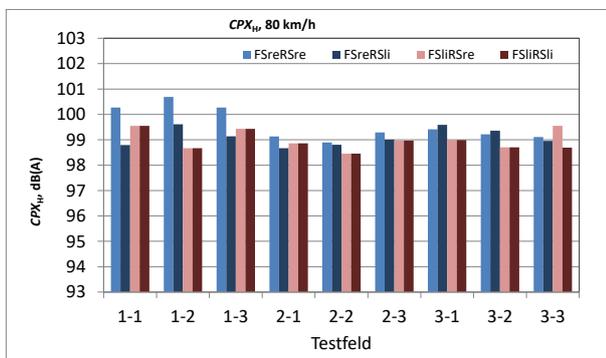
Die Messungen wurden am 16. Januar 2015 auf beiden Fahrstreifen in Fahrtrichtung Berlin durchgeführt. Die Lufttemperatur betrug zum Zeitpunkt der Messungen 9°C bis 11°C, die Fahrbahntemperatur lag bei 8°C bis 10°C. Die Fahrbahn war zum Zeitpunkt der Messungen trocken.

Die CPX-Messergebnisse wurden entsprechend der Vorgaben der ISO/DIS 11819-2 [CPX3] ausge-

wertet. Bei der Auswertung zeigten sich in den Pegel-Zeit-Verläufen des rechten Fahrstreifens deutliche Unterschiede zwischen rechter und linker Radrollspur. Im linken Fahrstreifen waren hingegen kaum Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Rollspuren feststellbar. Daraufhin wurden zusätzlich zu den nach ISO/DIS 11819-2 [CPX3] obligatorischen Mikrofonpositionen im rechten Radhaus auch die Signale der beiden Mikrofone im linken Radhaus ausgewertet. Die Ergebnisse für den Reifen P sind in der nachfolgenden Abbildung 244 dargestellt, die Ergebnisse für den Reifen H zeigt Abbildung 245.



**Abbildung 244:** CPX-Messergebnisse der Erprobungsstrecke A 12. Reifen P, Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.



**Abbildung 245:** CPX-Messergebnisse der Erprobungsstrecke A 12. Reifen H, Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.

Die Standardabweichung der Messergebnisse lag bei allen Untersuchungsabschnitten in der Regel zwischen 0,3 dB(A) und 0,5 dB(A), der Maximalwert lag bei 0,7 dB(A). Die akustische Homogenität der untersuchten Abschnitte ist daher als gut zu bezeichnen.

Bei den CPX-Indizes zeigen sich insbesondere für den Abschnitt mit Beton 1 (Unterbeton) ausgeprägte Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Fahrstreifen und Rollspuren. Der CPX<sub>p</sub>-Index im rechten Fahrstreifen liegt hier in der rechten Rollspur um bis zu 1,4 dB(A) höher als in der linken Rollspur. Der Unterschied zum CPX<sub>p</sub>-Index

im linken Fahrstreifen beträgt sogar bis zu 1,9 dB(A).

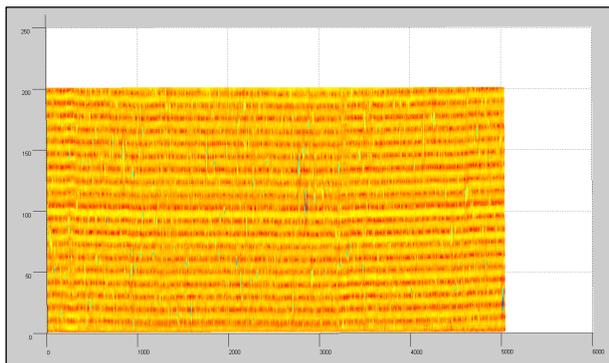
Für den CPX<sub>h</sub>-Index beträgt der Unterschied zwischen linker und rechter Rollspur im rechten Fahrstreifen bis zu 1,5 dB(A), der Unterschied zum CPX<sub>h</sub>-Index der Rollspuren im linken Fahrstreifen beträgt bis zu 0,8 dB(A). Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch in den Abschnitten mit Waschbeton mit Ausfallkörnung (Beton 2). Hier sind die Unterschiede zwischen den Rollspuren allerdings weniger ausgeprägt, der Unterschied beträgt beim CPX<sub>p</sub>-Index maximal ca. 1 dB(A).

Auf jeden Fall hat dieses Ergebnis entscheidenden Einfluss auf die Interpretation der Ergebnisse der CPB-Messungen. Die CPB-Messungen fanden randstreifenseitig in einem Abstand von 7,5 m zur Mitte des rechten Fahrstreifens statt. Aufgrund der zu geringen Breite der Richtungsfahrbahn konnte auf der gegenüberliegenden Seite des Fahrstreifens zur Gegenrichtungsfahrbahn hin kein zweites Mikrofon aufgestellt werden. Bei den CPB-Messungen spielte deshalb der Zustand der äußeren, zum Randstreifen hin gelegenen Radrollspur eine dominante Rolle. Gerade diese Radrollspur war jedoch den Ergebnissen der CPX-Messung nach für die Betone 1 und 2 signifikant lauter als die linke Radrollspur.

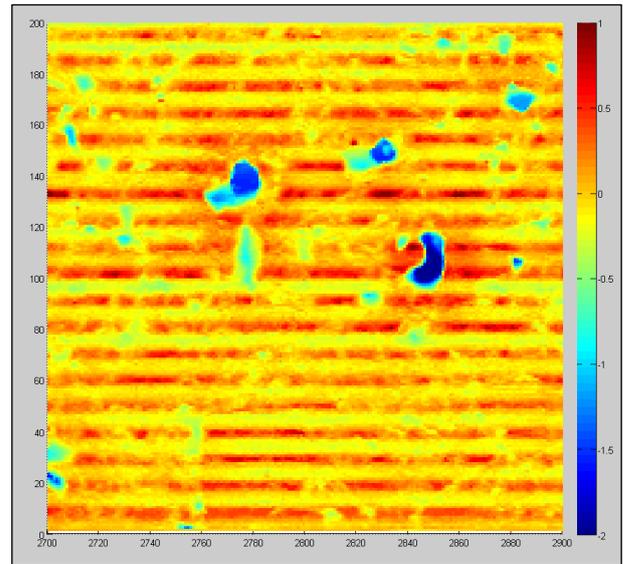
Für Beton 3 (Waschbeton mit stetiger Sieblinie) stimmen die Ergebnisse der Rollspuren im Wesentlichen überein, lediglich in Abschnitt 3-1 ergeben sich im rechten Fahrstreifen Unterschiede des CPX<sub>p</sub>-Index um 0,8 dB(A) zwischen linker und rechter Rollspur.

Auffällig ist hier die schlechte akustische Performance des Unterbetons Beton 1. Den Ergebnissen der Texturmessungen nach wurden hier durch das Grinding vereinzelt grobe Gesteinskörner aus der Betonmatrix gerissen, so dass die Zieltextur hier nicht in der erforderlichen Qualität erreicht werden konnte. Daraus ergibt sich vermutlich, dass der Einfluss des Grindingvorgangs mit relativ schnellem und leistungsstarkem Vortrieb und nur wenige Tage nach Abschluss der Betonierarbeiten auf die gesamte Festigkeit der Fahrbahndeckschicht im Allgemeinen, auf die Festigkeit der gegrindeten Schicht im Besonderen und damit auf die Qualität der fertigen Grindingtextur durchgeschlagen hat. Außerdem ist zu vermuten, dass das im Unterbeton als Grobkörnung verwendete Rundkorn deutlich schlechter in der Zementmatrix verankert ist als die gebrochene Grobkörnung, die üblicherweise im Waschbeton eingesetzt wird. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 246, Abbildung 247 und Abbildung 248 anhand der Ergebnisse der 3D-Texturmessungen verdeutlicht. Abbildung 246 zeigt die 3D-Textur für

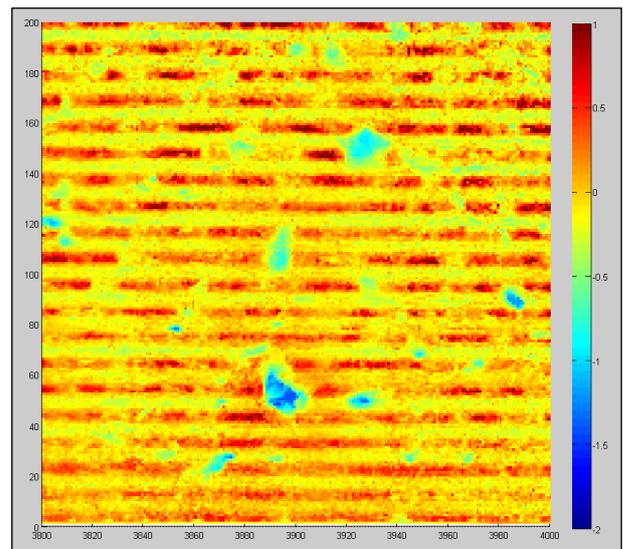
Testfeld 1.2 (Beton 1 ohne Grooving) in der Draufsicht, Abbildung 247 einen 80 x 80 mm großen Ausschnitt davon. Abbildung 248 zeigt einen gleich großen Ausschnitt der Textur von Testfeld 2.2 (Beton 2 ohne Grooving). Wie den Abbildungen entnommen werden kann, fehlen in beiden Oberflächen (Beton 1 und Beton 2 ohne Grooving) jeweils grobe Gesteinskörner, was unmittelbar zu einer Verschlechterung der Homogenität der Oberflächentextur führt. Die Tiefe der Fehlstellen ist jedoch im Fall des Unterbetons (Beton 1, Testfeld 1.2) ungleich größer. Das bedeutet, dass sich die Profilklotze des Reifens bei Auftreffen auf die Oberfläche an diesen Stellen nicht mehr flächig abstützen können. Der punktuell fehlende oder verminderte Kontakt führt in Reifenumfangsrichtung von Querschnitt zu Querschnitt zu einer permanenten starken Änderung der Kontaktgeometrie und damit zu einer Änderung der Kontaktsteife. Die zeitliche Variation der Steife führt schließlich zu einer verstärkten Anregung des Reifens zu Schwingungen. Dies gilt auch für Testfeld 2.2, wenngleich die Texturfehlstellen hier nicht so ausgeprägt sind wie bei Testfeld 1.2.



**Abbildung 246:** Ergebnis der 3D-Texturmessung für Testfeld 1.2 (Beton 1 ohne Grooving). Blau: Textur-Ausschnitt, der in Abbildung 247 im Detail dargestellt ist.



**Abbildung 247:** Ausschnitt der 3D-Textur für Testfeld 1.2 (Beton 1 ohne Grooving). X-Achse und y-Achse: 200 Punkte im Abstand von jeweils 0,4 mm. Z-Achse: -2 mm bis +1 mm.



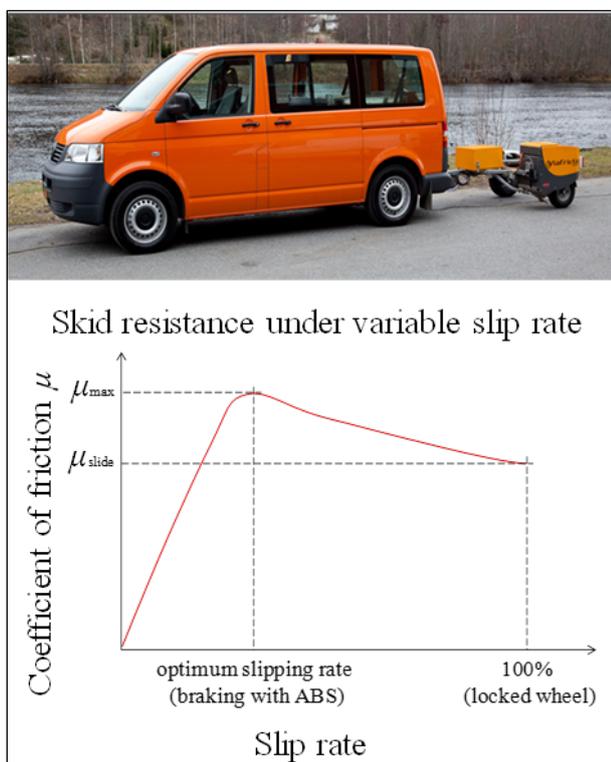
**Abbildung 248:** Ausschnitt der 3D-Textur für Testfeld 2.2 (Beton 2 ohne Grooving). X-Achse und y-Achse: 200 Punkte im Abstand von jeweils 0,4 mm. Z-Achse: -2 mm bis +1 mm.

Aufgrund der hier vorgefundenen Unterschiede der akustischen Eigenschaften der einzelnen Rollspuren können die Ergebnisse der CPB-Messungen auf der A 12 weitgehend auf die deutlich unterschiedliche Grindingsqualität der einzelnen Rollspuren zurückgeführt werden. Die für die CPB-Messungen maßgebliche rechte Rollspur des rechten Fahrstreifens weist in nahezu allen Testfeldern die höchsten  $CPX_P$ -Indizes auf, so dass die Ergebnisse der CPB-Messungen hier nicht die volle akustische Performance der mit akustischem Grinding versehenen Oberflächen widerspiegeln.

### 8.2.7.3 Griffigkeitsmessungen

#### 8.2.7.3.1 Dynamische Griffigkeitsmessungen mit dem LFC-Messverfahren ViaFriction

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden zu Analysezwecken dynamische Griffigkeitsmessungen mit dem LFC-Messverfahren ViaFriction durchgeführt. Das Verfahren bietet die Möglichkeit, den Schlupf einzustellen. Damit kann der ABS-Bremsvorgang eines Pkw-Reifens vergleichsweise realistisch simuliert werden (Abbildung 249).



**Abbildung 249:** Griffigkeitsmesssystem ViaFriction (oben) und Schlupfkurve (unten)

Das ViaFriction-Messgespann besteht aus einem Triebfahrzeug (VW Transporter T5) sowie der Messeinheit (Abbildung 249). Diese ist auf einem Messanhänger auf der rechten Seite angeordnet, so dass eine Messung der Griffigkeit in der rechten Rollspur des Triebfahrzeuges erfolgt. Durch einen vollständigen Umbau des Messanhängers könnte ggf. auch eine Messung in der linken Rollspur realisiert werden. Diese Möglichkeit wird aber im Rahmen dieses Vorhabens nicht in Anspruch genommen, da die Griffigkeit in Deutschland standardmäßig in der rechten Rollspur gemessen und bewertet wird. Der Messanhänger besteht aus zwei einzeln aufgehängten Rädern. Auf der linken Seite befindet sich der Laufreifen und auf der rechten Seite die Messeinheit mit dem Messreifen.

Das Messprinzip des ViaFriction beruht auf einem elektrisch gebremsten Rad. Das Abbremsen des

Messrades erfolgt durch eine Verbindung der Messreifenachse mit einer Umlenkwellen innerhalb der Messeinheit. An dieser Welle wird die Geschwindigkeit über eine Schlupfkupplung an einen weiteren Zahnriemen übertragen, welcher mit dem eigentlichen Bremsmechanismus bzw. einem Generator gekoppelt ist. Hierdurch kann eine Beschädigung des Bremsmechanismus durch zu starke Beschleunigungen oder Geschwindigkeiten verhindert werden, da in diesem Falle ein Durchrutschen der Schlupfkupplung erfolgt.

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

Im Rahmen eines abgeschlossenen Projektes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19 S 11002 wurde der Einfluss der Temperatur und Geschwindigkeit auf den Reibwert des ViaFriction untersucht. Es ergab sich folgende Korrekturformel:

mit:

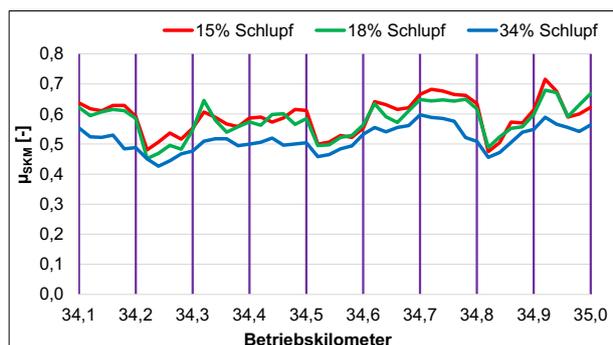
$\mu_{\text{measured}}$ :	Messwert ViaFriction [-]
TA:	Lufttemperatur in [°C]
TW:	Wassertemperatur in [°C]
v:	Fahrgeschwindigkeit in [km/h]

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

Für die Fahrbahndecke der Erprobungsstrecke A 12 (von km 34,100 bis km 35,000) wurden die Griffigkeitsmessungen bei 80 km/h mit drei verschiedenen Schlupfzustände durchgeführt:

- 15% (wie bei GripTester),
- 18% (standardisierter Schlupf für ViaFriction) und
- 34% (entspricht 20° wie bei SKM).

In Abbildung 250 sind die 20 m-Mittelwerte der drei einzelnen Messungen für jeden Schlupf dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die gemessenen Reibwerte mit zunehmendem Schlupf tendenziell verringern.



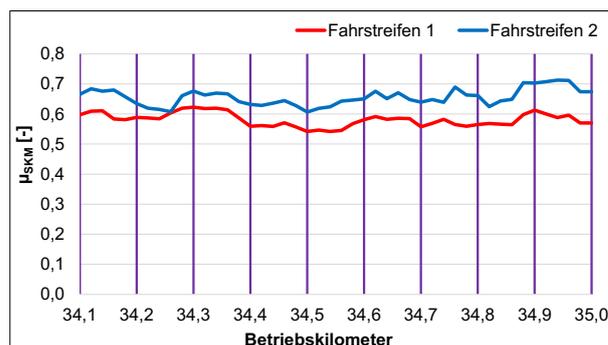
**Abbildung 250:** Griffigkeitsmessung mit ViaFriction auf der Erprobungsstrecke A 12, Abschnittsgrenzen violett

Abbildung 250 zeigt, dass die Griffigkeit nicht von den Materialeigenschaften der Betondecke (UB/WB), sondern maßgebend von der Texturgeometrie beeinflusst wird. Die Unterschiede zwischen den einzelnen 100 m-Abschnitten der Erprobungsstrecke mit verschiedenen Texturgeometrien sind gut erkennbar. Die 100 m-Abschnitte 1,2 (Bkm 34,200 - Bkm 34,300), 2,2 (Bkm 34,500 - Bkm 34,600) und 3,2 (Bkm 34,800 - Bkm 34,900) weisen relativ geringere Griffigkeiten im Vergleich zu den anderen Abschnitten auf. Das bedeutet, dass Texturvariante/Texturgeometrie 2 im Vergleich zu den Varianten/Geometrien 1 und 3 zu einem Griffigkeitsabfall führt. Hinsichtlich der Griffigkeit unterscheiden sich Texturgeometrien 1 und 3 nicht signifikant voneinander. Der Segmentabstand hat daher nur einen geringfügigen Einfluss auf das Griffigkeitsniveau der Betondecke mit Grindingtextur.

### 8.2.7.3.2 SKM aus Kontrollprüfung

Das im Unterschied zum LFC-Messverfahren ViaFriction für die ZEB und die Bauabnahme eingesetzte SKM Verfahren ist nach [TP Griff-StB (SKM)] standardisiert und wird mit genormten und geprüften Reifen durchgeführt.

Die Kontrollprüfung bei Abnahme im Rahmen des Bauvertrages nach [TP Griff-StB (SKM)] und [ZTV Beton-StB 07] wurde von der Firma PEBA Prüfinstitut für Baustoffe GmbH am 14.04.2015 mit einer Messgeschwindigkeit von 80 km/h jeweils in der rechten Rollspur des ersten und zweiten Fahrstreifens durchgeführt. Die Ergebnisse des Prüfberichtes liegen als 20 m-Mittelwerte vor und sind entsprechend der vom AN vorgenommenen Abschnittsbildung (Abbildung 214) im folgenden Diagramm (Abbildung 251) aufgetragen.



**Abbildung 251:** Griffigkeitsmessung mit SKM auf der Erprobungsstrecke A 12, Abschnittsgrenzen violett

Im ersten Fahrstreifen wurden Mittelwerte des Seitenkraftbeiwertes zwischen 0,54 und 0,61 und im zweiten Fahrstreifen zwischen 0,62 und 0,71 festgestellt. Die Kontrollprüfung wurde damit in Bezug auf die Grenzwerttoleranzen bei Abnahme bestanden.

Signifikante Unterschiede in den Messergebnissen zwischen den einzelnen 100 m-Abschnitten der Erprobungsstrecke mit verschiedenen Texturgeometrien sind hier, im Gegensatz zum LFC-Messverfahren ViaFriction (Kapitel 8.2.7.3.1) nicht erkennbar.

Ein direkter Vergleich ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen Messsysteme nicht sinnvoll.

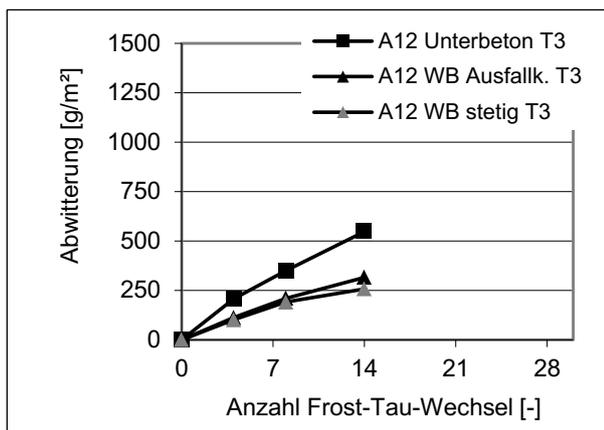
## 8.2.8 Bohrkernuntersuchungen

### 8.2.8.1 Bohrkernentnahme

Nach Beendigung des Grindings/Groovings wurden jedem der neun Abschnitte 15 Bohrkern mit  $d = 150$  mm sowie 1 Bohrkern mit  $d = 300$  mm entnommen. Alle Bohrkern wurden aus dem Standstreifen entnommen. Die Bohrkern mit  $d = 150$  mm wurden der 3., 6., 9., 12. und 15. Platte und der Bohrkern mit  $d = 300$  mm der 18. Platte des jeweiligen Abschnitts entnommen. An den Bohrkernen mit  $d = 150$  mm wurde zur Beurteilung der Texturdauerhaftigkeit der Frost-Tausalz-Widerstand mit dem CDF-Test untersucht. An den Bohrkernen mit  $d = 300$  mm erfolgt eine Verschleiß-/Polierbeanspruchung mit der Prüfanlage ARTE.

### 8.2.8.2 Frost-Tausalz-Widerstand

An den Bohrkernen mit  $d = 150$  mm wurden je Beton an drei Bohrkernen der Textur 3 der Frost-Tausalz-Widerstand der Grindingtextur in Anlehnung an den CDF-Test geprüft. Das Alter der Betone zu Prüfbeginn betrug rd. 150 Tage. Die Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln sind in Abbildung 252 dargestellt.



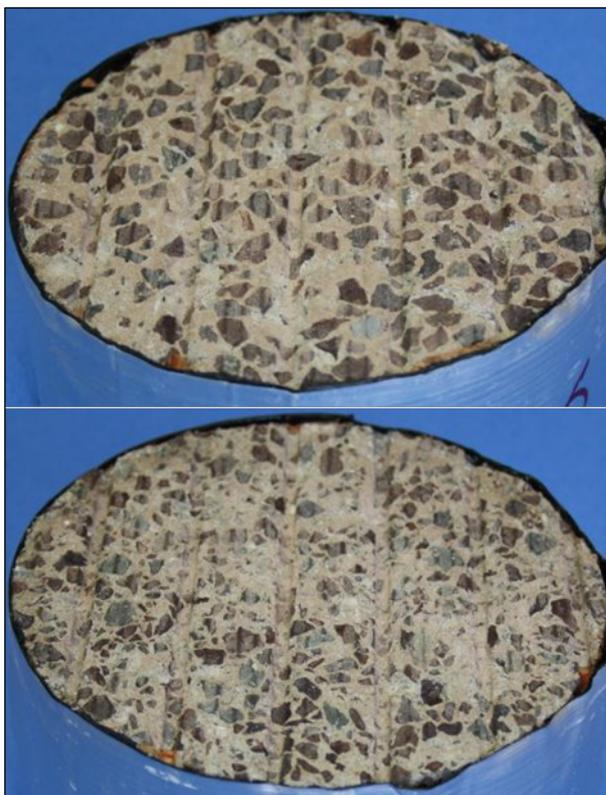
**Abbildung 252:** Abwitterungen der Bohrkerns der A 12 mit Textur 3

Die Abwitterungen der beiden Betone mit Waschbetonzusammensetzung sind vergleichbar und liegen nach 28 Frost-Tau-Wechseln mit rd. 400 g/m<sup>2</sup> deutlich unter dem Akzeptanzkriterium von 1500 g/m<sup>2</sup>. Mit rd. 900 g/m<sup>2</sup> sind die Abwitterungen des Unterbetons deutlich höher. Auf der Nahaufnahme der abgewitterten Betonoberfläche (Abbildung 253) des Unterbetons ist zu erkennen, dass neben der Betonmatrix auch eine - sonst unübliche - hohe Abwitterung der groben Gesteinskörnung vorliegt. Insbesondere die Fraktion > 16 mm ist von der Abwitterung betroffen.



**Abbildung 253:** Nahaufnahme eines Bohrkerns des Unterbetons (Textur 3) nach 28 Frost-Tau-Wechseln

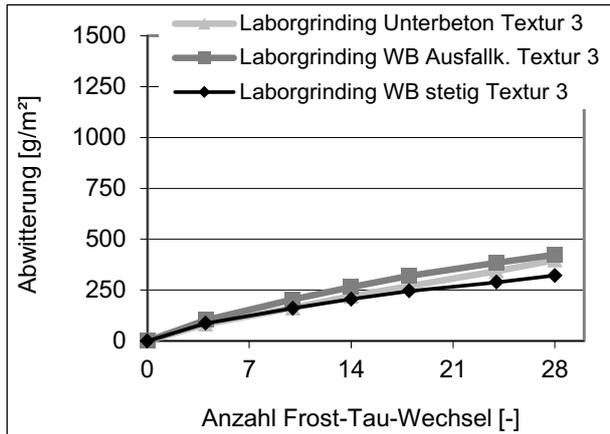
Zum Vergleich sind die Oberflächen der Betone mit Waschbetonzusammensetzung in Abbildung 254 dargestellt. Hier zeigt sich keine signifikante Abwitterung der groben Gesteinskörnung.



**Abbildung 254:** Nahaufnahme eines Bohrkerns der Betone mit Waschbetonzusammensetzung (Textur 3) nach 28 Frost-Tau-Wechseln, oben: Ausfallkörnung, unten: WB stetig

Aufgrund des Schädigungsbildes kann ausgeschlossen werden, dass die hohen Abwitterungen beim Unterbeton auf ein eventuell zu früh erfolgtes Grinding zurückzuführen sind. Durch ein zu frühes Grinding wäre in erster Linie die noch nicht ausreichend erhärtete Betonmatrix geschädigt worden, was zu erhöhten Abwitterungen innerhalb der Matrix bzw. zu einem Herauslösen grober Gesteinskörnung geführt hätte. Eine hohe Abwitterung innerhalb der groben Gesteinskörnung > 16 mm lässt sich damit jedoch nicht erklären.

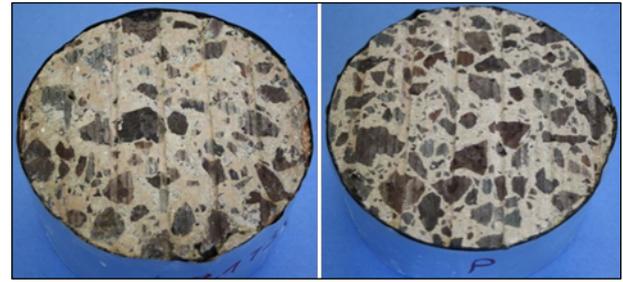
Zur Klärung der Ursache für die hohe Abwitterung des Unterbetons wurden die beim Bau der A 12 hergestellten Betonplatten (vgl. Kapitel 8.2.4) mit der Laborgrindingmaschine texturiert. Der Wellenbesatz der Grindingmaschine sowie die Abtragstiefe entsprachen dem Grinding auf der A 12. Anschließend wurden den gegrindeten Betonplatten jeweils drei Bohrkerns (d = 150 mm) entnommen und ebenfalls der Frost-Tausalz-Widerstand in Anlehnung an den CDF-Test geprüft (Abbildung 255).



**Abbildung 255:** Abwitterungen der im Labor gegrindeten Betonplatten der A 12 (Grinding mit Textur 3)

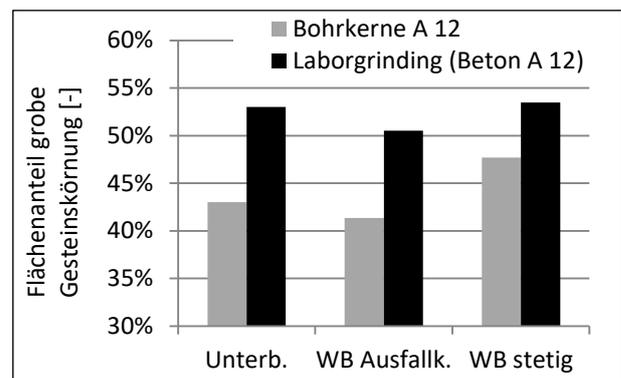
Die Abwitterungen der Betone sind vergleichbar und liegen zwischen 300 und 400 g/m<sup>2</sup>. Es zeigt sich, dass die Abwitterungen des im Labor gegrindeten Unterbetons wesentlich niedriger als die Abwitterungen des auf der A 12 gegrindeten Unterbetons sind. Es kann daher vermutet werden, dass auf der A 12 beim Grinding des Unterbetons die grobe Gesteinskörnung > 16 mm vorgeschädigt wurde. Dies hatte die hohe Abwitterung der groben Gesteinskörnung während der Frost-Tausalz-Bearbeitung zur Folge. Mögliche Ursache für die Schädigung während des Grindings ist eine erhöhte Anzahl sog. Trennflächen innerhalb der Fraktion 16/22. Diese Trennflächen sind Schwachstellen im Gesteinskorn, an denen beim Grinding Risse entstehen können, durch die beim Frost-Tausalz-Angriff die Abwitterung verstärkt wird. Bei den Betonen mit Waschbetonzusammensetzung tritt dieses Schädigungsbild nicht auf, da bei einem Größtkorn von 8 mm die Anzahl an Trennflächen wesentlich geringer ist. Beim Brechen der Gesteinskörnung auf ein Größtkorn von 8 mm bricht das Material primär in den vorhandenen Trennflächen, so dass bei geringer werdendem Größtkorn die Wahrscheinlichkeit, dass Trennflächen vorhanden sind, sinkt.

Abbildung 256 zeigt exemplarisch die Oberflächen des Unterbetons, der auf der A 12 bzw. im Labor gegrindet wurde, im Anschluss an den CDF-Test.



**Abbildung 256:** Oberfläche der Grindingprobekörper des Unterbetons nach 28 Frost-Tau-Wechseln: Links: Bohrkern aus A 12, rechts: Bohrkern aus einer Platte, die im Labor gegrindet wurde.

Augenscheinlich ist der Anteil grober Gesteinskörnung an der Oberfläche bei den im Labor gegrindeten Betonplatten höher. Dies ist damit zu begründen, dass die Verdichtung der Betonplatten auf einem Rütteltisch erfolgte und eine geringere Verdichtungsenergie vorhanden war als beim Einbau des Betons mit dem Fertiger. Durch den Fertigereinbau war somit die Mörtelschichtdicke höher als an den Betonplatten, was zur Folge hatte, dass beim Grinding des Betons auf der A 12 weniger grobe Gesteinskörnung als an den Betonplatten freigelegt wurde. Zur Quantifizierung dieses Unterschieds an grober Gesteinskörnung an den Oberflächen der Grindingtexturen wurden die Probekörperoberflächen im Anschluss an den CDF-Test fotografiert und mit Hilfe einer Computersoftware der Flächenanteil der groben Gesteinskörnung ermittelt (Abbildung 257).



**Abbildung 257:** Prozentualer Anteil der groben Gesteinskörnung auf den Grindingtexturen der untersuchten Betone (Bohrkerne aus der A 12 und im Labor gegrindete Betonplatten) nach 28 Frost-Tau-Wechseln

Es zeigt sich, dass für alle Betone an den im Labor gegrindeten Platten der Anteil grober Gesteinskörnung größer ist. Die größere Verdichtungsenergie hat somit bei allen Betonen zu einer größeren Mörtelschichtdicke geführt.

### 8.2.8.3 Verschleiß-/Polierbeanspruchung

An den Bohrkernen mit  $d = 300$  mm wurde der Verschleiß- bzw. Polierwiderstand mit der Prüfanlage ARTe untersucht. Von Abbildung 258 bis

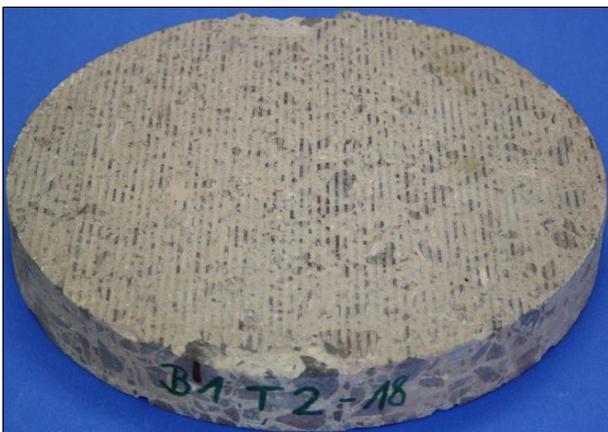
Abbildung 274 sind Fotos der Bohrkerns vor und nach der Beanspruchung dargestellt.



**Abbildung 258:** Bohrkerns ( $d = 300$  mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 1



**Abbildung 259:** Bohrkerns ( $d = 300$  mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 1



**Abbildung 260:** Bohrkerns ( $d = 300$  mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 2



**Abbildung 261:** Bohrkerns ( $d = 300$  mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 2



**Abbildung 262:** Bohrkerns ( $d = 300$  mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 3



**Abbildung 263:** Bohrkerns ( $d = 300$  mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 3



**Abbildung 264:** Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 1



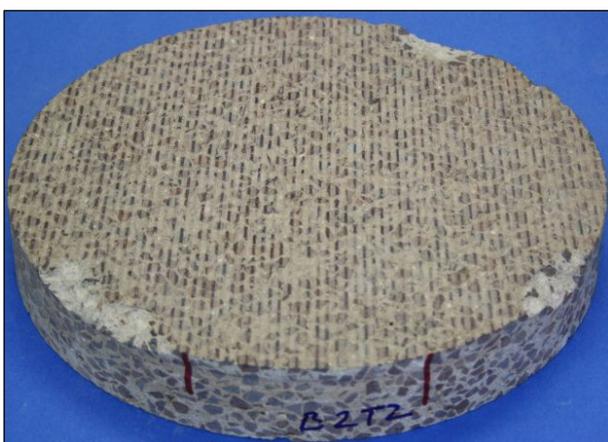
**Abbildung 267:** Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 2



**Abbildung 265:** Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 1



**Abbildung 268:** Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 3



**Abbildung 266:** Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 2



**Abbildung 269:** Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 3



**Abbildung 270:** Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 1



**Abbildung 271:** Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 1



**Abbildung 272:** Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 2



**Abbildung 273:** Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 2

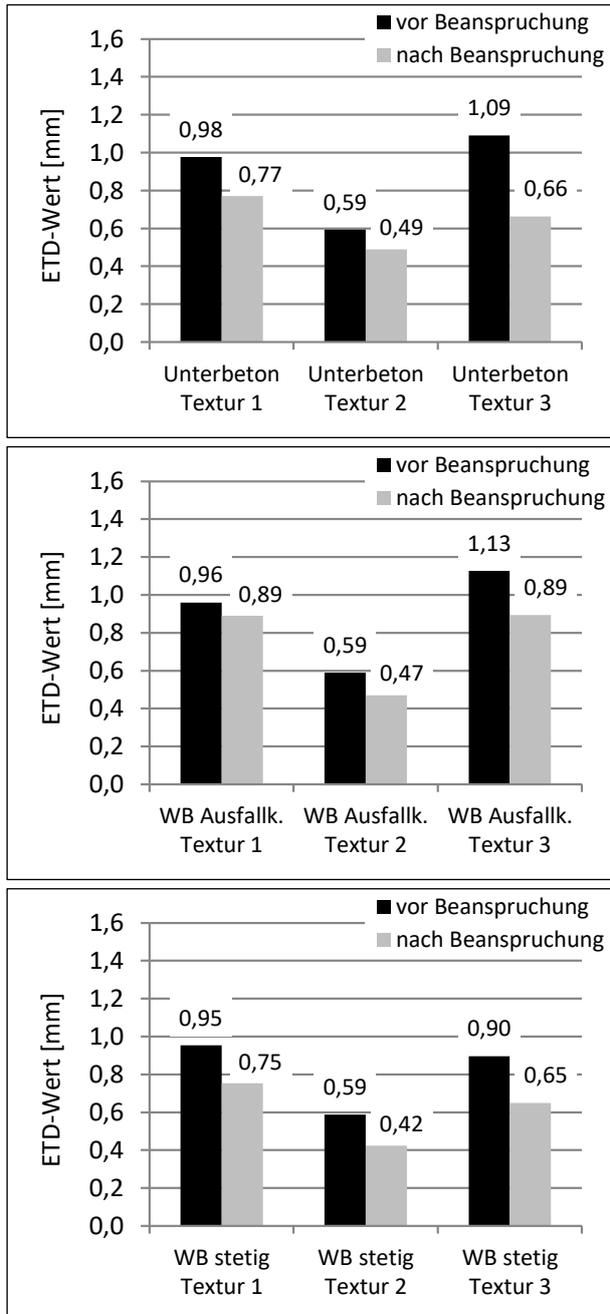


**Abbildung 274:** Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 3



**Abbildung 275:** Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 3

Die ETD-Werte der Betone vor und nach der Beanspruchung sind in Abbildung 276 dargestellt.

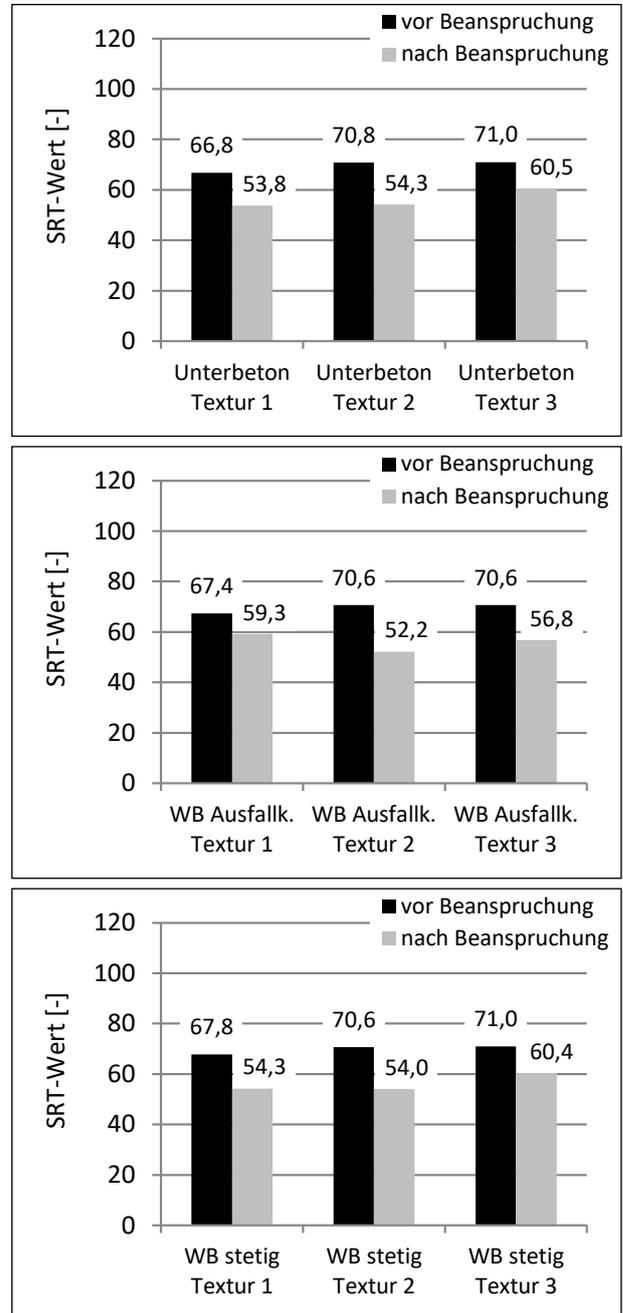


**Abbildung 276:** ETD- Werte der Bohrkerne (d = 300 mm) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe

Vor Beanspruchungsbeginn liegen die ETD-Werte zwischen rd. 0,6 und 1,1 mm. Erwartungsgemäß sind die ETD-Werte der Texturen, die ein zusätzliches Grooving beinhalten (Texturen 1 und 3), größer als die reine Grindingtextur (Textur 2). Ein Einfluss der Betonzusammensetzung auf den ETD-Wert ist nicht feststellbar. Die Texturtiefen scheinen ausreichend zu sein, um die Griffigkeit der Oberfläche sicherzustellen. Infolge der Beanspruchung nimmt bei allen Texturen der ETD-Wert ab und liegt zwischen 0,42 und 0,89 mm. Beim Beton „Waschbeton Ausfallkörnung“ ist die Abnahme der Texturtiefe in der Tendenz geringer als bei den anderen

zwei Betonen. Hier scheint die höhere Druck- bzw. Spaltzugfestigkeit des Waschbetons mit Ausfallkörnung (Abbildung 221) zu einer höheren Texturdauerhaftigkeit geführt zu haben.

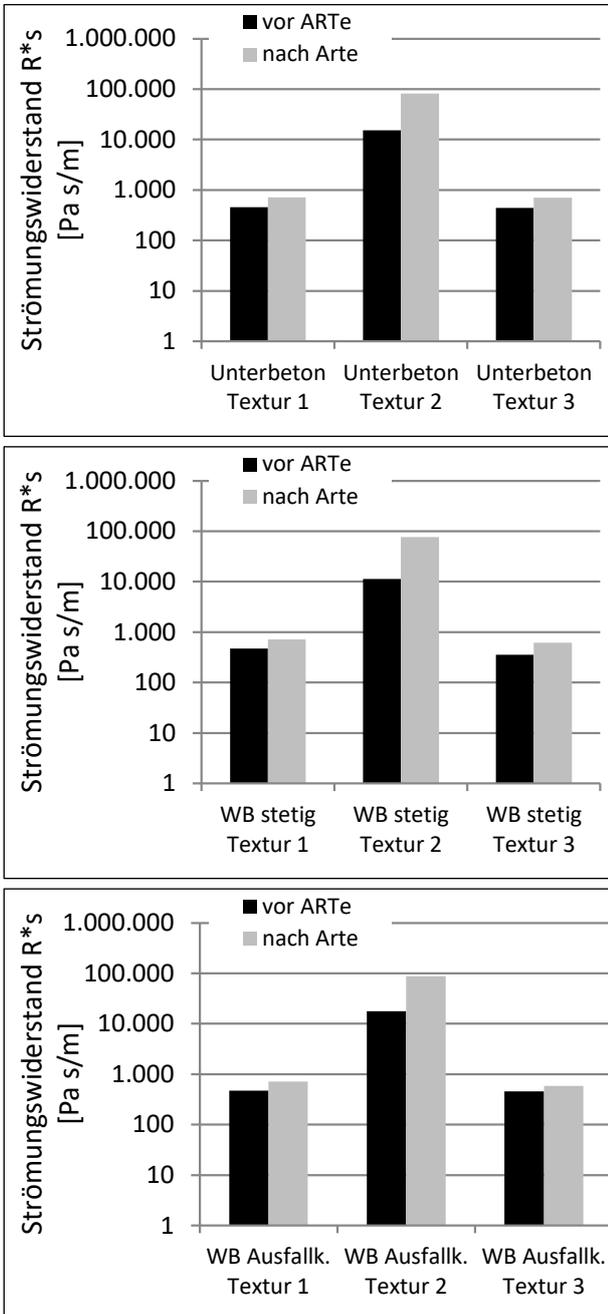
Die SRT-Werte der Betone zeigt Abbildung 277.



**Abbildung 277:** SRT- Werte der Bohrkerne (d = 300 mm) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe

Vor Beanspruchungsbeginn liegen die SRT-Werte der Betone zwischen rd. 67 und 71. Ein Einfluss der Textur bzw. der Betonzusammensetzung auf den SRT-Wert ist nicht zu beobachten. Infolge der polierenden Beanspruchung nimmt bei allen Texturen der SRT-Wert deutlich ab. Ein Einfluss der Betonzusammensetzung ist dabei nicht feststellbar. In

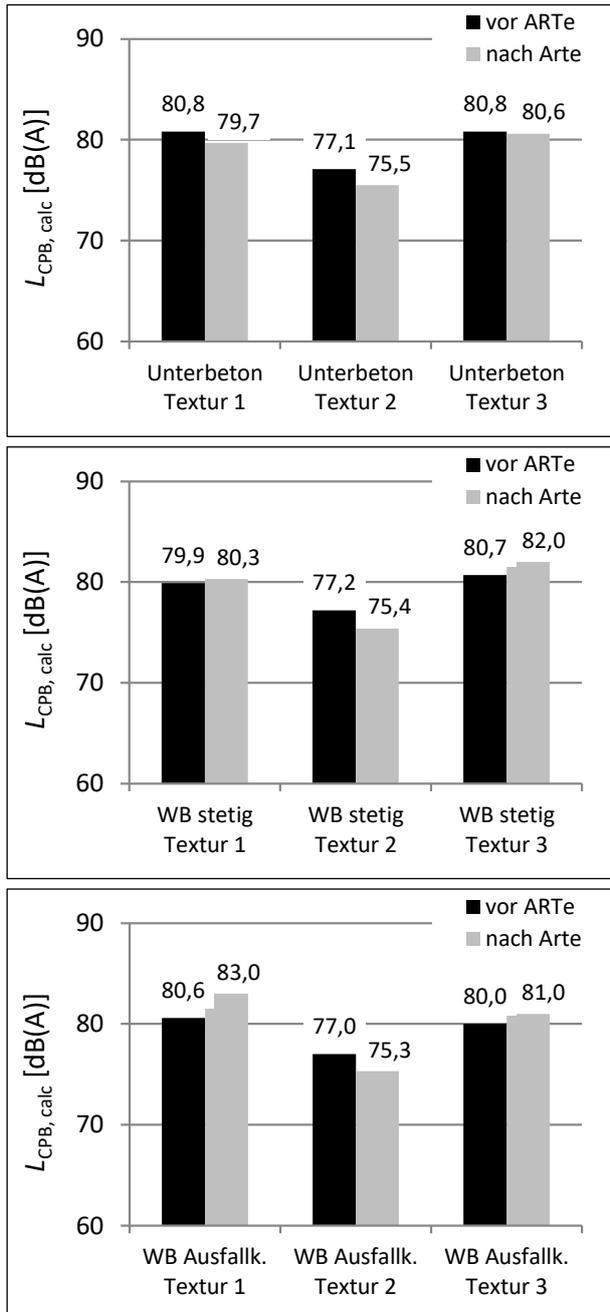
Abbildung 278 und Abbildung 279 sind die texturinduzierten Strömungswiderstände sowie die berechneten Vorbeirollpegel der Bohrkerns angegeben.



**Abbildung 278:** Texturinduzierte Strömungswiderstände der Bohrkerns (d = 300 mm) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe

Vor Beanspruchungsbeginn sind die Strömungswiderstände der Texturen mit Grooving (Textur 1 und 3) deutlich niedriger als die der reinen Grindtexturen (Textur 2). Die Groovingrillen der Texturen 1 und 3 bieten somit der Luft Kanäle, um die Textur zu durchströmen. Die Strömungswiderstände korrelieren mit den Texturtiefen aus Abbildung 276. Die Strömungswiderstände sind umso niedriger, je größer die Texturtiefe ist. Nach der Beanspruchung

findet bei allen Texturen eine Zunahme der Strömungswiderstände infolge einer Abnahme der Texturtiefe statt. Die Zunahme des Strömungswiderstands ist dabei bei den Texturen mit Grooving (Textur 1 und 3) geringer als bei Textur 2. Hier scheint das Vorhandensein der Groovingrillen die Texturtiefe zu dominieren. Trotz einer Abnahme der Texturtiefe bleibt in den Groovingrillen ausreichend Raum für die Luft zum Durchströmen der Textur. Ein Einfluss der Betonzusammensetzung ist auch nach der Beanspruchung nicht feststellbar. Ebenso ist kein Unterschied zwischen Textur 1 und 3 feststellbar.



**Abbildung 279:** Berechnete Vorbeirlpegel der Bohrkern vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: ContiEcoContact)

Vor Beanspruchungsbeginn weisen die Textur ohne Grooving (Textur 2) geringere Pegel als die Texturen mit Grooving auf (Textur 1 und 3). Dies ist auf den geringeren Strömungswiderstand von Textur 2 zurückzuführen. Nach der Beanspruchung bleiben die Pegel bei den Texturen mit Grooving nahezu gleich. Aufgrund des zunehmenden Strömungswiderstands nimmt bei Textur 2 nach der Beanspruchung der Pegel um rd. 2 dB(A) ab. Einflüsse aus der Betonzusammensetzung sind nicht feststellbar. Ebenso ist kein signifikanter Unterschied zwischen Textur 1 und Textur 3 zu beobachten.

#### 8.2.8.4 Akustische Eigenschaften

Wie in Kapitel 8.2.8.1 beschrieben, wurden an allen neun Testfeldern der A 12 Bohrkern für weitere Laboruntersuchungen entnommen. An diesen Bohrkernen wurden im Neuzustand sowie zusätzlich nach der Beanspruchung in der Prüfanlage ARTe Messungen der Oberflächentextur mit dem Laserprofilometer sowie des texturinduzierten Strömungswiderstands durchgeführt. Die verwendeten Messverfahren sind in Kapitel 3.4.2.1 (Texturmessung) und Kapitel 3.4.4.1 (Strömungswiderstand) beschrieben.

Zur vollständigen Erfassung der Oberflächentextur wurden pro Einzelmessung jeweils 102 parallele Spuren mit einem Querabstand von 1 mm aufgenommen. Die Auflösung in Längsrichtung beträgt 0,2 mm. Da die Kennwerte nach DIN ISO 13473 auf Fahrbahnoberflächen mit Grinding und ggf. Grooving nicht im Sinne einer akustischen Bewertung definiert werden können, wurde auf die Ermittlung dieser Kenngrößen verzichtet. Die gemessenen Texturprofile wurden vielmehr als Eingangsgrößen für Berechnungen mit SPERoN® herangezogen.

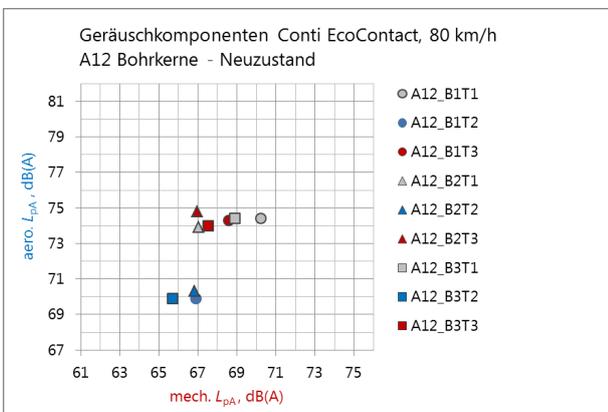
Aus den Ergebnissen der Texturmessungen wurden jeweils sechs Spuren auf den Stegen der Grindingoberfläche ausgewählt, die als Fahrbahnoberfläche in das Rechenmodell SPERoN® eingegeben wurden. Der Strömungswiderstand wurde an jeweils zwei Stellen pro Bohrkern untersucht. Aus den Ergebnissen der beiden Einzelmessungen wurde danach der Mittelwert gebildet und in das Rechenmodell eingespeist. Die Strömungswiderstandswerte der Bohrkernoberflächen im Neuzustand und nach der Beanspruchung im ARTe sind in Tabelle 43 eingetragen. Die SPERoN®-Berechnungen wurden für einen repräsentativen Reifen (Continental EcoContact) durchgeführt.

Die Bohrkernbezeichnungen A12\_BiTj weisen zuerst den Testfeldabschnitt Bi mit der Nummer i des jeweiligen Abschnitts unterschiedlicher Betonzusammensetzung aus und nachfolgend die Textur Tj mit der Nummer j der auf dem Testfeld ausgeführten Textur.

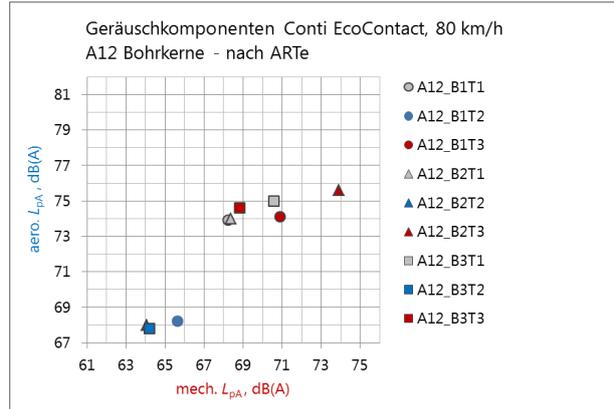
Testfeld	Bohrkern	neu	nach ARTE
1.1	B1T1	458	716
1.2	B1T2	15.283	82.124
1.3	B1T3	441	708
2.1	B2T1	471	720
2.2	B2T2	11.356	76.830
2.3	B2T3	355	610
3.1	B3T1	473	718
3.2	B3T2	17.739	87.610
3.3	B3T3	457	584

**Tabelle 43:** Mittlerer Strömungswiderstand  $R_s^*$  der Bohrkerne aus den Testfeldern der BAB A 12. Alle Werte in Pa s/m.

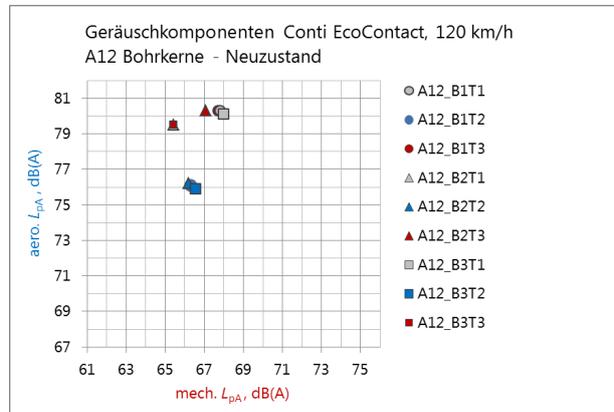
In Abbildung 280 bis Abbildung 283 sind die berechneten A-bewerteten Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der aerodynamisch (aero.) und mechanisch (mech.) induzierten Geräuschkomponenten des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs für den Reifentyp Continental EcoContact, getrennt nach den Pegelkomponenten aufgetragen. Dies gibt Aufschluss über die Gewichtung der an der Rollgeräuschentstehung beteiligten physikalischen Vorgänge und lässt Rückschlüsse auf Textureigenschaften zu. Bei der Bewertung der SPERoN®-Berechnungsergebnisse aus Texturmessungen an Probekörpern oder Bohrkerne ist jedoch zu beachten, dass auf der Grundlage von maximal 30 cm langen Texturprofilen nur eingeschränkt tragfähige Aussagen zu Vorbeifahrerpegeln getroffen werden können. Dies gilt insbesondere beim Vergleich mit Messergebnissen. Die Berechnungsergebnisse können aber auf jeden Fall Trends aufzeigen. Die mit dieser Einschränkung zu betrachtenden Ergebnisse der SPERoN®-Berechnungen sind Abbildung 280 bis Abbildung 283 zu entnehmen.



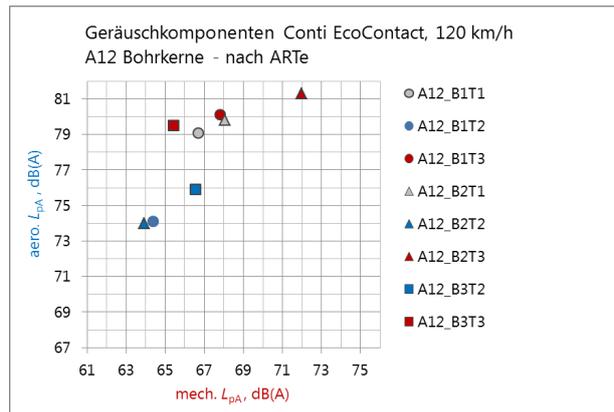
**Abbildung 280:** Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$ ,  $V = 80$  km/h, Neuzustand



**Abbildung 281:** Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$ ,  $V = 80$  km/h, nach Beanspruchung im ARTE



**Abbildung 282:** Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$ ,  $V = 120$  km/h, Neuzustand



**Abbildung 283:** Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$ ,  $V = 120$  km/h, nach Beanspruchung im ARTE

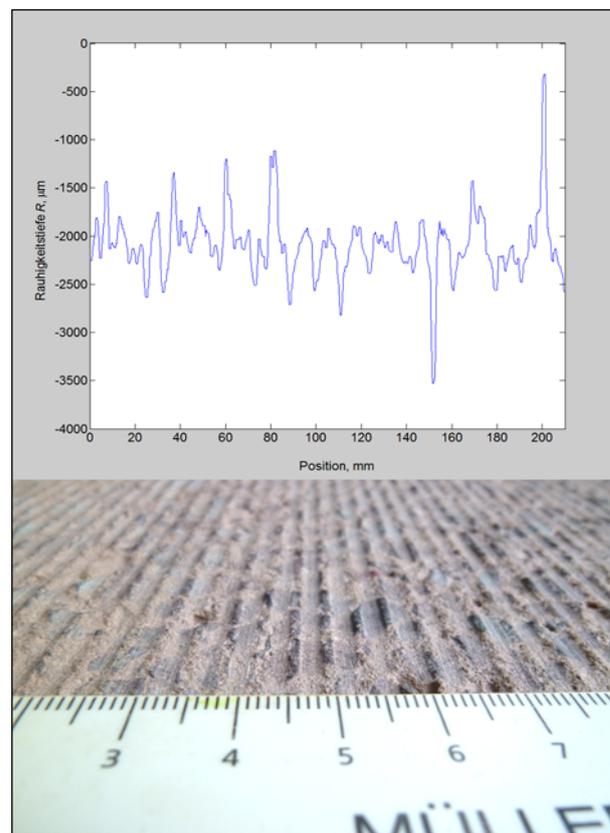
Zunächst fällt auf, dass die drei Texturierungen zu drei Clustern von Schalldruckpegeln führen. Eines der drei Cluster führt systematisch zu den niedrigsten Rollgeräuschpegeln. Bei diesem Cluster handelt es sich um die Bohrkerne mit Textur T2, also diejenigen ohne Groovingrillen. Beide Geräuschkomponenten, aber insbesondere die aerodynamische Komponente weist vergleichsweise niedrige Pegel

auf. Dies ist ein wichtiger Hinweis darauf, dass Grindoberflächen ohne Groovingrillen zu tendenziell leiseren Fahrbahnoberflächen führen als Grindoberflächen mit Groovingrillen. Dies zeichnet sich auch in den Ergebnissen der Vorbeirollpegelmessungen auf der BAB A 12 ab, die in Abbildung 243 dargestellt sind. Die Texturen T2 führen mit der einzigen Ausnahme des Messquerschnitts 32 in Kombination mit dem EcoContact-Reifen bei 80 km/h zu niedrigeren Vorbeirollpegeln als die anderen beiden Texturen mit Grooving.

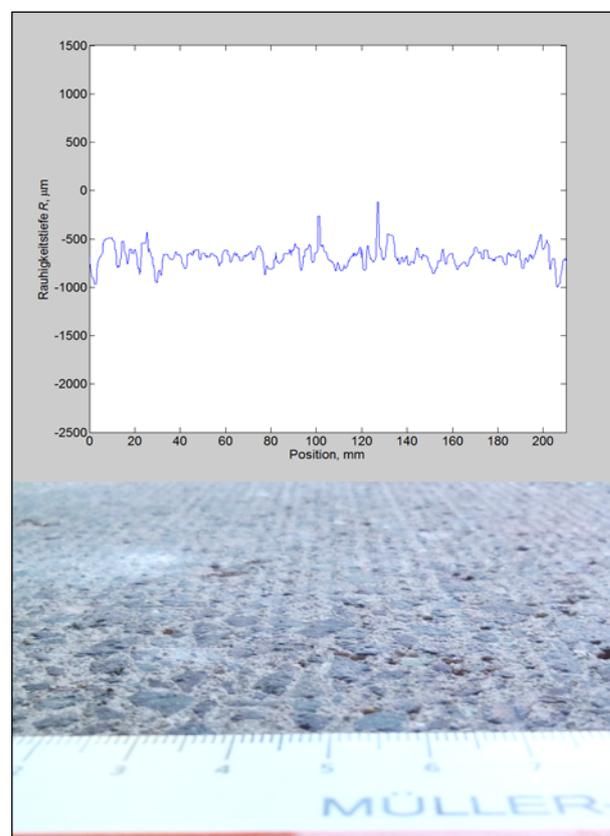
Die Oberflächen ohne Grooving verhalten sich akustisch gegenüber reifenmechanischer Beanspruchung (hier durch den Aachener Raveling Test ARTE) vorteilhafter als die Oberflächen mit Grooving. Nach der ARTE-Beanspruchung fallen die Oberflächen hinsichtlich der aerodynamischen Geräuschkomponente sogar auf ein etwas tieferes Niveau als das im Neuzustand. Mit Abnutzung der Grinding-Textur steigt der texturinduzierte Strömungswiderstand, der dann letztlich zu einem niedrigeren Schallpegel der aerodynamischen Geräuschkomponente führt. Dies ist für die Oberflächen mit Grooving nicht der Fall. Sie verharren auf demselben Niveau, da die den Strömungswiderstand bestimmenden Groovingrillen auch bei mechanischer Beanspruchung erhalten bleiben.

Hinsichtlich der mechanischen Anregung des Reifens zu schallrelevanten Schwingungen führt die mechanische Abnutzung der Oberfläche im Falle der Grindoberflächen ohne Grooving zu keiner bzw. einer leichten Verminderung der mechanischen Geräuschkomponente. Die Oberflächen verlieren an Texturtiefe, was auf der einen Seite, wie oben beschrieben, die aerodynamische Geräuschanregung vermindert, auf der anderen Seite aber - durch die Einebnung der grobrauen Grindingstege - auch die mechanische Anregung verringert.

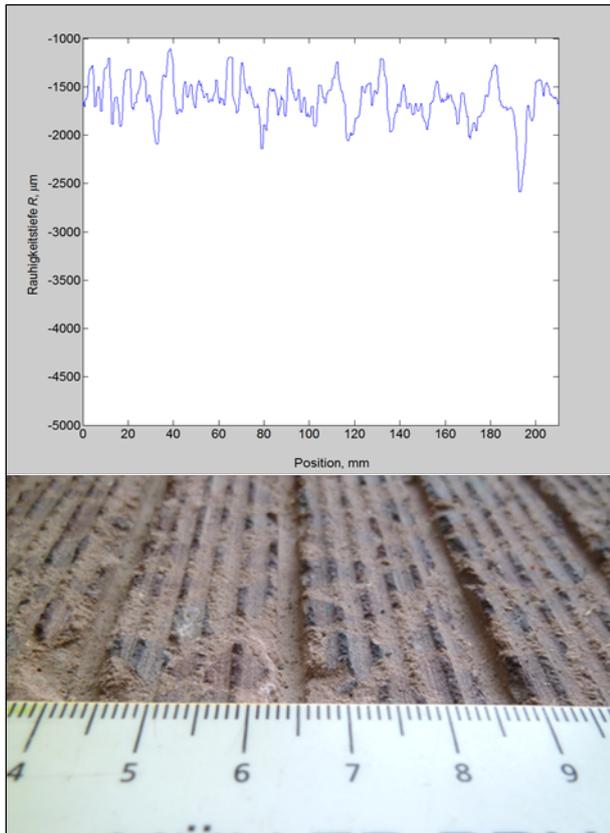
Die Grinding-Texturen mit Grooving weisen prinzipiell dasselbe Verhalten auf, mit Ausnahme der Grinding-Textur T3 mit Groovingrille auf dem Bohrkern B2T3 (Testfeld 2.3). Lasertexturprofile und Fotos der Bohrkernoberflächen B3T2 (Testfeld 3.2) und B2T3 (Testfeld 2.3) sind in Abbildung 284 bis Abbildung 287 zum direkten Vergleich dargestellt.



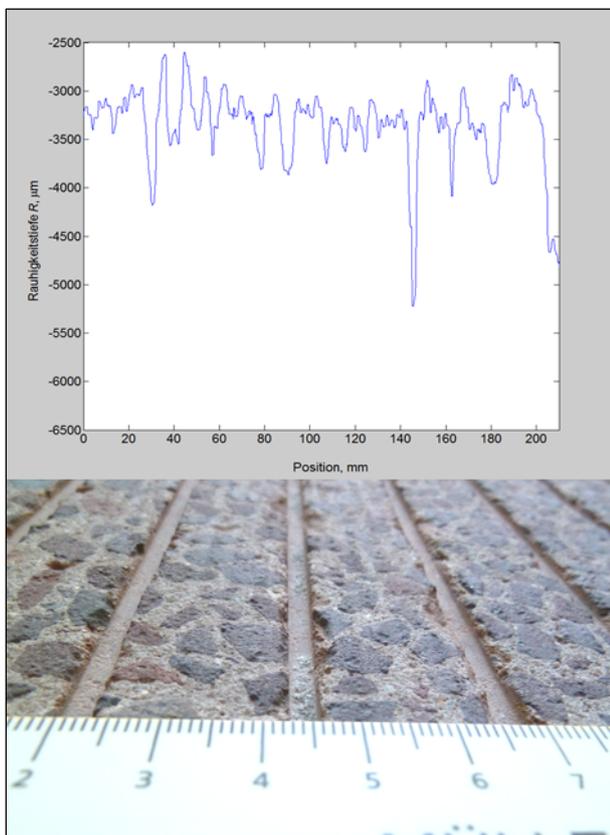
**Abbildung 284:** Texturprofil und Foto der Bohrkernoberfläche Bohrkern B3T2, Neuzustand



**Abbildung 285:** Texturprofil und Foto der Bohrkernoberfläche Bohrkern B3T2, nach der Beanspruchung im ARTE



**Abbildung 286:** Texturprofil und Foto der Bohrkerndoberfläche Bohrern B2T3, Neuzustand



**Abbildung 287:** Texturprofil und Foto der Bohrkerndoberfläche Bohrern B2T3, nach der Beanspruchung im ARTe

Die Texturprofile sind entlang der Oberfläche eines Steges der Grindingtextur aufgenommen worden. An den Profilen wird deutlich, wie die Beanspruchung im ARTe die Profil- bzw. Rauigkeitstiefe der Oberfläche des Bohrkerns B3T2 (ohne Grooving) verringert.

Die Grindingstege der Textur 3 auf Betonzusammensetzung B2 werden durch die mechanische Abnutzung im ARTe ebenfalls eingeebnet. Zurück bleibt jedoch eine Oberfläche, die große, mörtelgefüllte Lücken zwischen den Körnern der groben Gesteinskörnung aufweist. Die Gesteinskörner liegen nicht dicht gepackt, sondern verhältnismäßig weit auseinander. Die reifenmechanische Abnutzung des Materials an der Bohrkerndoberfläche wirkt offensichtlich unterschiedlich stark auf die Mörtelschicht und die Oberfläche der Gesteinskörner. Am Beispiel des Bohrkerns B2T3 ist zu sehen, dass dies zu einer grobrauen Texturierung der Oberfläche führen kann, da der Mörtel im Vergleich zu den Gesteinskörnern im ARTe tiefer abgetragen wurde. Die mittlere Profildynamik beträgt bei Bohrkern B2T3 zwischen 1.000 und 1.500 Mikrometer, bei Bohrkern B3T2 hingegen nur etwa 500 Mikrometer. Dies schlägt sich auch in den Rechenergebnissen für die Vorbeirollpegel nieder.

## 8.2.9 Grinding im Labor mit Baustellenbeton

### 8.2.9.1 Texturmessungen

Die Texturmessungen erfolgten wiederum auf Bohrkernen, die im Labor hergestellt wurden. Sie haben sich deshalb durch nichts von den in Kapitel 8.2.8.4 beschriebenen Textur- und Strömungswiderstandsmessungen unterschieden.

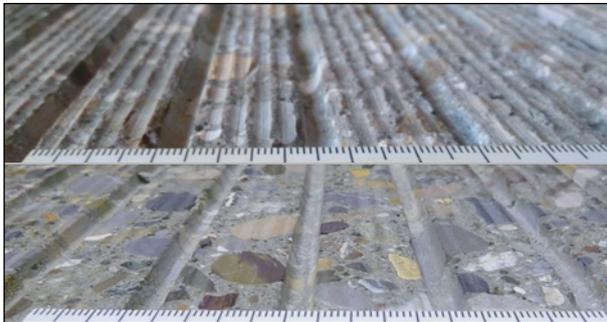
Die Strömungswiderstandswerte der Bohrkerndoberflächen sind in Tabelle 44 eingetragen.

Bohrkern	neu	nach ARTe
DS08	233	
DS16	353	
DS22	526	
HF3	169	184
UB08	308	451
UB16	325	551
UB32	269	431

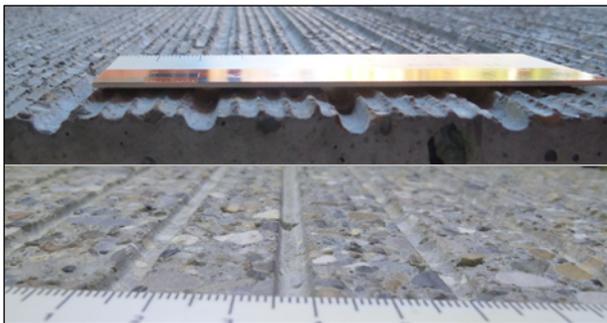
**Tabelle 44:** Mittlerer Strömungswiderstand  $R_s^*$  der Bohrkerne aus den Laborprobekörpern. Alle Werte in Pa s/m

### 8.2.9.2 Akustische Eigenschaften

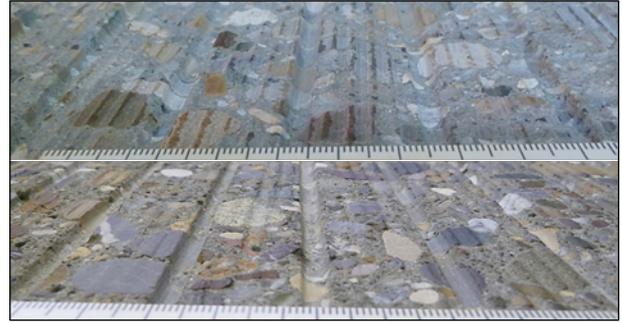
Anlass für die Herstellung von Probekörpern im Labor waren Fragestellungen zur Dauerhaftigkeit der Oberflächentextur in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung. Die akustische Optimierung der Oberflächentextur spielte in diesem Fall keine Rolle. Im Gegenteil, die Oberflächen wurden mit einem Standard-Grinding versehen, das zu verhältnismäßig grobrauen Oberflächen führt. Die auf den Bohrkernen erhobenen Texturen und Strömungswiderstände wurden dennoch in SPERoN® eingespeist, um die Widerstandsfähigkeit der Texturen gegenüber mechanischer Beanspruchung im ARTe auch aus akustischer Sicht beurteilen zu können. Abbildung 288 bis Abbildung 291 zeigt die Bohrkernoberflächen vor und nach der Beanspruchung.



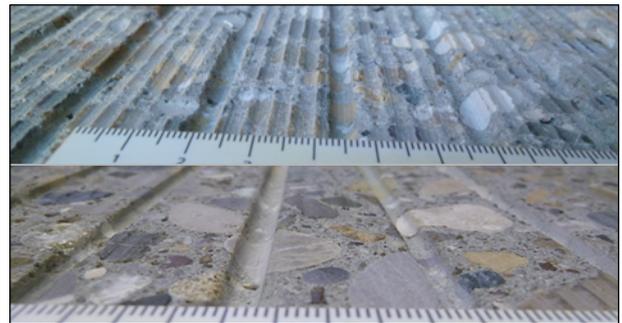
**Abbildung 288:** Fotos der Oberfläche von Probekörper HF3 vor (oben) und nach (unten) der Beanspruchung im ARTe



**Abbildung 289:** Fotos der Oberfläche von Probekörper UB08 vor (oben) und nach (unten) der Beanspruchung im ARTe

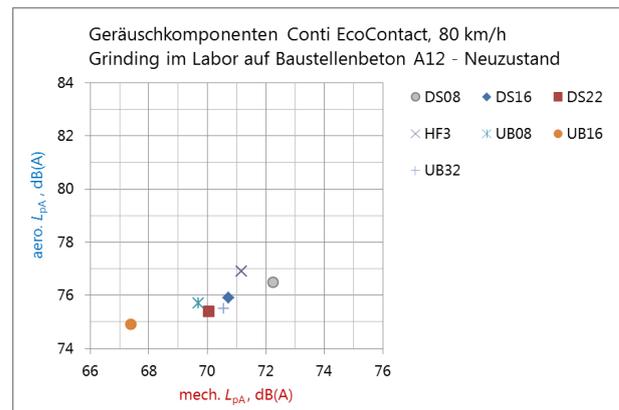


**Abbildung 290:** Fotos der Oberfläche von Probekörper UB16 vor (oben) und nach (unten) der Beanspruchung im ARTe

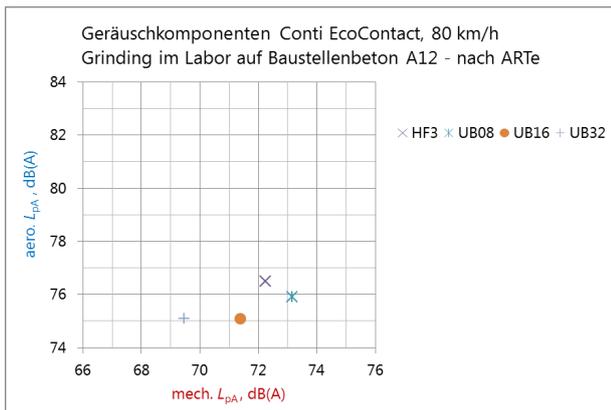


**Abbildung 291:** Fotos der Oberfläche von Probekörper UB32 vor (oben) und nach (unten) der Beanspruchung im ARTe

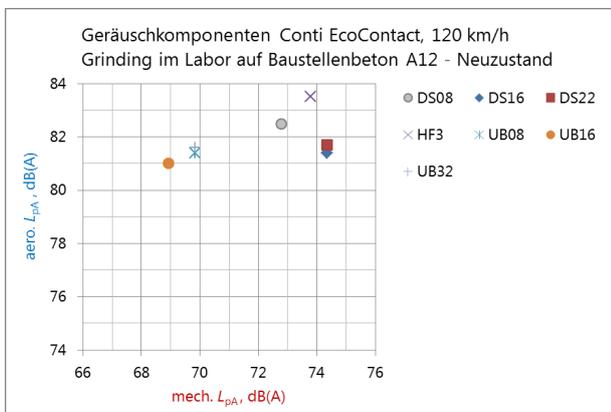
Ausgangspunkt waren wiederum Berechnungen der A-bewerteten Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der aerodynamisch (**aero.**) und mechanisch (**mech.**) induzierten Geräuschkomponenten des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs für den Reifentyp Continental EcoContact für die im Labor hergestellten Bohrkernoberflächen bei 80 km/h und 120 km/h. Die Ergebnisse sind in Abbildung 292 bis Abbildung 295 dargestellt.



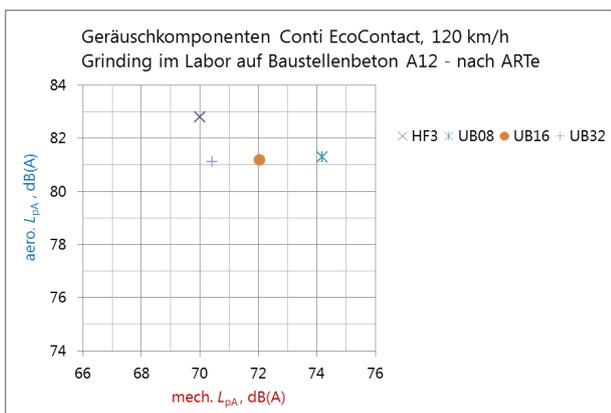
**Abbildung 292:** Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der Laborprobekörper,  $V = 80$  km/h, Neuzustand



**Abbildung 293:** Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der Laborprobekörper,  $V = 80$  km/h, nach Beanspruchung im ARTE



**Abbildung 294:** Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der Laborprobekörper,  $V = 120$  km/h, Neuzustand



**Abbildung 295:** Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der Laborprobekörper,  $V = 120$  km/h, nach Beanspruchung im ARTE

Am auffälligsten ist, dass der Zusammenhang der Rollgeräuschpegel mit dem Größtkorndurchmesser durch das Grinding, mit dem der oberflächliche Mörtelfilm entfernt und die grobe Gesteinskörnung an der Oberfläche angeschnitten wird, aufgehoben wird. Isotrop texturierte Fahrbahnoberflächen, die sich entweder durch Abstreuerung (wie bei Gussasphalt) oder Walzen (wie bei Splittmastixasphalt oder

Asphaltbeton) des Mischguts ergeben, besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Rollgeräuschpegel und Größtkorndurchmesser. Je kleiner der Größtkorndurchmesser, desto niedriger ist der Pegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche für Pkw-Reifen. Bei einer Größtkornvariation beispielsweise zwischen 11 mm und 3 mm nimmt der Rollgeräuschpegel, je nach Belagstyp, zwischen 4 dB(A) und 5 dB(A) ab [BECKENBAUER II]. Diese Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser ist hier nicht zu erkennen.

Dieser Befund bedeutet im Umkehrschluss, dass das Grindingverfahren große Spielräume für Materialauswahl und Betonzusammensetzung eröffnet. Betonzusammensetzung und Texturierung der Straßenbetonoberfläche können nahezu unabhängig voneinander optimiert werden. Betontechnologisch, um die Dauerhaftigkeit und die Wirtschaftlichkeit der Bauweise zu gewährleisten und akustisch, um rollgeräuschmindernde Oberflächen zu erzeugen.

Hinsichtlich der Auswirkungen der mechanischen Abnutzung im ARTE auf die Rollgeräuschpegel ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Die aerodynamische Geräuschkomponente bleibt nahezu unberührt von der Texturveränderung durch die Abnutzung. Dies hängt, wie bei den Bohrkernen aus der Erprobungsstrecke auf der A 12, mit den Groovingrillen zusammen, die ausnahmslos auf allen Bohrkernoberflächen vorhanden sind und den Strömungswiderstand bestimmen. Die Pegel der mechanischen Geräuschkomponente bleiben bei den Betonen HF3 und UB32 in etwa gleich, wogegen sie nach der Beanspruchung der Betone UB08 und UB16 im ARTE um bis zu 4 dB(A) zunehmen. Ob dieser Befund einen systematischen Zusammenhang zwischen mechanisch induziertem Rollgeräusch und Betonzusammensetzung aufzeigt, lässt sich anhand der sehr kleinen Stichprobe eines Probekörpers pro Beton und der begrenzten Länge der Textur nicht ableiten.

### 8.3 Erprobungsstrecke A 5

#### 8.3.1 Allgemeines

Gemeinsam mit dem Lehrstuhl und Prüfamnt für Verkehrswegebau der TU München, der in einem gesonderten Forschungsprojekt die durchgehend bewehrte Betondecke mit dünner flexibler Deckschicht untersucht, konnte im Rahmen der Fahrbahndeckenerneuerung auf der Bundesautobahn A 5 eine weitere Erprobungsstrecke in die Untersuchungen einbezogen werden.

Mit dem Regierungspräsidium Karlsruhe in Baden-Württemberg wurde in Abstimmung mit der BAST

vereinbart, dass innerhalb der geplanten Erneuerungsmaßnahme ein Abschnitt von km 609,400 bis km 610,280 als zweite Erprobungsstrecke mit verschiedenen Betonrezepturen und Grindingtexturen hergestellt werden soll.

### 8.3.2 Theoretische Vorgabe für die Grinding-Parameter

#### 8.3.2.1 Methodik

Aus den Berechnungen der zu erwartenden Vorbeibrillpegel für die Labor-Probekörper mit dem Rechenmodell SPERoN® (vgl. Abschnitt 5.6) konnten direkte Aussagen über die akustische Wirkung der im Labor realisierten Grinding-Texturen erfolgen, aufgrund derer Vorgaben für akustisch günstige Grinding-Konfigurationen gemacht wurden (vgl. Abschnitt 5.6.4).

Nach den bisherigen Erfahrungen ist diese Vorgehensweise praxisrelevanter und zielgerichteter als die Definition und theoretische Vorgabe einer Grinding-Textur, die am Bau realisiert werden soll, denn die letztgenannte Vorgehensweise müsste auch die Zufälligkeiten mit simulieren, mit der die Grinding-Texturen trotz definiertem und feststehendem Wellenbesatz und definierter Maschinenteknik am Bau entstehen. Das ist auf Basis des bisherigen Kenntnisstandes jedoch nicht annähernd möglich, weil nicht nur Werkzeug und Maschinen, sondern auch Maschinensteuerung, Betonzusammensetzung und Festigkeit an der zu grindenden Oberfläche das Grindingergebnis zufällig, aber wesentlich beeinflussen.

#### 8.3.2.2 Festlegung der Grinding-Parameter

Aus den Ergebnissen der SPERoN®-Berechnungen an Labor-Probekörpern (Abschnitt 5.6) lassen sich folgende Vorgaben für die Oberflächentexturierung auf der BAB A 5 ableiten:

- aus akustischen Gründen sind Groovingrillen zu vermeiden. Sie setzen den Strömungswiderstand herunter und führen damit gegenüber der gleichen, nicht gegroovten Oberfläche zu einer Zunahme der aerodynamischen Geräuschkomponente, aufgrund der Dominanz dieser Geräuschkomponente bei hohen Geschwindigkeiten ergibt sich damit auch eine Anhebung des Gesamtgeräuschpegels, insbesondere in dem hier vorliegenden Fall einer Autobahn;
- der Wellenbesatz des Grinding-Werkzeugs für ein akustisch optimiertes Grinding ist - zumindest den Laborergebnissen und dem Untersuchungsumfang nach - nahezu unabhängig von der Betonzusammensetzung;

- der Wellenbesatz des Grinding-Werkzeugs für ein akustisch optimiertes Grinding sollte folgendermaßen gewählt werden:

- Segmentbreite 2,4 mm bis 2,8 mm
- Distanzscheibenbreite 1,0 mm
- Stegbreite 0,6 mm
- Schneidtiefe  $\leq 4$  mm

Zu Test- und Vergleichszwecken am Bau realisierter Grinding-Texturen und zur Kalibrierung des Rechenmodells SPERoN® sollte der Wellenbesatz des Grinding-Werkzeugs für die drei Testfelder auf der BAB A 5 - vorbehaltlich griffigkeitstechnischer Anforderungen - folgendermaßen gewählt werden (Tabelle 45):

Textur	Grinding			Grooving		
	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]	Schneidtiefe [mm]	Segmentbreite [mm]	Segmentabstand [mm]	Schneidtiefe [mm]
1	2,4	0,6	4	-	-	-
2	2,8	2,2	4	-	-	-
3	2,4	0,6	2	2,8	22	4

**Tabelle 45:** Aus SPERoN® empfohlene Texturvarianten auf der Erprobungsstrecke A 5

Textur 1 ging aus den Simulationsrechnungen als leiseste Grindingtextur, Textur 3 als leiseste Groovingtextur und Textur 3 als Textur mit der größten Stegbreite hervor.

### 8.3.3 Modifizierung der Vergabeunterlagen und Erstellung eines detaillierten Ablaufplanes

Für die Erarbeitung der Vergabeunterlagen wurde gemeinsam mit dem Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau der TU München ein „Konzept Versuchsstrecke A 5 Karlsruhe – Bruchsal“ erstellt.

Auf dem für die Grindingtexturierung vorgesehenen Teil der Erprobungsstrecke werden demnach drei verschiedene Oberbetone auf vier verschiedenen Abschnitten eingebaut. Abschnitt V erhält eine durchgehend bewehrte Betondecke und Abschnitt VI wird in Plattenbauweise errichtet. Es kommt Unterbeton als Oberbeton zum Einsatz. Die Rezepturen sind in Tabelle 46 dargestellt.

Unterbeton und Oberbeton:	Anforderung
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340
Zementart	CEM I 42,5 N
NA <sub>2</sub> O-Äquivalent des Zementes [M.-%]	≤ 0,6
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	146
Wasserzementwert	0,43
Gesteinskörnung 0/32	100% gerundet
PSV-Wert Gestein für Oberbeton	≥ 50
LP-Gehalt [Vol.-%]	4
Festigkeitsklasse	C 30/37
Quantilwert Spaltzugfestigkeit [MPa]	3,5

**Tabelle 46:** Anforderungen an Betonrezeptur Abschnitt V und VI der A 5

Der Einbau erfolgt einschichtig, zweilagig. Die Dicke der Oberbetonschicht beträgt 10 cm.

Abschnitt VII wird in Plattenbauweise errichtet. Die Rezepturen von Ober- und Unterbeton sind in Tabelle 47 und Tabelle 48 enthalten.

Unterbeton:	Anforderung
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340
Zementart	CEM I 42,5 N
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	146
NA <sub>2</sub> O-Äquivalent des Zementes [M.-%]	≤ 0,6
Wasserzementwert	0,43
Gesteinskörnung 0/32	100% gerundet
LP-Gehalt [Vol.-%]	4
Festigkeitsklasse	C 30/37
Quantilwert Spaltzugfestigkeit [MPa]	3,5

**Tabelle 47:** Anforderungen an Betonrezeptur Unterbeton Abschnitt VII der A 5

Oberbeton:	Anforderung
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340
Zementart	CEM I 42,5 N
NA <sub>2</sub> O-Äquivalent des Zementes [M.-%]	≤ 0,6
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	146
Wasserzementwert	0,43
Gesteinskörnung 0/22	Grobe Gesteinskörnung zu 30% gebrochen (C <sub>90/1</sub> )
PSV-Wert	≥ 50
LP-Gehalt [Vol.-%]	4
Festigkeitsklasse	C 30/37
Quantilwert Spaltzugfestigkeit [MPa]	3,8

**Tabelle 48:** Anforderungen an Betonrezeptur Oberbeton Abschnitt VII der A 5

Der Einbau erfolgt zweischichtig, zweilagig. Die Dicke der Oberbetonschicht beträgt 7 cm.

Abschnitt VIII wird ebenfalls in Plattenbauweise errichtet. Die Rezepturen von Ober- und Unterbeton sind in Tabelle 49 und Tabelle 50 enthalten.

Unterbeton:	Anforderung
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340
Zementart	CEM I 42,5 N
NA <sub>2</sub> O-Äquivalent des Zementes [M.-%]	≤ 0,6
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	146
Wasserzementwert	0,43
Gesteinskörnung 0/32	100% gerundet
LP-Gehalt [Vol.-%]	4
Festigkeitsklasse	C 30/37
Quantilwert Spaltzugfestigkeit [MPa]	3,5

**Tabelle 49:** Anforderungen an Betonrezeptur Unterbeton Abschnitt VIII der A 5

Oberbeton:	Anforderung
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	340
Zementart	CEM I 42,5 N
NA <sub>2</sub> O-Äquivalent des Zementes [M.-%]	≤ 0,6
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	146
Wasserzementwert	0,43
Gesteinskörnung 0/16	100% gerundet
PSV-Wert	≥ 50
LP-Gehalt [Vol.-%]	4,5
Festigkeitsklasse	C 30/37
Quantilwert Spaltzugfestigkeit [MPa]	3,5

**Tabelle 50:** Anforderungen an Betonrezeptur Oberbeton Abschnitt VIII der A 5

Der Einbau erfolgt zweischichtig, zweilagig. Die Dicke der Oberbetonschicht beträgt 7 cm.

Folgende Randbedingungen an den Betondecken-einbau wurden im Konzept aufgenommen:

- Zur Vermeidung von Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion sind die Regelungen des Allgemeinen Rundschreibens Straßenbau Nr. 04/2013 prinzipiell zu beachten. Die Versuchsdurchführung ist jedoch wie folgt anzupassen:
  - Eine AKR-Performance-Prüfung mit 100% Kies
  - Eine AKR-Performance-Prüfung mit 50% gebrochenem Kies
  - Herstellung einer Platte mit l x b x h = 400 mm x 350 mm x 80 mm und Lieferung an das Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München für eine spezielle AKR-Prüfung mit Grindingtextur
- Es ist ein Nachweis für den Polierwert ≥ 50 der groben Gesteinskörnung des Oberbetons zu führen und zu liefern, sowohl für gebrochenen Kies als auch für nicht gebrochenen Kies.
- Zwischen den Abschnitten V, VI, VII und VIII sind zur genauen Abgrenzung der Betonrezepturen Tagesansätze anzuordnen. Die verminderte Tagesleistung beträgt jeweils 260 m.
- Um noch kleine mögliche Unebenheiten durch den Längsglätter ausgleichen zu können, sollte auf den Abschnitten V, VI, VII und VIII eine Jute-tuchtextur hergestellt werden.
- Für die Fahrbahndecke ist ein Nachbehandlungsmittel mit erhöhtem Hellbezugswert zu verwenden. Das Aufbringen eines Oberflächenverzögerers entfällt.
- Infolge ungünstiger Ebenheitsvoraussetzungen für die hier angestrebte Lärmoptimierung kann ein vorab durchzuführendes Ebenheitsgrinding

notwendig werden. Die damit verbundenen höheren Kosten sind zu berücksichtigen.

- Das Grinding der Betonoberflächen erfolgt ca. sechs Wochen nach der Betondeckenherstellung. Die Dauer der Grindingarbeiten beträgt ca. 5 Tage.
- Das Grinding erfolgt nach dem Schneiden des Kerbschnittes der Fugen.

Auf den vier Abschnitten der Erprobungsstrecke der A 5 kamen nach kritischer Abwägung der theoretischen Berechnungen in Kapitel 8.3.2 hinsichtlich der Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und die zu erzielende Griffigkeit der Texturen drei verschiedene Grindingvarianten zum Einsatz (Abbildung 296 und Abbildung 297).

Abschnitt V km 609,400 - 609,500 Rundkorn GK 32 mm Ober- und Unterbeton	Abschnitt VI km 609,500 - 609,760 Rundkorn GK 32 mm Ober- und Unterbeton			Abschnitt VII km 609,760 - 610,020 Oberbeton GK 22 mm zu 35% gebrochen			Abschnitt VIII km 610,020 - 610,280 Rundkorn GK 16 mm als Oberbeton		
100 m	85 m	85 m	90 m	85 m	85 m	90 m	85 m	85 m	90 m
Textur 1	Textur 1	Textur 2	Textur 3	Textur 3	Textur 2	Textur 1	Textur 1	Textur 2	Textur 3

**Abbildung 296:** Oberbetone und Texturen der Erprobungsstrecke A 5

Textur	Grinding			Grooving		
	Segmentbreite	Segmentabstand	Rillentiefe	Segmentbreite	Segmentabstand	Rillentiefe
Textur 1	2,0 mm	1,0 mm	Anschleifen der	-	-	-
Textur 2	2,0 mm	1,0 mm	groben GK	2,4 mm	21,0 mm	3,0 mm
Textur 3	2,4 mm	1,4 mm		-	-	-

**Abbildung 297:** Texturgeometrie der Erprobungsstrecke A 5

Bei der Textur 2 handelt es sich um eine Kombination aus Grinding und Grooving. Textur 1 und 3 ist eine reine Grindingtextur.

Textur 1 wird wegen dem geringen Segmentabstand zu einer sehr feinen Ausbildung der Stege führen. Um Griffigkeitsprobleme zu vermeiden, muss dafür eine hohe Polierresistenz der verwendeten Gesteine gewährleistet werden.

Bei den auf der A 5 eingesetzten Kiesen könnte es zu Problemen mit der Polierresistenz und damit der Griffigkeit kommen.

Zur Beobachtung der gegrindeten Streckenabschnitte sollten deshalb in kurzen Abständen Griffigkeitsmessungen durchgeführt werden.

Kommt es zu einer Verschlechterung der Griffigkeitswerte, so sollte man sich bei der Textur 1 vorbehalten, die betreffenden Streckenabschnitte zusätzlich mit einer Groovingtextur zu versehen.

Die Betonage der für das Grinding vorgesehenen Streckenabschnitte fand an drei aufeinander folgenden Tagen statt:

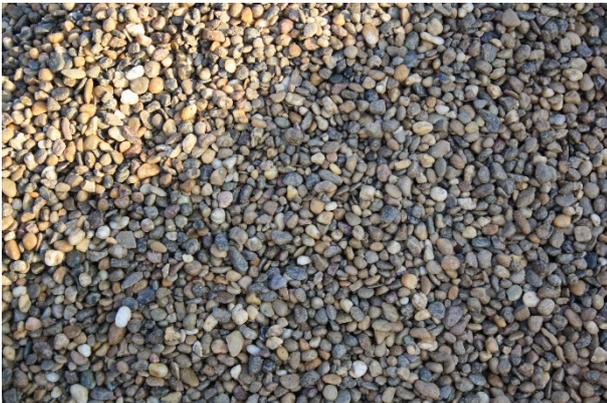
- 19.10. unbewehrt, OB 16er Größtkorn Kies (Abschnitt VIII)
- 20.10. unbewehrt, OB 22er Größtkorn 30% gebrochen (Abschnitt VII)
- 21.10. unbewehrt, OB 32er Größtkorn Kies (Abschnitt VI)

Der Beginn der Betonierarbeiten bei km 610,280 ist in Abbildung 298 zu sehen.



**Abbildung 298:** Beginn der Betonierarbeiten bei km 610,280

Abbildung 299 zeigt die eingesetzte runde Gesteinskörnung.



**Abbildung 299:** Runde Gesteinskörnung

Die für das Grinding vorgesehenen Abschnitte verschiedener Betonrezepturen sollten durch Tagesansätze an den vorgegebenen Stationen getrennt werden. Abbildung 300 zeigt den Beginn von Abschnitt VII bei km 610,020.



**Abbildung 300:** Tagesansatz zwischen Abschnitt VIII und VII

Die Oberfläche des Betons wurde mit einer Kunst-  
rasentextur versehen, um bei eventuellen Verzögerungen des Grindingvorgangs eine den Griffigkeitsanforderungen genügende Fahrbahnoberfläche herzustellen (Abbildung 301).



**Abbildung 301:** Übergangsweise Kunstrasentextur der Fahrbahnoberfläche

### 8.3.4 Probekörperherstellung und Frischbetonprüfung

Für jeden Beton wurden sechs Würfel (150 mm), 12 Zylinder ( $d = 100 \text{ mm}$ ,  $h = 200 \text{ mm}$ ) sowie zwei Platten ( $L \times B \times H = 400 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ ) hergestellt. Die Probekörper lagerten nach der Herstellung abgedeckt mit Folie auf der Mischanlage im Freien. Nachdem sie erhärtet waren, wurden sie ans cbm der TU München transportiert. Dort lagern sie bis zu den Prüfterminen ebenfalls im Freien. Die Lagerung im Freien soll näherungsweise Aufschluss darüber geben, welche Festigkeiten der Fahrbahndeckenbeton zum Zeitpunkt der Prüfung aufweist. Es werden die Druckfestigkeiten gemäß [DIN EN 12390-3] und Spaltzugfestigkeiten gemäß [AL Sp-Beton] nach 28 Tagen sowie zum Zeitpunkt des Grindings ermittelt. Die hergestellten Platten werden mit der Laborgrindingmaschine texturiert. Die Texturen entsprechen ausgewählten Texturen der Erprobungsstrecke. An dem Beton, mit dem die

Probekörper hergestellt wurden, wurden die Frischbetoneigenschaften Temperatur, Konsistenz und Luftporengehalt bestimmt (Tabelle 51).

	Abschnitt V, VI, 100% Rundkorn, GK 32 mm	Abschnitt VII, 30% gebrochen, GK 22 mm	Abschnitt VIII, 100% Rundkorn, GK 16 mm
Betontemperatur [°C]	22,0	19,1	18,9
Verdichtungsmaß [-]	1,21	1,30	1,33
LP-Gehalt [Vol.-%]	5,0	4,0	3,8

**Tabelle 51:** Frischbetoneigenschaften der Oberbetone zum Zeitpunkt der Probekörperherstellung

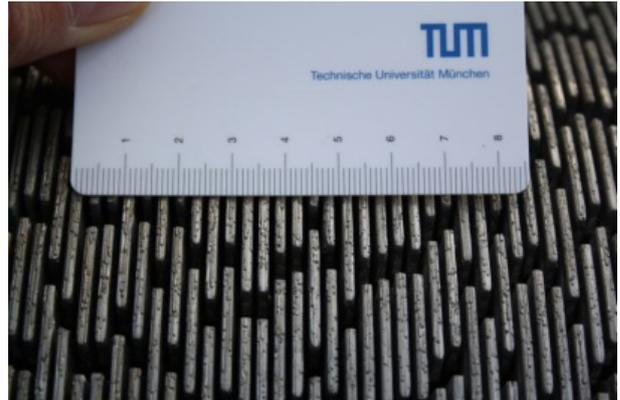
### 8.3.5 Herstellung zielsicherer Texturen mit optimierten Gebrauchs- und Substanzeigenschaften

Wie auch auf der Erprobungsstrecke auf der A 12 wurde vor Beginn des Grindings der lärmtechnisch optimierten Texturen ein Ebenheitsgrinding folgendem Wellenbesatz durchgeführt: Segmentbreite: 2,8 mm, Segmentabstand: 2,2 mm. Der Beton hatte zu diesem Zeitpunkt ein Alter von rd. 38 Tagen. Das Grinding/Grooving der Texturen 1 bis 3 erfolgte mit der Maschine G-Rex des Projektpartners OAT (Abbildung 302).



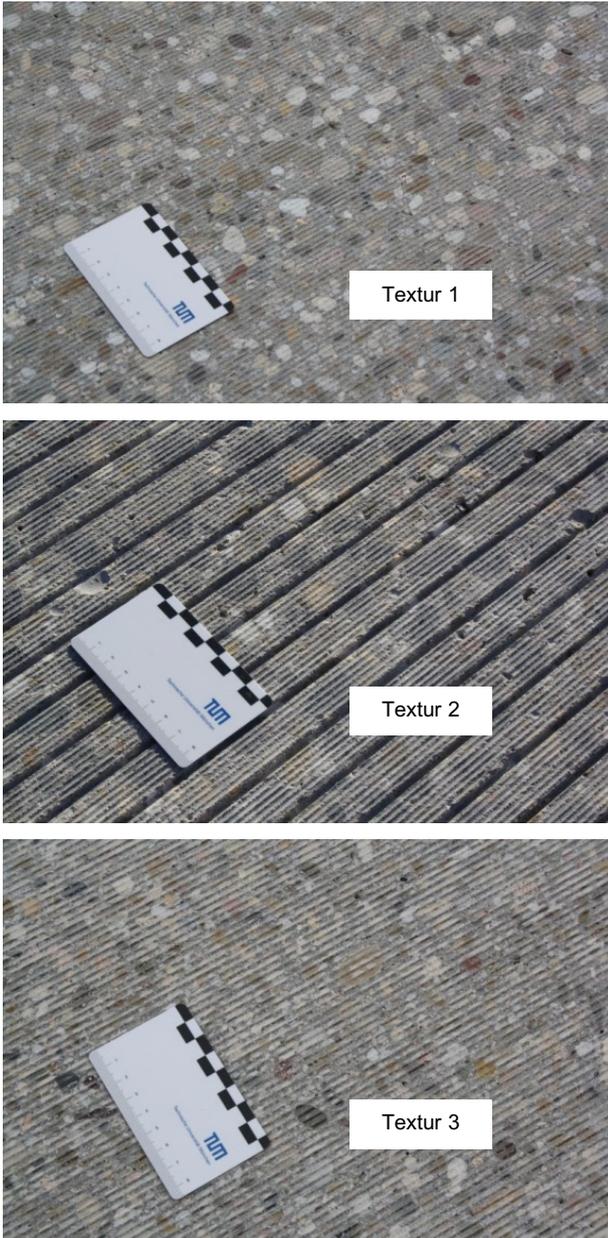
**Abbildung 302:** Grinding auf der Erprobungsstrecke A 5

Anders als auf der A 12 wurde auf der A 5 die Textur mit zusätzlichen Groovingrillen nicht in einem, sondern in zwei Arbeitsgängen hergestellt. Im ersten Arbeitsgang erfolgte das Grinding und im zweiten Arbeitsgang wurden die Groovingrillen in den Beton geschnitten (Abbildung 303).



**Abbildung 303:** Wellenbesatz für Textur 2: oben: Grinding, unten: Grooving

Das Alter der Betone betrug zum Zeitpunkt des Grindings der Texturen 1 bis 3 rd. 43 Tage. In Abbildung 304 sind Fotos der Texturen am Beispiel des Betons „Rundkorn GK 16 mm im Abschnitt VIII dargestellt.

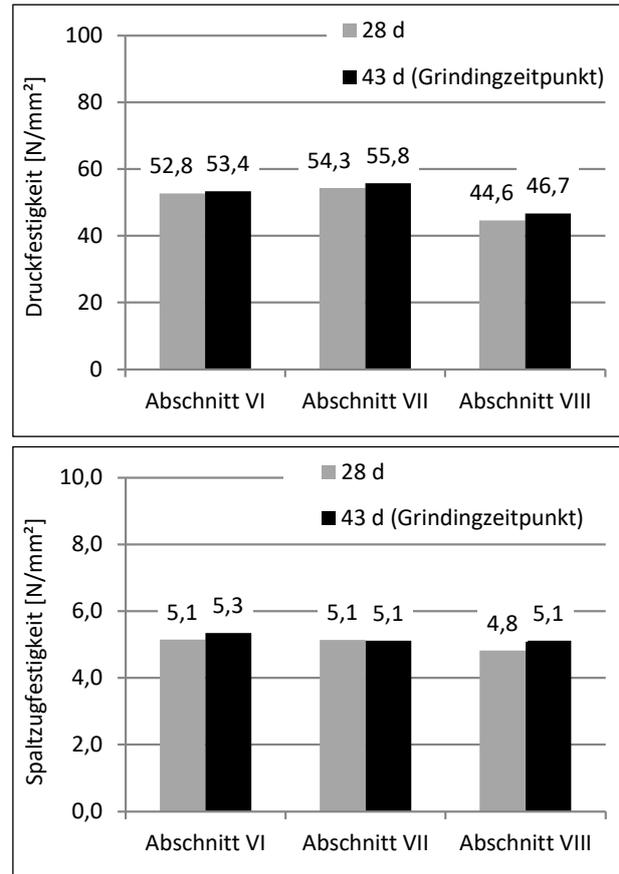


**Abbildung 304:** Texturgeometrien am Beispiel des Betons „Rundkorn GK 16 mm“ im Abschnitt VIII

Die Texturen wiesen im Anschluss an das Grinding die gewünschte Geometrie auf. Betonausbrüche in den Rillen der Groovingtextur, wie sie teilweise auf der Erprobungsstrecke der A 12 auftraten, wurden nicht festgestellt. Somit scheint auf der A 5 der Beton eine ausreichende Festigkeit vorgelegen zu haben, um die Texturen zielsicher einzuschneiden. Es wurde lediglich festgestellt, dass infolge des Groovingvorgangs vereinzelt Gesteinskörner aus der Matrix herausgelöst wurden (Abbildung 304 Mitte). Bei der herausgelösten Gesteinskörnung handelte es sich insbesondere um plattiges bzw. gerundetes Material.

### 8.3.6 Festbetonprüfungen an Würfeln und Zylindern

In Abbildung 305 sind die Druck- und Spaltzugfestigkeiten der auf der Baustelle hergestellten Würfel und Zylinder nach 28 und nach 43 Tagen (Alter zum Zeitpunkt des Grindings) angegeben. Die Proben lagerten bis zur Prüfung im Freien, um eine Festigkeitsentwicklung zu erreichen, die näherungsweise dem Fahrbahndeckenbeton entspricht.



**Abbildung 305:** Mittelwerte der Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone der Erprobungsstrecke A 5: Abschnitt VI: 100% Rundkorn mit Größtkorn 32 mm, Abschnitt VII: 30% gebrochene Gesteinskörnung mit Größtkorn 22 mm, Abschnitt VIII: 100% Rundkorn mit Größtkorn 16 mm

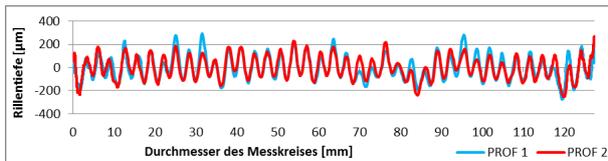
Die Druckfestigkeiten der Betone liegen nach 28 Tagen zwischen rd. 45 und 54 MPa und sind zum Zeitpunkt des Grindings jeweils um rd. 2 MPa höher. Die Spaltzugfestigkeiten liegen nach 28 Tagen bei allen Betonen bei rd. 5 MPa. Zum Zeitpunkt des Grindings nehmen die Spaltzugfestigkeiten ebenfalls geringfügig zu. Die Druck- wie auch die Spaltzugfestigkeiten liegen zum Zeitpunkt des Grindings somit deutlich über denen der A 12 zum Zeitpunkt des Grindings nach rd. sieben Tagen (Abbildung 221). Die höheren Festigkeiten auf der A 5 scheinen somit ursächlich für die bessere Texturgeometrie zu sein.

### 8.3.7 Beschreibung der Grindingtexturen sowie Nachweis der Homogenität auf der Erprobungsstrecke

#### 8.3.7.1 Texturmessungen mit dem Messgerät ELAtextur

In Abbildung 306 bis Abbildung 325 sind die Laserprofile und Fotos der Texturen sowie in Tabelle 52 bis Tabelle 61 die statistischen Kennwerte jedes einzelnen Testfeldes dargestellt.

#### A 5, Testfeld V-1, Abschnitt V, Textur 1



**Abbildung 306:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld V-1

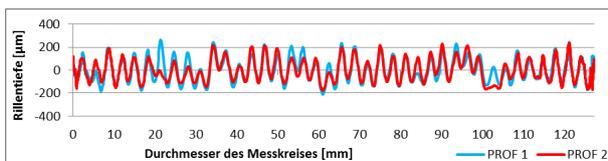


**Abbildung 307:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld V-1

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld V-1
MPD-Mittelwert [mm]	0,27
Standardabweichung [mm]	0,05
Variationskoeffizient [%]	19,68
MPD-Minimalwert [mm]	0,18
MPD-Maximalwert [mm]	0,48

**Tabelle 52:** Texturkennwerte A 5, Testfeld V-1

#### A 5, Testfeld VI-1, Abschnitt VI, Textur 1



**Abbildung 308:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VI-1

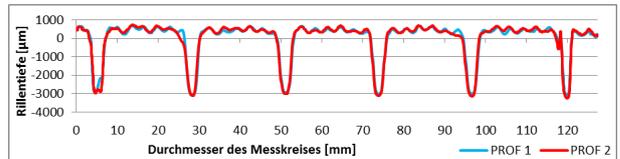


**Abbildung 309:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VI-1

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VI-1
MPD-Mittelwert [mm]	0,28
Standardabweichung [mm]	0,04
Variationskoeffizient [%]	13,31
MPD-Minimalwert [mm]	0,20
MPD-Maximalwert [mm]	0,37

**Tabelle 53:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VI-1

#### A 5, Testfeld VI-2, Abschnitt VI, Textur 2



**Abbildung 310:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VI-2

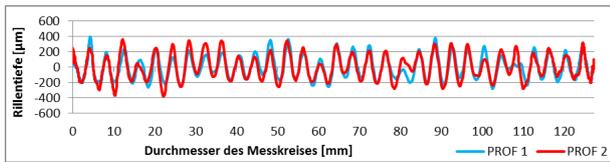


**Abbildung 311:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VI-2

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VI-2
MPD-Mittelwert [mm]	0,80
Standardabweichung [mm]	0,13
Variationskoeffizient [%]	15,96
MPD-Minimalwert [mm]	0,58
MPD-Maximalwert [mm]	1,17

**Tabelle 54:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VI-2

**A 5, Testfeld VI-3, Abschnitt VI, Textur 3**



**Abbildung 312:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VI-3

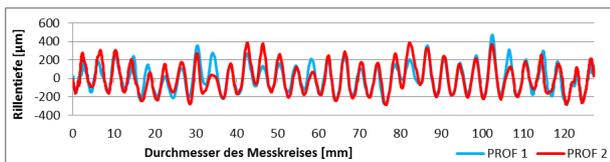


**Abbildung 313:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VI-3

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VI-3
MPD-Mittelwert [mm]	0,39
Standardabweichung [mm]	0,05
Variationskoeffizient [%]	11,66
MPD-Minimalwert [mm]	0,31
MPD-Maximalwert [mm]	0,56

**Tabelle 55:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VI-3

**A 5, Testfeld VII-3, Abschnitt VII, Textur 3**



**Abbildung 314:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VII-3

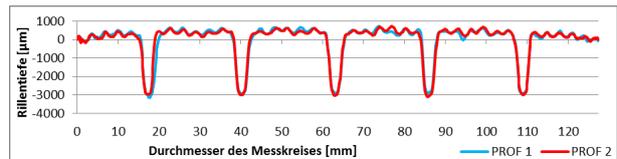


**Abbildung 315:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VII-3

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VII-3
MPD-Mittelwert [mm]	0,41
Standardabweichung [mm]	0,04
Variationskoeffizient [%]	10,89
MPD-Minimalwert [mm]	0,33
MPD-Maximalwert [mm]	0,53

**Tabelle 56:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VII-3

**A 5, Testfeld VII-2, Abschnitt VII, Textur 2**



**Abbildung 316:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VII-2

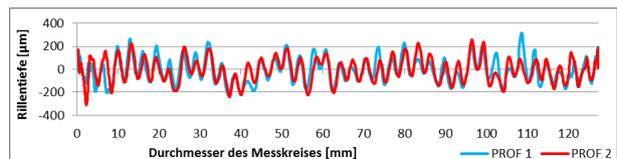


**Abbildung 317:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VII-2

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VII-2
MPD-Mittelwert [mm]	0,75
Standardabweichung [mm]	0,15
Variationskoeffizient [%]	20,38
MPD-Minimalwert [mm]	0,50
MPD-Maximalwert [mm]	1,24

**Tabelle 57:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VII-2

**A 5, Testfeld VII-1, Abschnitt VII, Textur 1**



**Abbildung 318:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VII-1

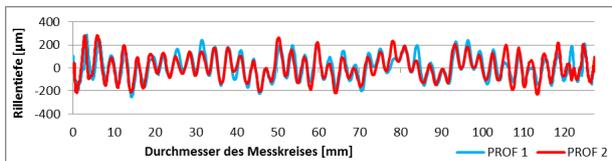


**Abbildung 319:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VII-1

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VII-1
MPD-Mittelwert [mm]	0,27
Standardabweichung [mm]	0,04
Variationskoeffizient [%]	15,69
MPD-Minimalwert [mm]	0,20
MPD-Maximalwert [mm]	0,39

**Tabelle 58:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VII-1

A 5, Testfeld VIII-1, Abschnitt VIII, Textur 1



**Abbildung 320:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VIII-1

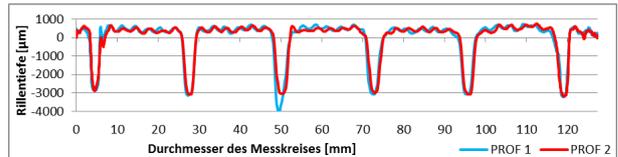


**Abbildung 321:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VIII-1

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VIII-1
MPD-Mittelwert [mm]	0,28
Standardabweichung [mm]	0,05
Variationskoeffizient [%]	19,58
MPD-Minimalwert [mm]	0,00
MPD-Maximalwert [mm]	0,41

**Tabelle 59:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VIII-1

A 5, Testfeld VIII-2, Abschnitt VIII, Textur 2



**Abbildung 322:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VIII-2

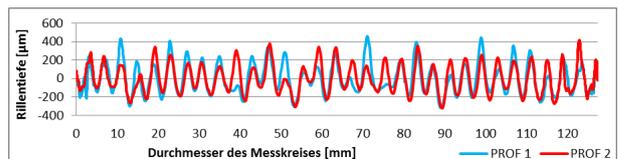


**Abbildung 323:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VIII-2

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VIII-2
MPD-Mittelwert [mm]	0,72
Standardabweichung [mm]	0,15
Variationskoeffizient [%]	20,77
MPD-Minimalwert [mm]	0,50
MPD-Maximalwert [mm]	1,37

**Tabelle 60:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VIII-2

A 5, Testfeld VIII-3, Abschnitt VIII, Textur 3



**Abbildung 324:** Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VIII-3



**Abbildung 325:** Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VIII-3

Statistische Kennwerte	A 5, Testfeld VIII-3
MPD-Mittelwert [mm]	0,42
Standardabweichung [mm]	0,07
Variationskoeffizient [%]	16,29
MPD-Minimalwert [mm]	0,27
MPD-Maximalwert [mm]	0,89

**Tabelle 61:** Texturkennwerte A 5, Testfeld VIII-3

### 8.3.7.2 Messung der Geräuschemission (CPX-Messungen)

Die Texturierung der 10 Fahrbahnabschnitte mittels Grinding wurde am Donnerstag, den 03.12.2015 abgeschlossen. Die CPX-Messungen nach [CPX3] vor Verkehrsfreigabe wurden am Montag, den 07.12.2015 durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt waren zwar die Kerbschnitte der Querscheinfugen angebracht, die Aufweitungsschnitte waren jedoch noch nicht ausgeführt. Insofern ist davon auszugehen, dass die Messungen von Fugeneffekten unbeeinflusst waren. Zum Zeitpunkt der CPX-Messungen nach Verkehrsfreigabe am Mittwoch, den 11.05.2016 waren alle Querscheinfugen und Längsfugen vorhanden und regelgerecht ausgeführt.

Die Messungen vor Verkehrsfreigabe hatten folgenden Umfang:

- alle drei Fahrstreifen,
- jeweils 2 Messfahrten in Fahrtrichtung Nord und Süd auf jedem Fahrstreifen,
- Messungen sowohl mit Reifen P1 als auch Reifen H1,
- Geschwindigkeit 80 km/h.

Insgesamt wurden also 24 Messfahrten durchgeführt. Die Messungen in zwei Fahrtrichtungen pro Fahrstreifen erfolgten, um einen etwaigen Einfluss der Grindingrichtung auf die akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche überprüfen zu können.

Baustellenverunreinigungen wurden vor den Messungen mit Wasser von den Fahrstreifen entfernt. Zum Zeitpunkt der Messungen war die Fahrbahn abgetrocknet.

Während der Messungen herrschte sonniges Wetter bei Lufttemperaturen zwischen 9°C und 12°C.

Zum Zeitpunkt der Messungen nach Verkehrsfreigabe war der Verkehr Richtung Frankfurt vor der Baustelle auf den Standstreifen und den ersten Fahrstreifen umgelegt. Der zweite und der dritte Fahrstreifen waren gesperrt.

Die Messungen nach Verkehrsfreigabe hatten folgenden Umfang:

- wegen der Verkehrsführung Messfahrten nur auf den Testfeldern der Abschnitte VIII und teilweise VII,
- alle drei Fahrstreifen, jedoch Behinderungen durch Verschwenkungen, Warnbaken und Fahrbahnmarkierungen,
- jeweils 2 Messfahrten in Fahrtrichtung Nord auf jedem Fahrstreifen,
- Messungen sowohl mit Reifen P1 als auch Reifen H1,
- Geschwindigkeit 80 km/h.

Die Fahrbahn war in allen Fahrstreifen sauber und trocken.

Während der Messungen herrschte sonniges Wetter bei leichter Bewölkung und Lufttemperaturen zwischen 24°C und 26°C.

Im **Anhang 9** (Abbildung 1 bis Abbildung 5) und beispielhaft in Abbildung 326 sind die Ergebnisse der CPX-Messungen vor Verkehrsfreigabe eingetragen. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um die pro Fahrbahnabschnitt und Fahrstreifen ermittelten CPX-Indizes  $CPX_P$  und  $CPX_H$  für die Reifen auf der rechten Seite des Messanhängers und damit der auch für SPB-Messungen maßgeblichen Fahrzeugseite. Die CPX-Indizes enthalten Temperatur- und Geschwindigkeitskorrekturen, soweit dies gem. [CPX 3] erforderlich ist. Die Messfahrtrichtung Nord und Süd wurden jeweils getrennt ausgewertet.

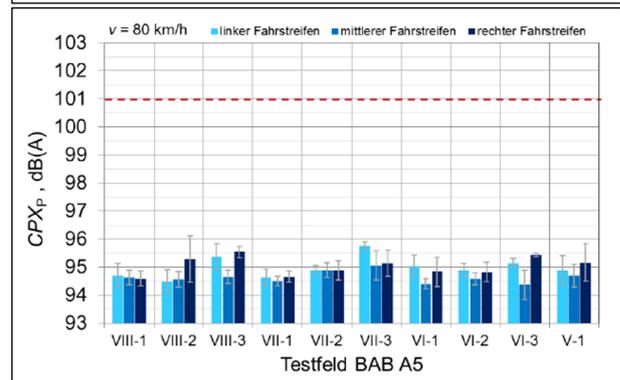
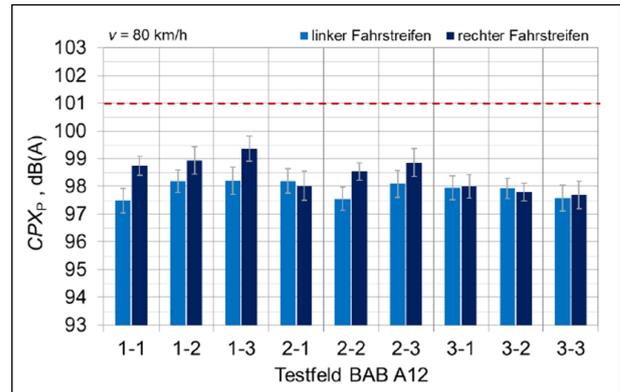
Zum leichteren Vergleich der Messergebnisse sind die Werte farbig hinterlegt. Für P1 und H1 Reifen gelten unterschiedliche Skalen, die im **Anhang 9** in Abbildung 1 dargestellt sind.

km	linker FS	mittlerer FS	rechter FS		
609.400	CPX <sub>P</sub> 94.9	CPX <sub>P</sub> 94.7	CPX <sub>P</sub> 95.2	Textur 1	Abschnitt V
609.500	95.0	94.4	94.8	Textur 1	
609.585	94.9	94.6	94.8	Textur 2	Abschnitt VI
609.670	95.1	94.4	95.4	Textur 3	
609.760	95.8	95.1	95.1	Textur 3	
609.845	94.9	94.9	94.9	Textur 2	Abschnitt VII
609.930	94.6	94.5	94.7	Textur 1	
610.020	94.7	94.6	94.6	Textur 1	
610.105	94.5	94.6	95.3	Textur 2	Abschnitt VIII
610.190	95.4	94.6	95.5	Textur 3	
610.280					

**Abbildung 326:** Werte des CPX<sub>P</sub>-Index für die Messfahrten in Fahrtrichtung Nord vor Verkehrsfreigabe. v = 80 km/h

Im **Anhang 9** (Abbildung 6 und Abbildung 7) und beispielhaft in Abbildung 327 sind die CPX-Messergebnisse für die Testfelder auf der Erprobungsstrecke der BAB A 5 vor Verkehrsfreigabe den Ergebnissen für die Testfelder auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12 gegenübergestellt. Die horizontalen roten gestrichelten Linien in den Diagrammen für den CPX<sub>P</sub>-Index repräsentieren den Anhaltswert für Fahrbahnbeläge, die eine Fahrbahnoberflächenkorrektur DStrO nach den RLS-90 von 0 dB(A) aufweisen.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Messungen auf den Testfeldern der BAB A 5 deutlich niedrigere CPX-Pegel für den texturempfindlichen Reifen P ergaben als die Messungen auf den Testfeldern der BAB A 12. Hierbei ist jedoch unbedingt zu beachten, dass der Aufweitungsschnitt der Querscheinfugen auf den Testfeldern der BAB A 5 vor den CPX-Messungen noch nicht erfolgt war, auf den Testfeldern der BAB A 12 hingegen schon. Beide Erprobungsstrecken wurden im Neuzustand vor Verkehrsfreigabe gemessen.



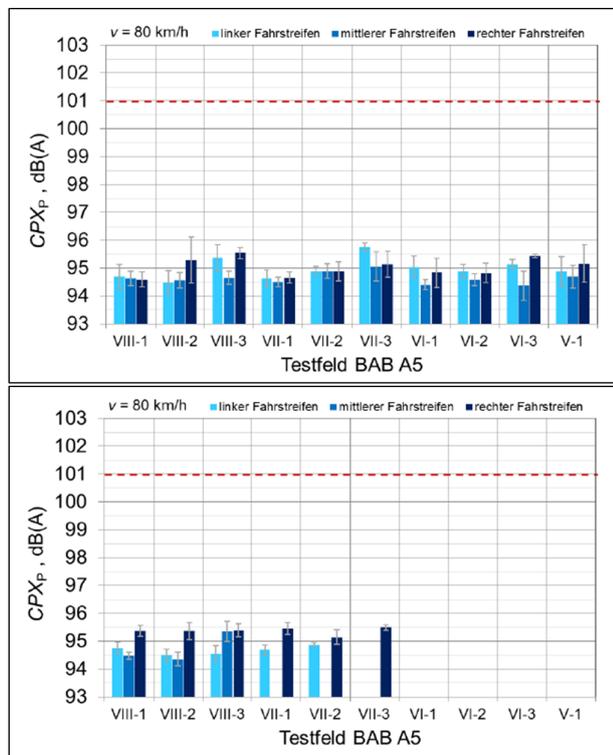
**Abbildung 327:** Werte und Standardabweichungen des CPX<sub>P</sub>-Index für die Erprobungsstrecken mit akustischem Grinding. Oben: Testfelder auf der BAB A 12, Richtungsfahrbahn Berlin; unten: Testfelder auf der BAB A 5 vor Verkehrsfreigabe, Richtungsfahrbahn Frankfurt, CPX-Messfahrtrichtung Nord. v = 80 km/h. Gestrichelte rote Linie: Anhaltswert des CPX<sub>P</sub>-Index für Fahrbahnbeläge mit einem DStrO-Wert

Im **Anhang 9** (Abbildung 8 und Abbildung 9) und beispielhaft in Abbildung 328 sind die Ergebnisse der CPX-Messungen nach Verkehrsfreigabe eingetragen.

km	CPX <sub>P</sub>	CPX <sub>P</sub>	CPX <sub>P</sub>		
609.400				Textur 1	Abschnitt V
609.500				Textur 1	
609.585				Textur 2	Abschnitt VI
609.670				Textur 3	
609.760			95.5	Textur 3	
609.845	94.9		95.1	Textur 2	Abschnitt VII
609.930	94.7		95.5	Textur 1	
610.020	94.8	94.5	95.4	Textur 1	
610.105	94.5	94.4	95.4	Textur 2	Abschnitt VIII
610.190	94.5	95.4	95.4	Textur 3	
610.280					

**Abbildung 328:** Werte des CPX<sub>P</sub>-Index für die Messfahrten in Fahrtrichtung Nord nach Verkehrsfreigabe. v = 80 km/h

Im **Anhang 9** (Abbildung 10 und Abbildung 11) und beispielhaft in Abbildung 329 sind die CPX-Messergebnisse für den Zustand nach Verkehrsfreigabe den Ergebnissen für den Zustand vor Verkehrsfreigabe gegenübergestellt.



**Abbildung 329:** Werte und Standardabweichungen des CPX<sub>P</sub>-Index für die Erprobungsstrecken mit akustischem Grinding. Testfelder auf der BAB A 5, Richtungsfahrbahn Frankfurt, CPX-Messrichtung Nord.  $v = 80$  km/h. Oben: vor Verkehrsfreigabe; unten: nach Verkehrsfreigabe. Gestrichelte rote Linie: Anhaltswert des CPX<sub>P</sub>-Index für Fahrbahnbeläge mit einem DStrO-Wert nach den RLS-90 von 0 dB(A).

Insgesamt ist festzustellen, dass sich die Pegelwerte für den P-Reifen für den Zustand nach Verkehrsfreigabe gegenüber dem Zustand vor Verkehrsfreigabe kaum verändert haben. Im rechten Fahrstreifen lagen die CPX<sub>P</sub>-Werte für die verschiedenen Testfelder vor Verkehrsfreigabe in einem Bereich von 94,5 dB(A) bis 95,5 dB(A). Nach Verkehrsfreigabe beträgt der Pegelbereich 95,0 dB(A) bis 95,5 dB(A). Im mittleren und linken Fahrstreifen ergeben sich, mit Ausnahme von Testfeld VIII-3, nach Verkehrsfreigabe praktisch dieselben CPX<sub>P</sub>-Werte wie vor Verkehrsfreigabe.

Die Standardabweichungen  $\sigma$  der CPX<sub>P</sub>-Indizes sind nach Verkehrsfreigabe tendenziell kleiner als vor Verkehrsfreigabe. Mit Werten zwischen 0,1 dB(A) und 0,4 dB(A) nehmen die Standardabweichungen extrem niedrige Werte an, was auf eine außerordentlich gute Homogenität der Testfelder hinweist. Allerdings muss in diesem Zusammenhang auch darauf hingewiesen werden, dass die

Testfelder nicht länger als 90 m sind und die Stichproben pro Testfeld damit einen Umfang von maximal fünf 20 m-Segmenten haben.

Die CPX-Indizes für den H-Reifen liegen nach Verkehrsfreigabe insgesamt auf einem um 1 dB(A) bis 1,5 dB(A) niedrigeren Niveau als vor Verkehrsfreigabe. Aus den Spektren in **Anhang 9** geht hervor, dass der H-Reifen eine ausgeprägte tonale Komponente in der Terz mit einer Mittenfrequenz von 800 Hz aufweist, mit einer Harmonischen bei 1.600 Hz. Die ausgeprägte gleichmäßige Blockstruktur des Profils des H-Reifens führt in Verbindung mit der sehr fein texturierten und gleichmäßigen Oberfläche der Fahrbahn zu einer starken Anregung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche im Spektralbereich der Stolleneingriffsfrequenz von etwa 800 Hz.

Damit kommt den mechanischen Eigenschaften des Reifenprofils eine besondere Bedeutung zu. Da die Messungen vor Verkehrsfreigabe erst Mitte Dezember 2015 stattfinden konnten, lagen die Luft- und Fahrbahntemperaturen mit rund 10°C und damit aber auch die Reifentemperaturen deutlich unter den Luft- und Fahrbahntemperaturen von 24°C bzw. 30°C während der Messungen nach Verkehrsfreigabe.

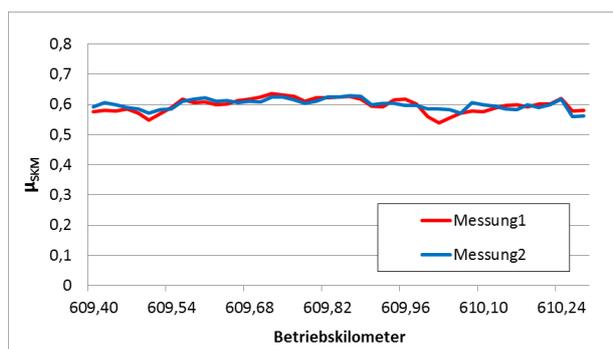
Auch die Veränderung der Reifenhärte des H-Reifens um +2,5 Shore A Härtegrade zwischen Beginn der Messsaison im Frühjahr 2015 und Ende des Jahres 2015 lassen den Schluss zu, dass die Reifen bei den Messungen im Dezember 2015 deutlich härter waren und damit zu höheren Rollgeräuschpegeln führten als bei den Messungen im Mai 2016, bei denen neue Reifensätze eingesetzt wurden und die bei um etwa 15°C höheren Temperaturen stattfanden. Auch die Shore A Härte des P-Reifens lag im Dezember um 2 Härtegrade höher als zu Beginn der Messsaison im Frühjahr 2015 und um 3 Härtegrade über der Shore A Härte für den neuen P-Reifen im Frühjahr 2016. Die nach Norm angewandte Temperaturkorrektur kompensiert die Effekte, insbesondere die Zunahme der Shore-Härte nicht vollständig. Wenn die für den Entwurf der [CPX4] vorgesehene Korrektur der CPX-Pegel mit 0,25 dB(A)/Shore A angesetzt wird, ist schon damit ein Unterschied von etwa 0,6 dB(A) zu erklären.

Hinsichtlich des Fugeneinflusses ist festzustellen, dass der Zustand mit Querscheinfugen nicht zur Erhöhung der CPX-Pegel gegenüber dem Fahrbahnzustand ohne Querscheinfugen geführt hat. Die akustischen Eigenschaften der Fahrbahn haben sich, basierend auf den CPX-Pegeln für den texturempfindlichen Reifen P1, offenbar nicht verändert. Die Querscheinfugen wurden mit großer Präzision, hoch anstehender Fugenvergussmasse und damit

geringem Niveauunterschied der Fahrfläche zwischen Fuge und angrenzenden Fahrbahnplatten hergestellt. Insofern kann durchaus davon ausgegangen werden, dass der Messreifen den Fugenübergang kaum „sieht“. Damit kommt hinsichtlich der akustischen Eigenschaften geräuschmindernder Betonfahrbahnen einer sorgfältigen und regelgerechten Ausführung der Fugen eine große Bedeutung zu.

### 8.3.7.3 Griffigkeitsmessungen mit SKM

Am 08.04.2016 wurde vom Chemisch Technischen Laboratorium Heinrich Hart GmbH im Auftrag der BASt eine Griffigkeitsmessung nach [TP Griff-StB (SKM)] und [ZTV Beton-StB 07] mit einer Messgeschwindigkeit von 80 km/h in der rechten Rollspur des ersten Fahrstreifens durchgeführt. Die Ergebnisse des Prüfberichtes liegen als 20 m-Mittelwerte vor und sind im folgenden Diagramm (Abbildung 251) aufgetragen.



**Abbildung 330:** Griffigkeitsmessung mit SKM auf der Erprobungsstrecke A 5

Im ersten Fahrstreifen wurden Mittelwerte des Seitenkraftbeiwertes zwischen 0,54 und 0,635 festgestellt. Sie entsprechen damit den Anforderungen. Es liegen keine Unterschreitungen der geforderten Grenzwerte vor.

Signifikante Unterschiede in den Messergebnissen zwischen den einzelnen Testfeldern mit verschiedenen Texturgeometrien sind hier nicht erkennbar.

## 9 Bewertung der Ergebnisse

Auf Bestandsstrecken der A 13, A 92 und A 93 wurden für die Kalibrierung des Berechnungsmodells SPERoN® versuchsweise Texturen mittels Grinding und Grooving erzeugt. Die daraus und aus den weiteren Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Erprobungsstrecken auf der A 12 und A 5.

Das umfangreichste Untersuchungsprogramm auf den erzeugten Texturen der Bestandsstrecken wurde auf der Versuchsstrecke der A 13 durchgeführt. Die einzelnen Abschnitte mit den jeweiligen Texturparametern und dem Untersuchungsprogramm sind in Abbildung 331 und die Ergebnisse in Abbildung 332 zusammengestellt. Die rote Umrandung in Abbildung 332 schließt die Messergebnisse des Abschnittes MQ3 ein, auf dem die vergleichsweise höchsten Lärminderungswerte erreicht wurden.

Abschnitt	MQ1	MQ2	MQ3	MQ4	MQ5	MQ6	MQ7
von Bkm	7,80	10,45	14,70	16,00	14,70	13,03	10,90
bis Bkm	8,00	10,65	14,90	15,80	14,50	12,83	10,70
Beton							
Textur	1	2	3	4	5	6	7
Grinding: Segmentbreite	2,8	2,8	2,8	3,2	3,2	3,2	3,2
Grinding: Segmentabstand	1,8	1,8	1,8	2,2	2,2	2,2	2,2
Grooving: Segmentbreite	2,8	2,8	2,8	3,2	3,2	3,2	3,2
Grooving: Segmentabstand	10,0	15,0	20,0	20,0	20,0	25,0	25,0
Grooving: Schleiftiefe	3,0	3,0	3,0	3,0	4,0	3,0	4,0
Betonage	-	-	-	-	-	-	-
Grinding	03.12.2013	11.12.2013	24.03.2014	27.03.2014	28.03.2014	29.03.2014	29.03.2014
Strömungswiderstand							
Lasertextur							
Kontrollierte Vorbeifahrt							
Texturmessung VKI	03.12.2013	11.12.2013	24.03.2014	27.03.2014	28.03.2014	29.03.2014	29.03.2014
3D-Textur							
Griffigkeit BASt	29.07.2015						
CPX-Messungen							
Statist. Vorbeifahrt BASt	19.08.2014				21.08.2014	12.10.2014	

**Abbildung 331:** Textur-, Herstellungs- und Erfassungsdaten der Versuchsstrecke auf der A 13

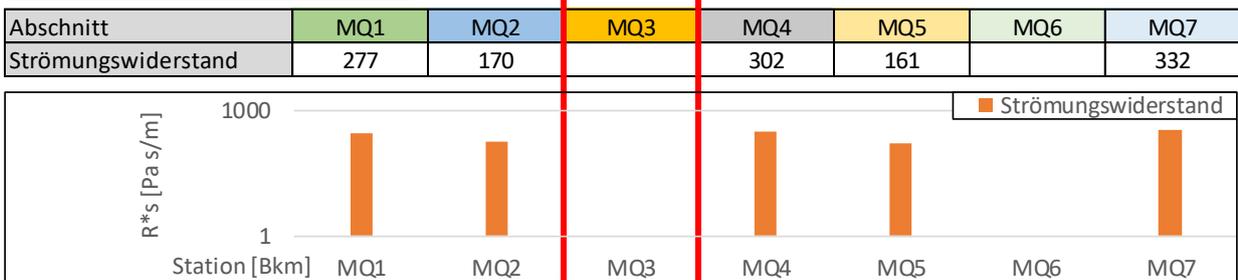
**Mittelwerte MPD**



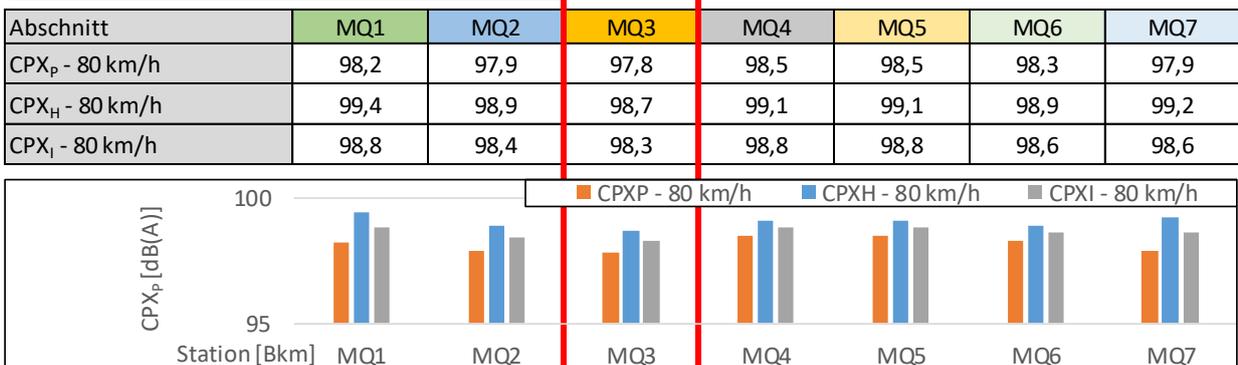
**Griffigkeit**



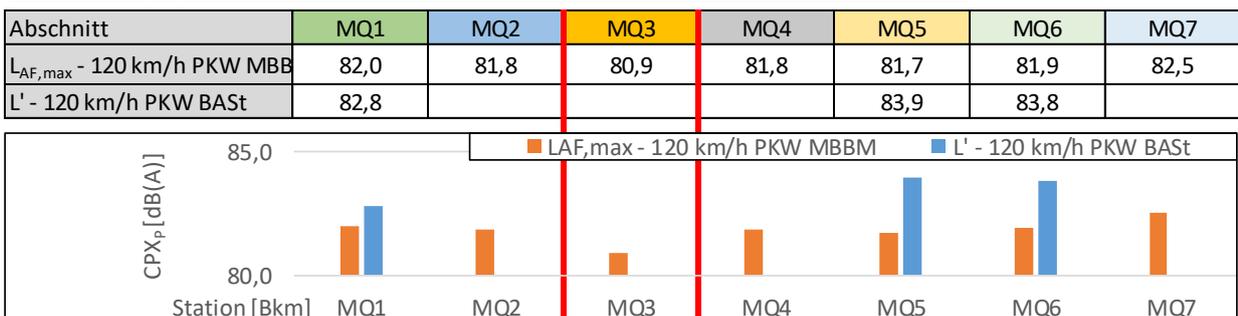
**Mittelwerte Strömungswiderstand**



**CPX-Messergebnisse, v=80 km/h, Reifen P und H**



**Vorbeifahrtpegel Kontrollierte Vorbeifahrt (MBBM), Statistische Vorbeifahrt (BAST)**



**Abbildung 332:** Zusammenstellung der Messergebnisse auf der Versuchsstrecke auf der A 13

Hohe Spaltzugfestigkeiten des Betons auf der A 13 mit 4,03 und 4,20 MPa als 5%-Quantilwerte (siehe Tabelle 7) trugen wahrscheinlich dazu bei, dass die aufgetragenen Texturen sehr homogen sind. Zu Kornausbrüchen durch das Grinding kam es sehr selten. Der Kontext zwischen Spaltzugfestigkeiten und Homogenität der erzielten Textur ist jedoch nicht anhand der wenigen untersuchten Strecken statistisch beweisbar.

Dennoch ist zu vermuten, dass die mit dem Alter des Betons zunehmende Festigkeit einen erheblichen Einfluss auf das Texturierungsergebnis hat.

Die hohe Anfangsgriffigkeit mit Werten von  $\mu_{SKM}$  zwischen 0,61 und 0,67 verringerte sich nach ein- bis einhalb Jahren nur geringfügig um maximal 0,03 (siehe Abbildung 332). Damit liegen die Griffigkeits-

werte deutlich über den geforderten Werten für einen Neubau von  $\mu_{SKM}$  0,46 bei 80 km/h [ZTV Beton-StB 07] und dem Schwellenwert von  $\mu_{SKM}$  0,32 bei 80 km/h [M BGriff].

Auf der Erprobungsstrecke A 12 wurden auf drei Betonabschnitten unterschiedlicher Betonrezepturen jeweils drei verschiedene Texturen mittels Grinding und mittels der Kombination von Grinding und Grooving erzeugt.

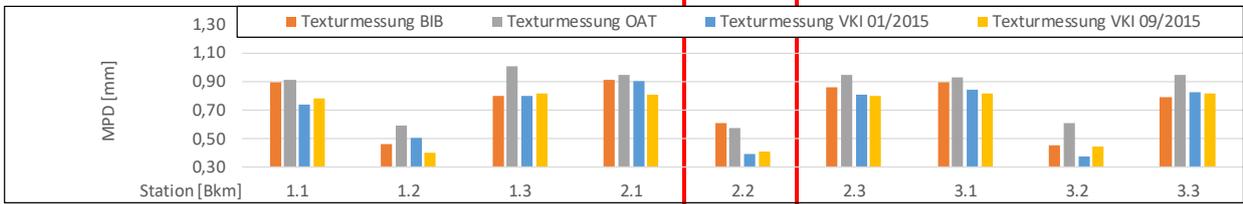
Die einzelnen Abschnitte mit den jeweiligen Texturparametern und dem Untersuchungsprogramm sind in Abbildung 333 und die Ergebnisse in Abbildung 334 zusammengestellt. Die rote Umrandung in Abbildung 334 schließt die Messergebnisse des Abschnittes 2.2 ein, auf dem die vergleichsweise höchsten Lärminderungswerte erreicht wurden. Es handelt sich dabei um eine reine Grindingtextur.

Abschnitt	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
von Bkm	34,1	34,2	34,3	34,4	34,5	34,6	34,7	34,8	34,9
bis Bkm	34,2	34,3	34,4	34,5	34,6	34,7	34,8	34,9	35,0
Beton	UB	UB	UB	WB (Ausfall)	WB (Ausfall)	WB (Ausfall)	WB (stetig)	WB (stetig)	WB (stetig)
Textur	1	2	3	3	2	1	1	2	3
Grinding: Segmentbreite	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Grinding: Segmentabstand	1,8	1,8	1,5	1,5	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5
Grooving: Segmentbreite	2,8		2,8	2,8		2,8	2,8		2,8
Grooving: Segmentabstand	22,8		21,0	21,0		22,8	22,8		21,0
Grooving: Schleiftiefe	3,0		3,0	3,0		3,0	3,0		3,0
Betonage	01.09.2015			02.09.2015			03.09.2015		
Grinding	11. bis 12.09.2014								
Strömungswiderstand	09.10.2014								
Lasertextur	09.10.2014								
Kontrollierte Vorbeifahrt	12.10.2014								
Texturmessung BIB	14.10.2014								
3D-Textur	17.10.2014	09.10.2014		17.10.2014			09.10.2014		
Texturmessung OAT	20.10.2014								
Texturmessung VKI	13.01.2015								
CPX-Messung	16.01.2015								
Griffigkeit SKM	14.04.2015								
Griffigkeit ViaFriction	26. bis 28.05.2015								
Texturmessung VKI	01.09.2015								
Ebenheit	27.10.2015								

**Abbildung 333:** Textur-, Herstellungs- und Erfassungsdaten der Erprobungsstrecke auf der A 12

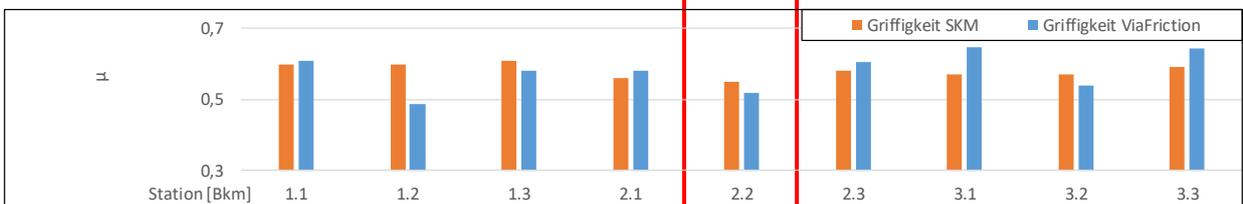
**Mittelwerte MPD**

Abschnitt	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Texturmessung BIB	0,89	0,46	0,80	0,91	0,61	0,86	0,89	0,45	0,79
Texturmessung OAT	0,91	0,59	1,00	0,95	0,57	0,95	0,93	0,61	0,95
Texturmessung VKI 01/2015	0,74	0,51	0,80	0,90	0,40	0,81	0,85	0,38	0,83
Texturmessung VKI 09/2015	0,79	0,40	0,82	0,81	0,41	0,80	0,81	0,45	0,82



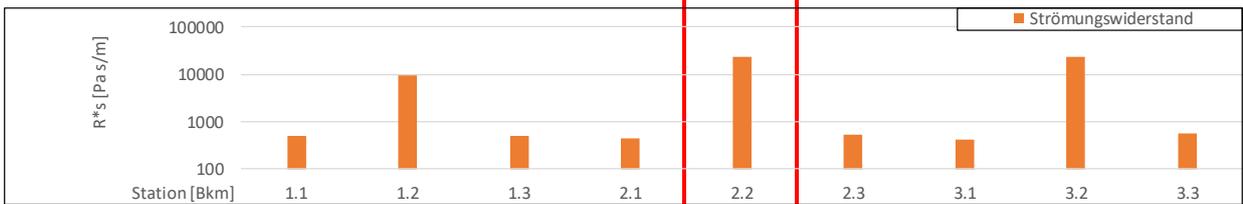
**Griffigkeit**

Abschnitt	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Griffigkeit SKM	0,6	0,6	0,61	0,56	0,55	0,58	0,57	0,57	0,59
Griffigkeit ViaFriction	0,61	0,49	0,58	0,58	0,52	0,61	0,65	0,54	0,64



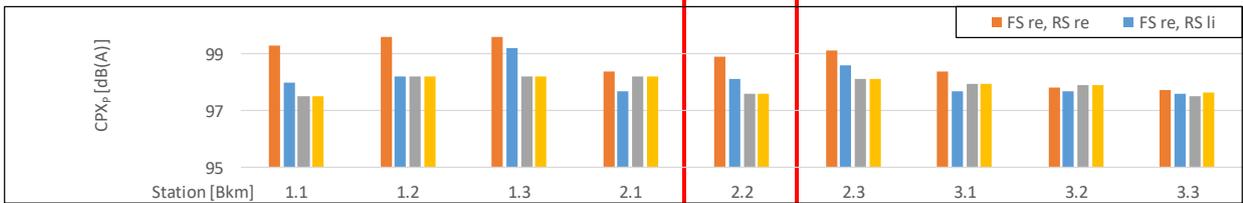
**Mittelwerte Strömungswiderstand**

Abschnitt	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
Strömungswiderstand	513	9245	510	455	23944	526	426	23849	556



**CPX-Messergebnisse, v=80 km/h, Reifen P**

Abschnitt	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
FS re, RS re	99,3	99,6	99,6	98,4	98,9	99,1	98,4	97,8	97,75
FS re, RS li	98	98,2	99,2	97,7	98,1	98,6	97,7	97,7	97,6
FS li, RS re	97,5	98,2	98,2	98,2	97,6	98,1	97,95	97,9	97,5
FS li, RS li	97,5	98,2	98,2	98,2	97,6	98,1	97,95	97,9	97,65



**Vorbeifahrtpegel**

Abschnitt	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3
L <sub>AF,max</sub> - 120 km/h	83,8	83,5	83,9	82,9	82,2	82,6	82,5	83,1	82,4

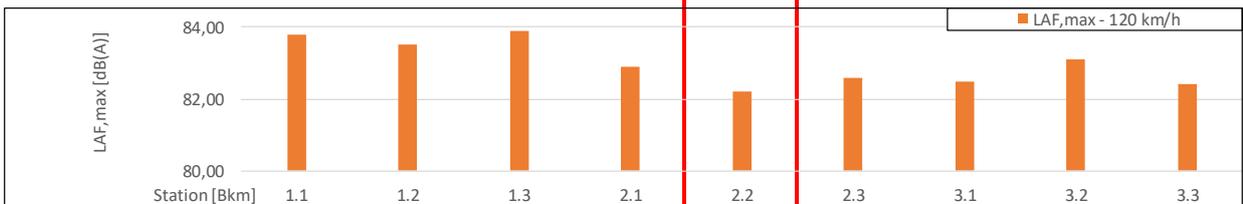


Abbildung 334: Zusammenstellung der Messergebnisse auf der Erprobungsstrecke auf der A 12

Der vergleichsweise niedrigste Vorbeifahrtpegel aus der kontrollierten Vorbeifahrt von 82,2 dB(A) im Abschnitt 2.2 bedeutet einen Lärminderungswert von ca. -3 dB(A), orientiert am Referenzbelag für SPB-Messungen (nicht geriffelter Gussasphalt mit einem Emissionspegel von 85,2 dB(A)). Ursache für die geringer als erwartete Lärminderung könnte sein, dass das ca. 10 Tage nach Betonage durchgeführte Grinding im Zusammenhang mit der Festigkeitsentwicklung des Betons zu früh erfolgte.

Der Grindingvorgang stellt eine horizontale Belastung der noch jungen Betonoberfläche dar, die diese unter Umständen nicht aufnehmen kann, wenn die erforderlichen Festigkeiten noch nicht erreicht sind (siehe Kapitel 6.2.1).

Dies führte zu teilweisem Herausreißen der oberen Gesteinskörnungen durch das Grinding. Diesem

Aspekt wurde bei der Durchführung der Grindingmaßnahme auf der zweiten Erprobungsstrecke auf der A 5 Rechnung getragen.

Aus den theoretischen Berechnungen mit SPE-RoN® unter Einbeziehung der Ergebnisse der Griffigkeits- und Lärmmessungen auf der ersten Erprobungsstrecke A 12 wurden für die zweite Erprobungsstrecke auf der A 5 grundsätzlich feinere Texturen ausgewählt. Die einzelnen Abschnitte mit den jeweiligen Texturparametern und dem Untersuchungsprogramm sind in Abbildung 335 dargestellt. Eine Ergebnisübersicht der vorgenommenen Messungen enthält Abbildung 336.

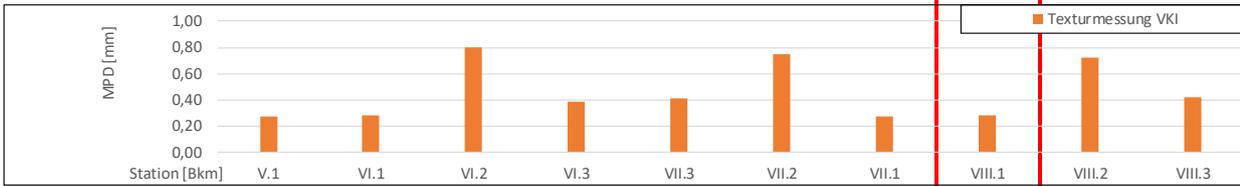
Auch hier wurde der Abschnitt mit den vergleichsweise höchsten Lärminderungswerten rot umrandet. Dabei handelt es sich in Abbildung 336 auch hier um eine reine Grindingtextur.

Testfeld	V.1	VI.1	VI.2	VI.3	VII.3	VII.2	VII.1	VIII.1	VIII.2	VIII.3
von Bkm	609,500	609,585	609,670	609,760	609,845	609,930	610,020	610,105	610,190	610,280
bis Bkm	609,400	609,500	609,585	609,670	609,760	609,845	609,930	610,020	610,105	610,190
Beton	OB+UB Rundkorn GK 32	OB+UB Rundkorn GK 32	OB+UB Rundkorn GK 32	OB+UB Rundkorn GK 32	OB GK 22, 35% gebr.	OB GK 22, 35% gebr.	OB GK 22, 35% gebr.	OB 16 Rundkorn	OB 16 Rundkorn	OB 16 Rundkorn
Textur	1	1	2	3	3	2	1	1	2	3
Grinding: Segmentbreite	2,0	2,0	2,0	2,4	2,4	2,0	2,0	2,0	2,0	2,4
Grinding: Segmentabstand	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,4
Grooving: Segmentbreite			2,4			2,4			2,4	
Grooving: Segmentabstand			21,0			21,0			21,0	
Grooving: Schleiftiefe			3,0			3,0			3,0	
Betonage	19.10. bis 21.10.2015									
Grinding	30.11. bis 04.12.2015									
Texturmessung VKI	02.12. bis 04.12.2015									
CPX-Messung	07.12.2015									
Griffigkeit	08.04.2016									
CPX-Messung										11.05.2016

**Abbildung 335:** Textur-, Herstellungs- und Erfassungsdaten der Erprobungsstrecke auf der A 5

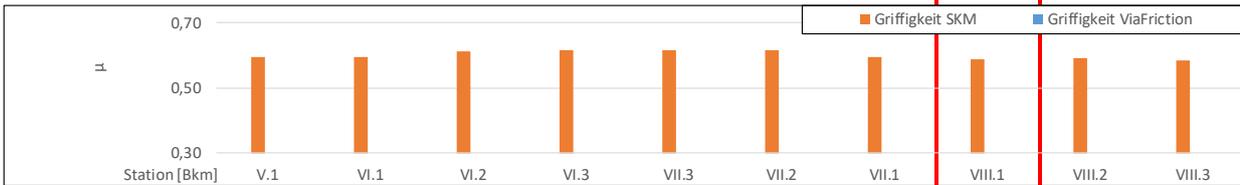
**Mittelwerte MPD**

Testfeld	V.1	VI.1	VI.2	VI.3	VII.3	VII.2	VII.1	VIII.1	VIII.2	VIII.3
Texturmessung VKI	0,27	0,28	0,80	0,39	0,41	0,75	0,27	0,28	0,72	0,42



**Griffigkeit**

Testfeld	V.1	VI.1	VI.2	VI.3	VII.3	VII.2	VII.1	VIII.1	VIII.2	VIII.3
Griffigkeit SKM	0,59	0,59	0,61	0,62	0,62	0,61	0,60	0,59	0,59	0,59
Griffigkeit ViaFriction										



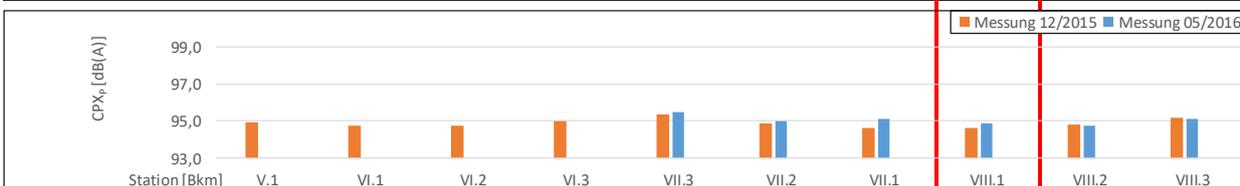
**Mittelwerte Strömungswiderstand**

Testfeld	V.1	VI.1	VI.2	VI.3	VII.3	VII.2	VII.1	VIII.1	VIII.2	VIII.3
Strömungswiderstand										



**CPX-Messergebnisse, v=80 km/h, Reifen P**

Testfeld	V.1	VI.1	VI.2	VI.3	VII.3	VII.2	VII.1	VIII.1	VIII.2	VIII.3
Messung 12/2015	94,9	94,7	94,8	95,0	95,3	94,9	94,6	94,6	94,8	95,2
Messung 05/2016					95,5	95,0	95,1	94,9	94,8	95,1



**Vorbeifahrtpegel**

Testfeld	V.1	VI.1	VI.2	VI.3	VII.3	VII.2	VII.1	VIII.1	VIII.2	VIII.3
L <sub>AF,max</sub> - 120 km/h										



**Abbildung 336:** Zusammenstellung der Messergebnisse auf der Erprobungsstrecke auf der A 5

Die Erkenntnisse in Bezug auf die Festigkeitsentwicklung des Betons aus der Erprobungsstrecke der A 12 wurden hier berücksichtigt und die Grindmaßnahme ca. 5 Wochen nach der Herstellung der Betondecke durchgeführt. Die höhere Festigkeit des Betons zu diesem Zeitpunkt verhinderte das Herausreißen der groben Gesteinskörnung während des Grindings in erheblichem Maße.

Aus den in Vorbereitung und Begleitung der Erprobungsstrecken durchgeführten Laborversuchen

und Modellrechnungen können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Die Segmentbreite hat ab einer gewissen Feinheit der Textur keinen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften der Textur. Jedoch scheint bei geringeren Segmentbreiten eine höhere Anfangsgriffigkeit vorzuliegen.
- Der Segmentabstand entscheidet maßgeblich über die akustischen Eigenschaften der Textur. Je geringer der Abstand ist, umso niedriger sind

die Geräuschpegel. Der Abstand sollte jedoch nicht kleiner als 0,6 mm sein, um eine für die Griffigkeit erforderliche Mindesttexturtiefe sicherzustellen.

- Die Verwendung eines kleineren Größtkorns ist vorteilhaft, da bei geringen Schneidtiefen der Anteil an angeschnittener Gesteinskörnung größer ist. Das Größtkorn sollte jedoch nicht kleiner als 16 mm sein, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Frischbetons sicherzustellen.
- Eine höhere Festigkeit des Betons beeinflusst die Texturdauerhaftigkeit positiv.
- Wenn bei Neubaustrecken die Oberfläche mittels Grinding zu texturieren ist, sollte der Beton eine Druckfestigkeit von im Mittel 40 MPa bzw. eine Spaltzugfestigkeit von im Mittel 3,5 MPa aufweisen. Im Labor wurden diese Festigkeiten im Alter von sieben Tagen erreicht.
- Wenn bei Neubaustrecken die Oberfläche mittels Grinding zu texturieren ist, stellt bei der Verwendung von CEM-I-Betonen die praxisübliche Nachbehandlung - Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels - eine ausreichende Maßnahme für die Herstellung dauerhafter Oberflächen dar.

Aus den Untersuchungen an den Erprobungsstrecken sind weitere Erkenntnisse abzuleiten:

- Zusätzliche Groovingrillen können sinnvoll sein, um das Drainagevermögen zu erhöhen. Ein Einfluss auf die Griffigkeitswerte, gemessen nach dem SKM-Verfahren, konnte nicht festgestellt werden. Aus akustischer Sicht verhalten sich die Abschnitte der Erprobungsstrecken mit Groovingrillen neutral.
- Mit Grinding- bzw. Groovingtexturen können mit einem ausschließlich aus Rundkorn hergestellten Oberbeton ebenfalls griffige und lärmindernde Oberflächen hergestellt werden, wenn die Mindestfestigkeiten gegeben sind. Zum Grindingzeitpunkt sollten aus heutiger Sicht die Druckfestigkeiten  $f_{c,cube}$  35 MPa und die Spaltzugfestigkeiten  $f_{ct,k,core}$  3,0 MPa (5%-Quantilwert) nicht unterschreiten.

## 10 Schlussfolgerungen

Das Grindingverfahren wurde in der Vergangenheit ausschließlich zur Verbesserung der Ebenheit oder der Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen angewandt. Bei Maßnahmen zur Verbesserung der Ebenheit wurden dabei die Kuppen der Unebenheiten beseitigt, die Wellentäler blieben unberührt.

Das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Verfahren ist durch ein neu entwickeltes Längsabtastsystem in der Lage, Unebenheiten bis zu einer

Wellenlänge von 10 m signifikant zu verringern. Dadurch werden zwei Vorteile erreicht:

- Es ergeben sich positive Auswirkungen auf den Fahrkomfort durch eine deutliche Reduzierung der Beschleunigungswerte für das Ladegut, das Fahrzeug und den Fahrer.
- Gleichermaßen entsteht eine positive Wirkung hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der Betondecke durch die signifikante Reduzierung des Stoßfaktors bei der Schwerverkehrsbelastung, die wiederum zu einer Reduzierung der Einwirkungen aus Verkehrsbelastung führt.

Die Maßnahmen zur Verbesserung der Griffigkeit wurden in der Vergangenheit durch einen Konstantabtrag der Betonoberfläche realisiert. Voraussetzung für einen dauerhaften Erfolg ist dabei die vorhandene ausreichende Polierresistenz der groben Gesteinskörnung und der Sande im Oberbeton sowie eine geringe Mörtelschichtdicke an der Betonoberfläche. Die Anfangsgriffigkeiten nach dem Grinding liegen in der Regel zwischen  $\mu_{SKM}$  0,7 und 0,9. Verfahrenstechnisch bedingt sinken bei relativ groben Grindingtexturen diese Werte auf  $\mu_{SKM}$  0,5 bis 0,7 auf Grund des nachträglichen Brechens der Stege. Werden feinere Grindingtexturierungen angewandt, liegt die Anfangsgriffigkeit etwas niedriger, dafür bleibt das Niveau nahezu erhalten.

In diesem Forschungsprojekt wurde das Grindingverfahren optimiert. Im Vordergrund stand dabei die akustische Optimierung, wobei die positiven Wirkungen der Ebenheits- und Griffigkeitsverbesserungen nicht außer Acht gelassen wurden.

Auf Basis der theoretischen und labortechnischen Untersuchungen wurden zunächst Praxisversuche an Bestandsbetonen auf der BAB A 13 durchgeführt, bei denen verschiedene Grindingtexturen mit und ohne Grooving getestet wurden. Im Ergebnis konnten neben Verbesserungen der Ebenheiten und Griffigkeiten auch signifikante Lärminderungen erreicht werden. Das akustische Ergebnis mit dem vergleichsweise höchsten Lärminderungswert wurde im Abschnitt MQ3 erzielt (siehe auch Kapitel 8), der bei der kontrollierten Vorbeifahrt mit 80,9 dB(A) einen Lärminderungswert von etwa -4 dB(A), orientiert am Referenzbelag für SPB-Messungen (nicht geriffelter Gussasphalt mit einem Emissionspegel von 85,2 dB(A)) aufweisen konnte.

Die CPX-Messergebnisse, denen eine Messgeschwindigkeit von 80 km/h zugrunde lag, betragen für den P-Reifen 97,8 dB(A) und für den H-Reifen 98,7 dB(A). Der für CPX-Messungen herangezogene Anhaltswert für den CPXP-Index für Fahrbahnbeläge, die eine Fahrbahnoberflächenkorrektur  $D_{StrO}$  nach den RLS-90 von 0 dB(A) aufweisen, beträgt 101,0 dB(A). Damit liegt die ermittelte Lärminderung in der gleichen Größenordnung.

Hauptziel war die Anwendung des Grindingverfahren für neu zu bauende Betonlose, um eine weitere Standardtextur für lärmarme Betonoberflächen im Regelwerk definieren zu können.

Die erste Erprobungsstrecke innerhalb dieses Forschungsthemas, die als Neubaustrecke ausgeführt wurde, war die BAB A 12 im Land Brandenburg im Jahr 2014. Auf insgesamt 900 m Länge wurden drei verschiedene Oberbetone eingebaut, die regional mögliche gebrochene Gesteinskörnungen aufweisen. Jeder Oberbeton wurde mit drei unterschiedlichen Grindingtexturen versehen, so dass sich eine Matrix aus neun 100 m-Abschnitten ergeben hat.

Die Längsebenheiten wurden nicht innerhalb dieses FE-Projektes gemessen, es fand jedoch im Zuge der Kontrollprüfung eine Planographenmessung statt, in deren Ergebnis keine Überschreitungen des vertraglich vereinbarten Grenzwertes für die Unebenheit (4,0 mm/m) festgestellt wurden. Über weite Strecken lagen die Werte weit unterhalb des Grenzwertes, so dass eine sehr gute Verbesserung der Längsebenheit erzielt wurde.

Die gemessenen Griffigkeitswerte lagen zwischen  $\mu_{SKM}$  0,55 und 0,61 und damit deutlich über dem Anforderungswert von  $\mu_{SKM}$  0,46.

Die akustischen Wirkungen ergaben bei allen Varianten auf der BAB A 12 Lärminderungen, wobei die Minderungswerte jedoch unter den Erwartungen blieben. Aufgrund des zu frühen Grindings und dem damit verbundenen teilweisen Ausbrechen der groben Gesteinskörnung ist die Textur aus akustischer Sicht nicht optimal. Das Ergebnis mit dem vergleichsweise größten Lärminderungswert von ca. -3 dB(A) wurde im Abschnitt 2.2 erreicht, wo ein Vorbeifahrtpegel von 82,2 dB(A) gemessen wurde.

Die CPX-Messergebnisse des Abschnittes 2.2 lagen für den P-Reifen zwischen 97,6 und 98,9 dB(A). Damit liegt die ermittelte Lärminderung zwischen -2,1 und -3,4 dB(A).

Als Hauptursachen für die geringer als erwartet ausgefallene Lärminderung wurde das teilweise Herausreißen der oberen Gesteinskörnungen durch das Grinding und die relativ grobe Querfugenausbildung detektiert.

Zur Beurteilung weiterer Oberbetone und zur weiteren Optimierung der Grindingtextur wurde eine zweite Erprobungsstrecke erforderlich. Bezüglich möglicher Oberbetone sollte insbesondere getestet werden, inwieweit der Einsatz nicht gebrochener Gesteinskörnungen möglich ist. Hinsichtlich der weiteren Optimierung der Grindingtextur lag das Augenmerk auf sehr feinen Texturen, die einerseits keine ungebrochenen Stege nach Herstellung hinterlassen und andererseits viele Aufstandspunkte gleicher Höhenlage für die Reifen aufweisen. Diese

zweite Erprobungsstrecke wurde in Baden-Württemberg auf der BAB A 5 bei Bruchsal angelegt und im Jahr 2015 realisiert.

Auch hier wurden drei verschiedene Oberbetone gefertigt (Kapitel 8). Zwei der drei Oberbetone bestanden ausschließlich aus grober Gesteinskörnung mit Rundkorn unterschiedlichem Größtkorn, der Dritte hatte einen 35%igen Anteil gebrochener Gesteinskörnung. Jeder Oberbeton wurde wiederum mit drei verschiedenen Grindingtexturen versehen, jeweils eine davon mit zusätzlicher Groovingtextur. Ein weiterer Abschnitt ergab sich durch die Texturierung des benachbarten Abschnitts einer durchgehend bewehrten Betondecke ohne Querscheinfugen, die fast zeitgleich hergestellt wurde. Die ausgeführten Grindingtexturen sind noch feiner als die der ersten Erprobungsstrecke und stellen Grenzwerte hinsichtlich des derzeit Ausführbaren im Hinblick auf die Herstellung der Schneidwerkzeuge dar.

Da ursprünglich nur eine Erprobungsstrecke geplant und kalkuliert war, konnten die nach Herstellung erforderlichen Messungen und Auswertungen nur teilweise innerhalb der Bearbeitung dieses Themas erfolgen.

Ergebnisse zur Ebenheit konnten nicht mehr innerhalb dieser Forschungsarbeit erzeugt und ausgewertet werden. Zurzeit steht bei längsgerichteten Texturen für eine Bewertung der Längsebenheit nur die Messung mittels Planografen zur Verfügung. Eine Bewertung auf laserbasierten Längsebenheitsmessungen konnte zum Zeitpunkt dieses Forschungsprojektes noch nicht erfolgen.

Griffigkeitsmessungen wurden im April 2016 vorgenommen und lieferten in allen Testfeldern mit  $\mu_{SKM}$  von 0,59 bis 0,61 sehr gute Ergebnisse. Hinsichtlich der akustischen Wirkung fand eine erste CPX-Messung statt. Die Ergebnisse aller Abschnitte liegen relativ dicht beieinander, die Streuung der Messergebnisse ist beeindruckend gering. Aus akustischer Sicht wurden im Testfeld VIII.1 die vergleichsweise größten Lärminderungswerte erzielt. Eine kontrollierte oder statistische Vorbeifahrtmessung konnte aufgrund der Wintersaison und der darauf folgenden Verkehrsführung (Bau der Gegenfahrbahn) noch nicht realisiert werden. Es ist aufgrund der CPX-Messergebnisse jedoch wahrscheinlich, dass bei der statistischen Vorbeifahrtmessung eine Lärminderung von etwa -5 dB(A) erreichbar ist. Eine mögliche Verschlechterung des Wertes ggf. durch die Endausbildung der Fugen, Aufweitungsschnitt und Fugenverguss wurde durch die Ergebnisse einer zweiten CPX-Messung 5 Monate nach der Herstellung der Textur nicht bestätigt.

Die bisherigen Ergebnisse der Erprobungsstrecken zeigen, dass eine signifikante Lärminderung

durch das Grinding möglich ist. Die Parameter der Grindingtexturen müssen jedoch genau vorge-schrieben werden. Bei erforderlichen feinen Grind-ingtexturen ist es aus heutiger Sicht wichtig, den An-forderungswert für den Polierwiderstand der groben Gesteinskörnungen gem. [TL Beton-StB 07] und [TL Gestein-StB 04/07] einzuhalten, um ausreichende Griffigkeiten dauerhaft erzielen zu können. Die Er-gebnisse der Griffigkeitsentwicklung auf der Ver-suchsstrecke A 92 deuten darauf hin, dass der Wi-derstand gegen Polieren der feinen Gesteinskör-nungen (Sande) gleichermaßen eine wichtige Rolle spielt, wenn die Packungsdichte nicht ausreichend optimiert wurde. Weitere Untersuchungen zu dieser Problematik sind notwendig.

Wahrscheinlich ist, dass feine Grindingtexturen ihre Makrotextur (Texturbereich mit Wellenlängen zwis-chen 0,5 und 50 mm) während der Nutzungszeit kaum verändern werden, da die Stege bereits bei Herstellung zu 100% gebrochen wurden. Somit werden sich die Oberflächeneigenschaften vermut-lich nur geringfügig ändern. Es obliegt weiteren Un-tersuchungen, diese These zu bestätigen und die Dauerhaftigkeit zu beweisen.

Gegenüber der Herstellung einer Waschbetonober-fläche kann der Prozess des Grindings als halbin-dustrieller Fertigungsprozess bezeichnet werden, mit dem ein wesentlich höheres Maß an Präzision und Gleichmäßigkeit der erzeugten Textur erreicht werden kann.

Beim Grinding von Betonfahrbahnen im Rahmen von Neubaumaßnahmen sollten für die dort zu be-handelnden großen Flächen breite und leistungsfä-hige Grindingmaschinen zum Einsatz kommen, um die Wirtschaftlichkeit und die Präzision des Verfah-rens zu erhöhen.

Für die Herstellung einer grindingtexturierten Beton-fahrbahn ist der Einsatz von Kiesbeton prinzipiell geeignet. Der nach [ZTV Beton-StB 07] erforderliche Einsatz von gebrochener Gesteinskörnung könnte somit entfallen. Damit wird die verwendbare Gesteinskörnung deutlich erweitert und somit wirt-schaftlicher. Allerdings sind Kiesbetone auf ihre Eignung als Oberbetone zunächst weiter zu untersu-chen und ihre Zusammensetzung zu optimieren.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse sind fol-gende weiterführende Fragestellungen zu bearbei-ten:

- Eine Optimierung der Fugenausbildung kann zu weiterer Lärminderung des Reifen-/Fahrbahn-geräusches führen. Dazu sind unter anderem Untersuchungen zu speziellen Anforderungen an die Fugengestaltung notwendig. Denkbar für eine Lärminderung wären das Verringern oder

Verkleinern der Phasen und das Füllen der Fu- gen (Verguss oder Profil) bis an die Oberkante der Fahrbahn.

- Der Einfluss der durch das Grinding erzeugten gerichteten Textur der Fahrbahnoberfläche auf die Fahrdynamik muss untersucht werden.
- Überlappungsbereiche beim Grinding sind aus fahrdynamischer Sicht so gering wie möglich zu halten. Der Einsatz des innerhalb des For-suchungsvorhabens entwickelten Mess- und Steuerungssystems zur Vermeidung von Über-lappungsbereichen bietet gute Voraussetzungen dafür.
- Eine hohe Packungsdichte der Gesteinskörnung erhöht den Gesteinsanteil in den Stegen der Grindingtextur und könnte sich somit positiv auf die Dauerhaftigkeit der Grindingtextur auswir-ken.
- Ein langfristiges Monitoring zur Entwicklung des Lärm- und Griffigkeitsverhaltens und zur Dauerhaftigkeit der erzeugten Grindingtexturen ist not-wendig.

## 11 Empfehlungen für die Praxis

Aus den technischen Schlussfolgerungen lassen sich Empfehlungen für die Praxis ableiten, um Grind-ingtexturen mit lärmindernder Wirkung herstellen zu können. Zu beachten ist dabei, dass die Dauer-haftigkeit der erzeugten Eigenschaften, insbeson-dere bei feinen Grindingtexturen noch weiter be-obachtet und untersucht werden muss. Ein systema-tisches Monitoring einer statistisch ausreichenden Anzahl an Grindingstrecken ist unabdingbar für die Absicherung dieser Forschungsergebnisse hin-sichtlich der Dauerhaftigkeit und Langlebigkeit.

Für die Praxis des Grinding mit lärmindernder Wir-kung sind zwei Anwendungsfälle zu unterscheiden: Herstellung der Grindingoberfläche im Zuge des Neubaus der Betondecke und Herstellung der Grin-dingoberfläche im Rahmen von Erhaltungsmaßnah-men am Bestandsbeton.

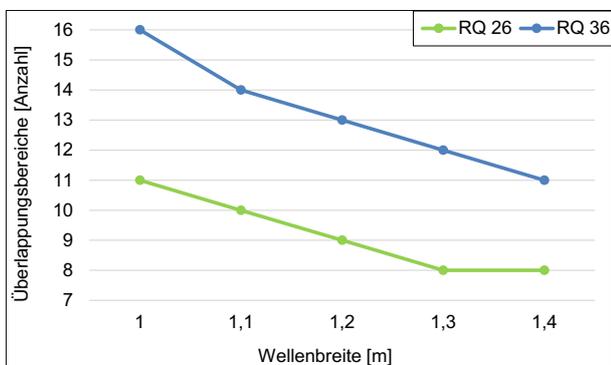
### 11.1 Grindingoberfläche im Zuge des Neubaus der Betondecke

Die Herstellung der Grindingoberfläche muss be-reits in den Ausschreibungsunterlagen berücksich-tigt werden. Beim Neubau der Betondecke ist eine hohe Grundebenheit erforderlich, wenn die Herstel-lung der Textur mittels Grinding wirtschaftlich sein soll. In anderen Fällen müsste zunächst ein Eben-heitsgrinding vorgeschaltet werden, bevor die ei-gentliche Textur mit lärmindernder Wirkung her-

gestellt werden kann. Der Oberbeton soll eine homogen dünne Mörtelschicht aufweisen, um die grobe Gesteinskörnung ohne Mühe anschneiden zu können. Des Weiteren ist es von Vorteil, wenn die Betondecke mit einer Dickenreserve gebaut wird, damit die Möglichkeit besteht, das Grinding im Nutzungszeitraum der Betondecke eventuell wiederholen zu können.

Die Praxisversuche haben gezeigt, dass der Oberbeton eine Mindestfestigkeit erreicht haben muss, bevor der Grindingvorgang begonnen werden kann. Es wird empfohlen, die Mindestfestigkeit als Spaltzugfestigkeit gemäß [TP B-StB] zu definieren. Je nach Festigkeit des Betons ist die Wahl der geeigneten Schneidblätter durch den Auftragnehmer vorzunehmen. Rotationsgeschwindigkeit und Vorschub sind ebenfalls durch den Auftragnehmer zu wählen und zwar so, dass eine gleichmäßige Textur entsteht und ein „Aufschwimmen“ der Grindingwelle beim Schneidvorgang vermieden wird.

Grundsätzlich sind schmalere Grindingwellen weniger geeignet, da sich die Zahl der Überlappungsbereiche erhöht und somit eine inhomogenere Oberflächentextur entsteht (Abbildung 337). Des Weiteren erhöht sich die Herstellungszeit signifikant, so dass ggf. Verkehrsführungskosten steigen und die Verfügbarkeit der Verkehrsanlage sinkt.



**Abbildung 337:** Anzahl der Überlappungsbereiche in Abhängigkeit von der Wellenbreite

Die Texturparameter sind durch die Vorgabe der Segmentbreite und des Segmentabstandes festzulegen. Die Schneidtiefe ist so anzupassen, dass die durch die Betondeckenfertigung entstandene Textur vollständig beseitigt und die grobe Gesteinskörnung angeschnitten wird. Folglich führt eine größere Mörtelschichtdicke zu einer höheren Abtragstiefe. Aus dimensionierungsrelevanten Gründen sollte die Gesamtabtragstiefe nicht mehr als 1 cm betragen.

Wenn die Anforderungen an die Ebenheit mit 4 mm, bezogen auf eine Messbasis von 4 m bei der hergestellten Betondecke eingehalten werden, ist das Grinding in einem Arbeitsgang möglich. Falls die

Unebenheiten größer sind, muss ein Ebenheitsgrinding vor dem akustischen Grinding vorgeschaltet werden.

Im Kontext mit den zuvor aufgeführten möglichen Gesamtabtragstiefen wird empfohlen, eine Dickenreserve von mindestens 1 cm beim Neubau zu realisieren.

Um die junge Betonmatrix des Oberbetons nicht zu beschädigen, sind Mindestanforderungen an die Festigkeit des Betons einzuhalten. Dabei ist jeweils der jüngste Betonabschnitt zu prüfen. Die Grindingarbeiten können aus den Erfahrungen der Erprobungsstrecken beginnen, wenn:

- Der Einzelwert der Spaltzugfestigkeit  $f_{ct,i,core}$  soll mindestens 3,0 MPa betragen.
- Der Mittelwert der Spaltzugfestigkeit  $f_{ct,m,core}$  aus drei Bohrkernscheiben des Oberbetons soll mindestens 3,3 MPa betragen.
- Der zu grindende Beton muss für jeden Einzelwert eine Druckfestigkeit  $f_{c,i,cube}$  von 35 MPa, geprüft am Bohrkern DN 150, aufweisen.
- Der Mittelwert der Druckfestigkeit  $f_{c,m,cube}$  soll mindestens 37 MPa, geprüft an drei Bohrkernen DN 150, betragen.

Es wird empfohlen, eine Mindestwellenbreite ab 1,30 m vorzugeben, um die Anzahl der Überlappungsbereiche zu minimieren. Weiterhin sollte die Summe der Breite der Überlappungsbereiche über den Querschnitt festgelegt werden. Die Überlappungsbereiche sollten insbesondere im Hauptfahrstreifen nicht in den Rollspuren angeordnet werden.

Der Scheibenbesatz der Grindingwelle sollte so vorgenommen werden, dass die Toleranzen in den Abmessungen gleicher Schneidscheiben untereinander minimal sind.

Das Grinding soll nach dem Kerbschnitt und vor Aufweitungsschnitt der Scheinfugen erfolgen.

Die Grindingmaschine muss mit einer Vorrichtung zur Direktabsaugung des beim Schneidvorgang anfallenden Materials ausgerüstet sein, so dass keine Schneidschlämme auf die Fahrbahn gelangen können. Neue Technologien lassen eine Aufbereitung der Schneidschlämme zu.

## 11.2 Grindingoberfläche im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen am Bestandsbeton

Bei Bestandsstrecken, bei denen im Rahmen von Erhaltungsmaßnahmen die Ebenheit, die Griffigkeit und/oder das Lärmverhalten verbessert werden sollen, müssen gegenüber einer Neubaustrecke in der Ausschreibung einige Anpassungen vorgenommen werden, die der vorhandenen Ebenheit und der

durch die Nacherhärtung des Betons erreichten Festigkeit Rechnung tragen.

Zunächst ist die Eignung der Strecke und speziell die des Oberbetons zu prüfen:

- Festigkeit des Oberbetons,
- Mörtelschichtdicke des Oberbetons,
- Polierresistenz der groben und feinen Gesteinskörnung,
- Unebenheiten vor dem Grinding.

Weiterhin wird empfohlen, eine Fugensanierung dem Grinding nachzuschalten.

Folgende Aspekte sind zusätzlich zu beachten:

- Die Ebenheit der Fahrbahn nach dem Grinding muss den Anforderungen der [TP Eben] entsprechen, Unebenheiten von  $\leq 4$  mm, bezogen auf eine Messbasis von 4 m, sollen zugelassen werden.
- Gegebenenfalls muss ein Ebenheitsgrinding vor dem eigentlichen Grinding vorgeschaltet werden, um große Unebenheiten zu beseitigen.
- Die Abtragstiefe darf im Kontext mit der Gesamtdeckendicke 10 mm nicht überschreiten, um die Dicke der Betondecke nicht so weit zu verringern, dass daraus Folgeschäden entstehen. Bei voraussichtlicher Überschreitung dieses Wertes ist im Vorfeld eine Nachrechnung der Betondecke erforderlich, um die Restnutzungsdauer rechnerisch abzusichern.
- Durch die altersbedingte erhöhte Festigkeit des Betons ist bei der Ausführung des Grindens auf die Wahl geeigneter Schneidwerkzeuge zu achten.
- In Abhängigkeit von der Festigkeit des Betons muss Segmentanpressdruck und Vortriebsgeschwindigkeit so gewählt werden, dass ein „Aufschwimmen“ vermieden wird.
- In den Übergangsbereichen zum Bestand ist die Schneidtiefe derart anzupassen, dass keine Stufen und Verwerfungen entstehen.
- Die vorhandene Gradienten- und Querneigung sind beizubehalten.

Alle anderen Anforderungen entsprechen denen des Grindings einer Neubaustrecke.

## Literatur

- [AWDSTAKO], Dimensionierungssoftware für Betondecken gem. [RDO Beton 09], Version 1.7
- [FE 09.0188/2011/ERB], Villaret, S., Riwe, A., Kiehne, A., Villaret, K.: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton
- [FE 08.0194/2008/LGB], Gehlen, Lowke, Skarabis: Nachbehandlung von Waschbetonoberflächen
- [FE 08.0210/2010/ORB], Villaret, Alber, Alte-Teigeler, Beckenbauer, Frohböse, Pichottka, Schmidt: Untersuchung der lärmtechnischen Eigenschaften von Betonfahrbahndecken mit Grinding-Oberflächen
- [FE 08.0211/2011/OGB], Villaret, Alber, Beckenbauer, Frohböse, Skarabis: Akustische Optimierung von Betonoberflächen mit verbesserten Grinding-Verfahren
- [FE 08.0219/2012/IGB], Villaret, Frohböse: Grindingtexturierte Waschbetondecken zur dauerhaften Wiederherstellung der Oberflächeneigenschaften
- [FE 04.195/2004/BRB], Schmidt: Alternative Anwendung zum Griffigkeitsmessverfahren SKM durch das kombinierte Griffigkeitsmessverfahren mit SRT-Pendel und Ausflussmesser
- [BECKENBAUER I], „Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche“, Geräuschkindernde Fahrbahneläge in der Praxis - 4. Informationstage, 11./12.06.2008
- [BECKENBAUER II], et al.: „Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 847, August 2002
- [BE/AN/BÜ], Beckenbauer, Angst, Bürgisser: „Simulation of tyre/road noise as a tool for the evaluation of the acoustic behaviour of road surfaces“, Proc. Euroasphalt&Eurobitume, Istanbul, 2012
- [BE/KR], Beckenbauer, Kropp: „A hybrid model for analysis and design of low noise road surfaces“, Proc. EuroNoise conference, Tampere, Finland, paper no. 228, 2006
- [Calc 2013], Dhondt, G.: CalculiX, FEM-Programm, Version 2.5, 2013
- [de Larrard] de Larrard, F.: Concrete Mixture Proportioning – A scientific Approach, E & FN Spon, London 1999
- [FRENTRESS] Frentress, D.: Vortrag am 20.02.2013 im Rahmen einer Fortbildungsveranstaltung in North Dakota (LTAP: Local Technical Assistance Program).
- [LEISTRA], Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr - Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche" der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und

des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), BASt-Bericht S37, 2005

[LEISTRA 1], Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche (LeiStra1)“ Schlussbericht: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Straßenbau, Heft 37 (2004); hier: Teilprojekt TP 3122 (in situ-Messverfahren Strömungswiderstand).

[LEISTRA 3], Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 3“, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, laufendes Projekt seit 2010, <http://www.leistra3.de>

[MOBA 1] <http://www.moba.de/de/komponenten/sensoren/big-sonic-ski-modular.html>

[MOBA 2] <http://www.moba.de/de/komponenten/sensoren/sonic-ski.html>

[MOBA 3] <http://www.moba.de/de/produkte/baubereich/nivellierung/moba-matic.html>

[MnROAD]  
<http://www.dot.state.mn.us/mnroad/testsections/index.html>

[SCOFIELD] Scofield, L., Bernhard, R., Donovan, P.: Development of the Next Generation Concrete Surface(s), 11<sup>th</sup> International Symposium On Concrete Roads, Seville 2010.

[ST/WIE], Stöckert, U.; Wieland M.; Kley A.: „Waschbeton – Lärmtechnische Verbesserung?“, Straße und Autobahn, März 2011

[VI/KAY/KIE/PF/RI], Villaret, Kayser, Kiehne, Pfeifer, Riwe: Grundlagen zur Erfassung der Belastung für die analytische Dimensionierung von Straßenbefestigungen - Teil Betonstraßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1050, Bonn 2010

## Verwendete Regelwerke

[AL Sp-Beton], Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen, Ausgabe 2006, FGSV, Köln

[CPX1] ISO/CD 11819-2: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method. Entwurf, Arbeitsvorlage vom 13.12.2000

[CPX2] ISO/CD 3rd 11819-2: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method. Entwurf, Arbeitsvorlage vom 20.04.2009

[CPX3] ISO/DIS 11819-2: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic

noise – Part 2: The close-proximity method. Norm-Entwurf vom 30.08.2012

[CPX4] ISO TS 11819-3: Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference tyres. Information aus der Arbeitsgruppe WG33, 2012

[Frostprüfung von Beton], BAW Merkblatt „Frostprüfung von Beton (MFB)“, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Ausgabe 2012

[DIN 1097-8], Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 8: Bestimmung des Polierwertes – Deutsche Fassung EN 1097-8:2009

[DIN CEN/TS 12390-9], Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung, Ausgabedatum: 2006-08

[DIN EN 12350-4], Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß; Deutsche Fassung, Ausgabedatum: 2009-08

[DIN EN 12350-6], Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte; Deutsche Fassung, Ausgabedatum: 2011-03

[DIN EN 12350-7], Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren; Deutsche Fassung, Ausgabedatum: 2009-08

[DIN EN 12390-2], Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung, Ausgabedatum: 2009-08

[DIN EN 12390-3], Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung, Ausgabedatum: 2009-07

[DIN EN ISO 13473-1], Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe, Ausgabedatum 2004-07

[DIN EN 29053] - Akustik; Materialien für akustische Anwendungen; Bestimmung des Strömungswiderstandes (ISO 9053:1991); Deutsche Fassung, Ausgabedatum 1993-05

[DIN EN ISO 4287], Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287: 1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287: 1998 + AC:2008 + A1:2009

[M BGriff] – Merkblatt zur Bewertung der Straßen-griffigkeit bei Nässe, Ausgabe 2012, FGSV, Köln

- [RDO Beton 09], FGSV: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, Ausgabe 2009, FGSV, Köln
- [RSTO 12], Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012, FGSV, Köln
- [SPB1] Verfahren zur Messung der Geräuschemission von Straßenoberflächen (GStrO), herausgegeben durch den Bundesminister für Verkehr, Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 16/1992, Bonn, 1992
- [SPB2] DIN EN ISO 11819-1: Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic. Part 1. Statistical Pass-By method. September 1997
- [SPB4] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/2006 vom 17. Februar 2006 (S 13/7244.4/01, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung) zu Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90 – Fahrbahnoberflächen-Korrekturwerte DStrO für Betone mit Waschbetonoberflächen mit Anlage: Statuspapier Deckschichten aus Waschbeton der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vom 03.11.2003
- [SPB5] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 3/2009 vom 31. März 2009 (S 13/7144.2/02, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung) zu Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90 – Fahrbahnoberflächen-Korrekturwerte DStrO für offenporigen Asphalt mit Anlage: Statuspapier Offenporige Asphaltdeckschichten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vom 10.02.2009
- [TL Beton-StB 07], Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007, FGSV, Köln
- [TL Gestein-StB 04/07], Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004/Fassung 2007, FGSV, Köln
- [TP Eben], Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen, Ausgabe 2009, FGSV, Köln
- [TP Griff-StB (SKM)], Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), Ausgabe 2007, FGSV, Köln
- [ZTV Beton-StB 07], Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007, FGSV, Köln
- [ZTV ZEB-StB], Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, Ausgabe 2006, FGSV, Köln

## Bilder

Abbildung 1: Grindingwelle (Breite: 1,20 m)

Abbildung 2: Schneidscheibe (links) mit Distanzscheibe (rechts)

Abbildung 3: Diamantbesetzte Schneidsegmente

Abbildung 4: Prinzipskizze der Anordnung von Schneidscheibe und Distanzscheibe

Abbildung 5: Betonoberfläche unmittelbar nach dem Grindingvorgang

Abbildung 6: Einfluss der Anzahl an Schneidscheiben auf die sich ergebende Grindingoberfläche

Abbildung 7: Stufenbildung von Betonplatten, die ohne Dübel hergestellt wurde

Abbildung 8: Übergang zwischen „alter“ Textur (links: Kamm quer zur Fahrtrichtung) und neu hergestellter Grindingtextur (rechts)

Abbildung 9: Groovingwelle

Abbildung 10: Textur Grinding und Grooving

Abbildung 11: Oberfläche eines Texturgrindings

Abbildung 12: Optimierte Textur für Stadtstraßen: oben: Grindingvorgang, unten: Vergleich der optimierten Textur mit einer konventionellen Grindingoberfläche

Abbildung 13: Versuchsstand [SCOFIELD]

Abbildung 14: Grindingvorrichtung [SCOFIELD]

Abbildung 15: Messung der Reifen/Fahrbahngeräusche im Labor, [SCOFIELD]

Abbildung 16: Lasermessung der Oberfläche im Labor, [SCOFIELD]

Abbildung 17: Konventionelle Grindingoberfläche

Abbildung 18: Next Generation Concrete Surface NGCS

Abbildung 19: Forschungsgelände MnROAD (Bild Mitte), entnommen aus [MnROAD] mit NGCS-Testfeld (unten)

- Abbildung 20: Wellenbesatz für NGCS bei einem Arbeitsgang (oben), Wellenbesatz bei konventioneller Grindingtextur (unten)
- Abbildung 21: OBSI-Verfahren
- Abbildung 22: Ermittelte Geräuschemissionen (OBSI-Verfahren) der unterschiedlichen Testfelder; Anmerkung: ARFC: offenporiger Asphalt, CDG: konventionelles Grinding, Longitudinal Tining: Texturierung mittels Kamm in Längsrichtung [FRENTRESS]
- Abbildung 23: Ergebnisse der Geräuschemissionsmessungen auf einer Erprobungsstrecke in Kansas [SCOFIELD]
- Abbildung 24: Grindingtextur nach erstem Schneidvorgang auf der A 93
- Abbildung 25: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 93, RF Hof, km 129,410
- Abbildung 26: Grindingtextur nach zweitem Schneidvorgang auf der A 93
- Abbildung 27: Aufstellung der Messsysteme für die Texturmessung: 3D-Kamera (hinten) und Laserprofilometer (vorne)
- Abbildung 28: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 92, RF München, km 16,8
- Abbildung 29: Grindingtextur auf der A 92, RF München, km 16,8
- Abbildung 30: Unebenheiten im nachträglich angebauten Hauptfahrstreifen und Seitenstreifen A 92, RF München, km 16,7
- Abbildung 31: Unregelmäßige Textur im nachträglich angebauten Hauptfahrstreifen und Seitenstreifen A 92, RF München, km 16,7
- Abbildung 32: Abschnitt der Grindingmaßnahme A 92 während der Durchführung der in situ-Messungen (ca. km 16,75)
- Abbildung 33: Laserprofil der Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 8,2
- Abbildung 34: Laserprofil der Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 15,6
- Abbildung 35: Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 10,5
- Abbildung 36: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Dresden, km 7,9
- Abbildung 37: Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 7,9
- Abbildung 38: Laserprofil der Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 10,5
- Abbildung 39: Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 10,5
- Abbildung 40: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Dresden, km 14,8
- Abbildung 41: Grindingtextur auf der A 13, RF Dresden, km 14,8
- Abbildung 42: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Berlin, km 10,8
- Abbildung 43: Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 10,8
- Abbildung 44: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Berlin, km 12,95
- Abbildung 45: Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 12,95
- Abbildung 46: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Berlin, km 14,6
- Abbildung 47: Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 14,6
- Abbildung 48: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 13, RF Berlin, km 15,9
- Abbildung 49: Grindingtextur auf der A 13, RF Berlin, km 15,9
- Abbildung 50: Texturmessung mit ELAtextur
- Abbildung 51: Profillinie einer (Doppel)-Messung mit ELAtextur
- Abbildung 52: Prinzipskizze des Laserprofilometers
- Abbildung 53: Laserprofilometer im Einsatz (A 13, MQ2)
- Abbildung 54: Beispiel für ein Texturspektrum
- Abbildung 55: Prinzip der Streifenprojektion. Die Intensitäten der projizierten Streifen werden vom Objekt phasenmoduliert und von einer Digitalkamera registriert (Wikipedia und Fraunhofer IOF)
- Abbildung 56: Punktwolke von einer grobkörnigen Fahrbahnoberfläche der Dimension 6 mal 12 Zentimeter
- Abbildung 57: Texturoberfläche von Abbildung 56 nach Interpolation auf ein Rechteckgitter
- Abbildung 58: Illustration des Interpolationsschrittes von der irregulären Punktwolke (links) auf ein reguläres Gitter (rechts) auf einer Fläche von 15 mal 15 Millimetern
- Abbildung 59: Durchführung der 3D-Texturmessungen: Messaufbau und Anordnung der Einzelaufnahmen
- Abbildung 60: Messergebnis der 3D-Texturmessungen: Einzelaufnahme

- Abbildung 61: Messergebnis der 3D-Texturmessungen: Aus Einzelaufnahmen zusammengesetzte Textur von 2 m Länge
- Abbildung 62: Messgerät für den Strömungswiderstand
- Abbildung 63: Messgerät für Strömungswiderstand: Messfuß mit elastischer Zwischenlage in unbelastetem Zustand
- Abbildung 64: Messgerät zur Bestimmung des Strömungswiderstands in situ
- Abbildung 65: Auswertung einer Messreihe für den Strömungswiderstand  $R_s^*$  (A 13 – MQ1)
- Abbildung 66: Strömungswiderstände  $R_s^*$  für verschiedene Fahrbahnbeläge. Werte für die Testfelder des Sperenberg-Projekts [BECKENBAUER II]
- Abbildung 67: Strömungswiderstände  $R_s^*$  für verschiedene Fahrbahnbeläge. Werte für die Versuchsstrecken.
- Abbildung 68: Griffigkeitsbeiwerte A 93, RF Hof, 1. FS, km 130,0 bis km 127,4, 20 m-Mittelwerte
- Abbildung 69: Griffigkeitsbeiwerte A 93, RF Regensburg, 1. FS, km 127,4 bis km 129,55, 20 m-Mittelwerte
- Abbildung 70: Griffigkeitsbeiwerte A 92, RF München, 1. FS, km 17,0 bis km 16,5, 20 m-Mittelwerte
- Abbildung 71: Griffigkeitsbeiwerte A 13, RF Dresden
- Abbildung 72: Griffigkeitsbeiwerte A 13, RF Berlin
- Abbildung 73: Schema der Messanordnung zur Durchführung von Messungen nach der Statistischen Vorbeifahrtmethode (SPB). Derselbe Messaufbau wird auch für kontrollierte Vorbeifahrtmessungen (CPB) eingesetzt.
- Abbildung 74: Beispielhafter Messaufbau nach der Statistischen Vorbeifahrtmethode (SPB)
- Abbildung 75: Messreifen Premium, Winter und Eco für die Kontrollierte Vorbeifahrt (CPB)
- Abbildung 76: Gemessene Texturprofile der Messreifen Premium, Winter und Eco für die Kontrollierte Vorbeifahrt
- Abbildung 77: Messfahrzeug Volkswagen Passat Kombi für die Durchführung der Kontrollierten Vorbeifahrt. Die Rundumleuchte wurde zur Durchführung der Messfahrten abgenommen.
- Abbildung 78: CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) aller Messreifen auf der A 93, MQ1 (FR Nord, km 129,400)
- Abbildung 79: CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) aller Messreifen für  $v = 80$  km/h auf der A 13, MQ1 (FR Süd, km 7,900)
- Abbildung 80: CPX-Messanhänger zur Durchführung von Messungen nach der Nahfeldmessmethode.
- Abbildung 81: Müller-BBM Messanhänger.
- Abbildung 82: Reifen P mit Messmikrofon (Mikrofonposition vorne).
- Abbildung 83: Anordnung der Messmikrofone gemäß [CPX3] in der Draufsicht. Die Höhe der Messmikrofone über der Fahrbahnoberkante beträgt 100 mm.
- Abbildung 84: Verwendete Messreifentypen gemäß [CPX3]
- Abbildung 85: Vergleich der CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) für Messreifen ECO für  $v = 80$  km/h auf allen untersuchten Grindingstrecken
- Abbildung 86: CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) für Messreifen ECO bei  $v = 80$  km/h, gruppiert nach Grindingparametern
- Abbildung 87: Pegeldifferenz der CPB-Messergebnisse ( $DL_{mess}$ ) für Messreifen ECO bei  $v = 80$  km/h und  $v = 120$  km/h auf allen untersuchten Grindingstrecken (Pegeldifferenzen für A 93 liegen nicht vor, da hier  $v_{zul} = 80$  km/h)
- Abbildung 88: Beispiel für Texturprofile einer Grinding- und Grooving-Textur, gemessen mit Laserprofilometer: Boden einer Groovingrille (blau), Stegoberkante (grün), Profil am Rande einer Groovingrille mit deutlichen Artefakten (rot)
- Abbildung 89: Vergleich der SPERoN®-Rechenergebnisse (blaue Kurven) und der CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ , rote Kurven) für Messreifen ECO bei  $v = 80$  km/h an allen Messquerschnitten auf der A 13
- Abbildung 90: Pegeldifferenz  $L_{AF,max,120km/h} - L_{AF,max,80km/h}$  der CPB-Messergebnisse und der SPERoN®-Rechenergebnisse für Messreifen ECO und PREMIUM, Mittelwert über alle Messquerschnitte auf der A 13
- Abbildung 91: Links: Kontaktfläche  $A_i$  pro Umfangsabschnitt mit der Gesamtfläche  $A$ ; rechts: Steifigkeitsfunktion  $S_i(x)$  mit dem zugrunde liegenden Reifenprofil im Hintergrund.
- Abbildung 92: Querfuge auf Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke auf der BAB A 12 zum Zeitpunkt der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen.

- Abbildung 93: Sechs Längsprofile der Textur auf Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke auf der BAB A 12. X-Achse in mm, y-Achse in  $\mu\text{m}$ .
- Abbildung 94: Detail der sechs Längsprofile der Textur auf Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke auf der BAB A 12 mit künstlich eingefügter Querfuge mit einer Breite von 10 mm und einer Tiefe von 3 mm. X-Achse in mm, y-Achse in  $\mu\text{m}$ .
- Abbildung 95: Berechnete Terzspektren des Vorbeirollpegels, Reifen EcoContact, 50 km/h ohne Querfuge, Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke A 12
- Abbildung 96: Berechnete Terzspektren des Vorbeirollpegels, Reifen PremiumContact, 50 km/h ohne Querfuge, Testfeld 1.1 der Erprobungsstrecke A 12
- Abbildung 97: Gemessenes Terzspektrum des Vorbeirollpegels, Reifen EcoContact, Geschwindigkeit 50 km/h, Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12. Rote Kurve: gemessenes Terzspektrum, graue Kurve: berechnetes Terzspektrum Gesamtgeräusch
- Abbildung 98: Gemessenes Terzspektrum des Vorbeirollpegels, Reifen PremiumContact, Geschwindigkeit 50 km/h, Testfeld 1.1 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 12. Rote Kurve: gemessenes Terzspektrum, graue Kurve: berechnetes Terzspektrum Gesamtgeräusch
- Abbildung 99: Trapezförmige Profilstruktur der Texturen für die Parametervariation.
- Abbildung 100: Simulationsergebnisse für die Modelltexturen aus dem FE-Projekt 08.0211/2011/OGB.
- Abbildung 101: Texturen der Stegoberflächen bei identischem Wellenbesatz und unterschiedlichem akustischen Verhalten, hier: Textur A Profil 1
- Abbildung 102: Druckfestigkeit der Standardbetone im Alter von 28 Tagen
- Abbildung 103: Spaltzugfestigkeit der Standardbetone im Alter von 28 Tagen
- Abbildung 104: Druckfestigkeit der optimierten Betone im Alter von 28 Tagen
- Abbildung 105: Spaltzugfestigkeit der optimierten Betone im Alter von 28 Tagen
- Abbildung 106: Frost-Tausalz-Widerstand der optimierten Betone (CDF-Test: Prüfung erfolgte an einer geschalteten Fläche)
- Abbildung 107: Laborgrindingmaschine mit Sägekopf und Sägeblättern
- Abbildung 108: Sägeblatt ( $d = 350 \text{ mm}$ ) mit Schneidsegment (rechts)
- Abbildung 109: Anordnung der Sägeblätter und Distanzscheiben
- Abbildung 110: Schematische Darstellung der sich aus  $t = 3,0 - 2 \cdot (3,2 - 2,4)/2 = 2,2 \text{ [mm]}$  ergebenden Grindingtextur
- Abbildung 111: Messgerät ELAtextur auf einem Probekörper
- Abbildung 112: links: 3D-Laser zur Bestimmung von Oberflächeneigenschaften mit Probekörper (Bohrkern  $d = 150 \text{ mm}$ ), rechts: Beispiel einer eingelesenen Grindingtextur
- Abbildung 113: links: Foto der Schnittfläche eines Betons, rechts: Kennzeichnung der groben Gesteinskörnung im Bildbearbeitungsprogramm ImageJ, Anteil der groben Gesteinskörnung in diesem Beispiel: 49%
- Abbildung 114: oben: Prinzipskizze Messaufbau, unten: Texturmessung im Labor
- Abbildung 115: Bestimmung des Strömungswiderstands der Laborprobekörper
- Abbildung 116: SRT-Pendelgerät
- Abbildung 117: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF-Test: links: Prüfruhe zur Aufnahme der Proben, rechts: Verlauf der Abkühlung und Erwärmung
- Abbildung 118: Aachener Ravelling Tester (ARTe)
- Abbildung 119: Simulation der Praxiseinwirkungen im Labor
- Abbildung 120: links: Prallabriebgerät mit Probekörper, rechts: Kunststoffkugeln zur Prallabriebbeanspruchung
- Abbildung 121: Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: ETD- und SRT-Werte der Betone 1, 2 und 3 mit Textur 1
- Abbildung 122: Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Akustische Eigenschaften der Betone 1, 2 und 3 mit Textur 1
- Abbildung 123: Einfluss der Segmentbreite (Segmentabstand einheitlich 2,2 mm) auf die akustischen Eigenschaften der Textur vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Oben: ETD- Werte, unten: SRT-Werte
- Abbildung 124: Einfluss der Segmentbreite (Segmentabstand einheitlich 2,2 mm) auf die akustischen Eigenschaften der Textur vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage

- ARTE: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: Conti EcoContact)
- Abbildung 125: Einfluss des Segmentabstands (Segmentbreite einheitlich 2,8 mm) auf den ETD- und SRT-Wert der Textur von Beton 1 vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE
- Abbildung 126: Einfluss des Segmentabstands (Segmentbreite einheitlich 2,8 mm) auf den ETD- und SRT-Wert der Textur von Beton 3 vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE
- Abbildung 127: Einfluss des Segmentabstands (Segmentbreite einheitlich 2,8 mm) auf die akustischen Eigenschaften der Textur von Beton 1 vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: Conti EcoContact)
- Abbildung 128: Einfluss des Segmentabstands (Segmentbreite einheitlich 2,8 mm) auf die akustischen Eigenschaften der Textur von Beton 3 vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: Conti EcoContact)
- Abbildung 129: Einfluss des Groovings auf den ETD- Wert- und SRT-Wert der Textur von Beton 1
- Abbildung 130: Einfluss des Groovings auf den ETD- Wert- und SRT-Wert der Textur von Beton 3
- Abbildung 131: Einfluss des Groovings auf die akustischen Eigenschaften der Textur von Beton 1: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: Conti EcoContact)
- Abbildung 132: Einfluss des Groovings auf die akustischen Eigenschaften der Textur von Beton 1: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: Conti EcoContact)
- Abbildung 133: Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: ETD- und SRT-Werte der Standardbetone 1 (Waschbeton mit Gesteinskörnung aus Werk B) und 2 (Beton für Kunstrasentextur) und des optimierten Betons 3 (100% Rundkorn mit GK 32 mm)
- Abbildung 134: Packungsdichte des Gesteinskörnungsgemischs der Betone 3 (GK 32 mm), 4 (GK 16 mm) und 5 (GK 8 mm)
- Abbildung 135: Fotos der Oberflächen in Abhängigkeit der Schneidtiefe am Beispiel des Betons mit einem Größtkorn von 32 mm
- Abbildung 136: Anteil der groben Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Tiefe für Beton 3 (GK 32 mm)
- Abbildung 137: Anteil der groben Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Tiefe für die Betone 3 (GK 32 mm), 4 (GK 16 mm) und 5 (GK 8 mm)
- Abbildung 138: Frost-Tausalz-Widerstand der Textur in Abhängigkeit des Größtkorns der Betone 3 (GK 32 mm), 4 (GK 16 mm) und 5 (GK 8 mm)
- Abbildung 139: ETD- und SRT-Werte in Abhängigkeit des Größtkorns der Betone 3 (GK 32 mm), 4 (GK 16 mm) und 5 (GK 8 mm) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE
- Abbildung 140: Einfluss des Größtkorns auf die akustischen Eigenschaften der Textur vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Oben: Strömungswiderstand, unten: Berechneter Vorbeirollpegel ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: Conti EcoContact)
- Abbildung 141: ETD- und SRT-Werte vor und nach den jeweiligen Beanspruchungen, Werk A: Rundkorn (Kalkstein), Werk B: gebrochene Gesteinskörnung (Rhyolith), Werk C: gebrochene Gesteinskörnung (Andesit)
- Abbildung 142: Fotos der Probekörper nach Beanspruchungsende, Werk A: Rundkorn (Kalkstein), Werk B: gebrochene Gesteinskörnung (Rhyolith), Werk C: : gebrochene Gesteinskörnung (Andesit)
- Abbildung 143: Einfluss der Betonfestigkeit auf den ETD- und SRT-Wert von Beton 2 (Druckfestigkeit: 45,2 MPa) und Beton 6 (Druckfestigkeit: 55,9 MPa) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE
- Abbildung 144: Einfluss der Betonfestigkeit auf den Strömungswiderstand und den berechneten Vorbeirollpegel ( $v = 120 \text{ km/h}$ , Reifentyp: Conti EcoContact) von Beton 2 (Druckfestigkeit: 45,2 MPa) und Beton 6 (Druckfestigkeit: 55,9 MPa) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE
- Abbildung 145: Fotos der Oberflächen in Abhängigkeit des Grindingzeitpunkts, obere Reihe: Beton 2 mit CEM I, untere Reihe: Beton 2 mit CEM III/A
- Abbildung 146: Anzahl der beim Grinding und Grooving herausgelösten Gesteinskörner (Beton 2 mit CEM I und CEM III/A)

- Abbildung 147: ETD- und SRT-Werte der Betone zu den jeweiligen Grindingzeitpunkten
- Abbildung 148: Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Betone zu den jeweiligen Grindingzeitpunkten
- Abbildung 149: Frost- Tausalz-Widerstand der Texturen in Abhängigkeit des Grindingzeitpunkts (Prüfalter: 28 d): Oben: Beton 2 mit CEM I, unten: Beton 2 mit CEM II/A
- Abbildung 150: Oben: Anzahl der beim Grinding und Grooving herausgelösten Gesteinskörner (beide Versuchsreihen des Beton 2 mit CEM I), unten: Druck- und Spaltzugfestigkeit der zweiten Versuchsreihe des Beton 2 mit CEM I
- Abbildung 151: Frost-Tausalz-Widerstand der Texturen in Abhängigkeit der Nachbehandlung (Beton 2 CEM I, Prüfalter: 28 d)
- Abbildung 152: Berechnete Rollgeräuschkomponenten  $L_{pA, mech}$  und  $L_{pA, aero}$  in Abhängigkeit von der Oberflächentextur im Neuzustand,  $v = 80$  km/h, Gestrichelte Kreise: Gruppe der optimalen Grinding-Beton-Kombinationen (Durchmesser der Kreise:  $\pm 0,5$  dB(A)).
- Abbildung 153: Verhältnis der Biegespannungen vor und nach dem Grinding
- Abbildung 154: Wirkung an Längs- und Querfuge
- Abbildung 155: Spannungen im Querschnitt bei unterschiedlicher Betonqualität
- Abbildung 156: Modell der Platte mit Unterlage
- Abbildung 157: Temperaturgradient im TLF 1
- Abbildung 158: Temperaturgradient im TLF 2
- Abbildung 159: horizontale Spannungen in Fahrtrichtung
- Abbildung 160: Vertikalspannungen an der Plattenecke (rot: Zugspannungen, grün/blau: Druckspannungen) beim Temperaturlastfall 2
- Abbildung 161: Spannungskonzentrationen unter der Radlast
- Abbildung 162: Biegespannungen infolge Horizontallast
- Abbildung 163: räumliche Abbildung des Simulationsmodells
- Abbildung 164: Lage und Reihenfolge der Bahnen im BumpCutting-Prozess
- Abbildung 165: Simulationsergebnis für die 1. Grinding-Bahn
- Abbildung 166: Simulationsergebnis für die 2. Grinding-Bahn
- Abbildung 167: Gesamtergebnis für alle Grinding-Bahnen
- Abbildung 168: Gesamtergebnis für um 2 mm „ausgefahrene“ BumpCutting (BC)-Wippe
- Abbildung 169: Gesamtergebnis für um 2 mm „eingezogene“ BumpCutting (BC)-Wippe
- Abbildung 170: Überfahrt über ein 1 m langes und 5 cm hohes Einzelhindernis (Einzug BC-Wippe: 0 mm)
- Abbildung 171: Überfahrt über ein 1 m langes und 5 cm hohes Einzelhindernis (Einzug BC-Wippe: -20 mm)
- Abbildung 172: Überfahrt über ein 1 m langes und 5 cm hohes Einzelhindernis (Einzug BC-Wippe: 1 mm)
- Abbildung 173: Simulationsergebnis für das „Kopier“-Grinding (Einzug BC-Wippe: 0 mm)
- Abbildung 174: Durchschnittliche Verbesserung der Ebenheit im Mittel aller berechneten Indizes bei regellosen Unebenheiten (Einzug BC-Wippe: 0 mm)
- Abbildung 175: Durchschnittliche Reduzierung der Amplituden bei sinusförmigen, periodischen Unebenheiten
- Abbildung 176: Durchschnittliche Höhenreduzierung bei sinusförmigen Einzelhindernissen
- Abbildung 177: Profilbild für „BC-Einzug 1 mm“ und „BC-Einzug 2 mm“ am Beispiel eines 5 m langen und 1 cm hohen sinusförmigen Einzelhindernisses
- Abbildung 178: Darstellung des Messkonzeptes zur Anwendung an der Grindingmaschine
- Abbildung 179: System „Big Sonic Ski“ Modular® [MOBA 1]
- Abbildung 180: Sensor Sonic-Ski® [MOBA 2]
- Abbildung 181: Nivelliersystem MOBA-matic® [MOBA 3]
- Abbildung 182: Messaufbau mit Einzelkomponenten
- Abbildung 183: Position der Sensoren
- Abbildung 184: Grundeinstellung der Maschine
- Abbildung 185: Steuerungskonzept
- Abbildung 186: Durchschnittliche Verbesserung der Ebenheit im Mittel aller berechneten Indizes bei regellosen Unebenheiten (Einzug BC-Wippe: 0 mm); Vergleich zwischen gesteuertem und ungesteuertem Betrieb.

- Abbildung 187: Durchschnittliche Reduzierung der Amplituden bei sinusförmigen, periodischen Unebenheiten; Vergleich zwischen gesteuertem und ungesteuertem Betrieb
- Abbildung 188: Vergleich von gesteuertem und ungesteuertem Betrieb; Verbesserung im Wellenlängen- und Amplitudenbereich bei wellenförmigen periodischen Unebenheiten
- Abbildung 189: Durchschnittliche Reduzierung der Amplituden bei sinusförmigen Einzelunebenheiten; Vergleich zwischen gesteuertem und ungesteuertem Betrieb
- Abbildung 190: Vergleich von gesteuertem und ungesteuertem Betrieb; Verbesserung im Hindernislängen- und -höhenbereich bei wellenförmigen Einzelunebenheiten
- Abbildung 191: Negativunebenheit (Beispiel)
- Abbildung 192: Einfluss des Referenzfehlers
- Abbildung 193: Steueralgorithmen
- Abbildung 194: Unterschiede im gegründeten Längsprofil durch unterschiedliche Steueralgorithmen
- Abbildung 195: Eigenfrequenzen und Wellenlängen
- Abbildung 196: Sensoren vorn
- Abbildung 197: Sensoren hinten
- Abbildung 198: Sensoren mitte
- Abbildung 199: Regler und Verteilerbox links
- Abbildung 200: Visier des GRex 5510
- Abbildung 201: Überlappungsbereich
- Abbildung 202: Überlappungsbereich im Detail
- Abbildung 203: Messprinzip des Lichtschnittverfahrens (Quelle: Automation Technology)
- Abbildung 204: Lichtschnitt einer Grindingoberfläche
- Abbildung 205: Digitalisierte Aufnahme eines Lichtschnittes
- Abbildung 206: Lichtschnitt, wie er bei der Überlappungskontrolle auftreten könnte
- Abbildung 207: Geräteträger mit Verstelleinheit
- Abbildung 208: Anzeigemodul
- Abbildung 209: Funktionsprinzip Anzeigemodul
- Abbildung 210: Testbetrieb auf der A 93
- Abbildung 211: Detektionseinheit im Betriebsmodus
- Abbildung 212: Visuelle Anzeige
- Abbildung 213: Erprobungsstrecke auf der A 12 bei km 35,1 vor der grundhaften Erneuerung
- Abbildung 214: Oberbetone und Texturen der Erprobungsstrecke auf der A 12
- Abbildung 215: Texturgeometrien der Erprobungsstrecke auf der A 12
- Abbildung 216: Spaltzugfestigkeit der Bohrkernscheiben des Oberbetons im Alter von sieben Tagen (Anmerkung: Am Waschbeton mit Ausfallkörnung wurden keine Bohrkern entnommen)
- Abbildung 217: Grinding auf der Erprobungsstrecke A 12
- Abbildung 218: Grindingwelle mit Wellenbesatz für Textur 1
- Abbildung 219: Texturgeometrien am Beispiel des Waschbetons mit Ausfallkörnung
- Abbildung 220: Kornausbrüche entlang der Groovingrillen am Beispiel des Waschbetons mit Ausfallkörnung und Textur 3
- Abbildung 221: Mittelwerte der Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone der Erprobungsstrecke A 12
- Abbildung 222: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 1.1
- Abbildung 223: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 1.1
- Abbildung 224: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 1.2
- Abbildung 225: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 1.2
- Abbildung 226: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 1.3
- Abbildung 227: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 1.3
- Abbildung 228: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 2.3
- Abbildung 229: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 2.3
- Abbildung 230: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 2.2
- Abbildung 231: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 2.2
- Abbildung 232: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 2.1
- Abbildung 233: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 2.1

- Abbildung 234: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 3.1
- Abbildung 235: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 3.1
- Abbildung 236: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 3.2
- Abbildung 237: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 3.2
- Abbildung 238: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 12, Testfeld 3.3
- Abbildung 239: Grindingtextur auf der A 12, Testfeld 3.3
- Abbildung 240: Spezifischer texturinduzierter Strömungswiderstand  $R_s^*$  für die Testfelder der A 12
- Abbildung 241: Ergebnis der 3D-Texturmessung, Testfeld 1.1
- Abbildung 242: CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ), Reifen EcoContact, Testfeld 1.1 bis 1.3 der Erprobungsstrecke A 12
- Abbildung 243: Vergleich der CPB-Messergebnisse ( $L_{AF,max}$ ) für Messreifen ECO für  $v = 80$  km/h auf allen untersuchten Grindingabschnitten der A 12
- Abbildung 244: CPX-Messergebnisse der Erprobungsstrecke A 12. Reifen P, Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.
- Abbildung 245: CPX-Messergebnisse der Erprobungsstrecke A 12. Reifen H, Referenzgeschwindigkeit 80 km/h.
- Abbildung 246: Ergebnis der 3D-Texturmessung für Testfeld 1.2 (Beton 1 ohne Grooving). Blau: Textur-Ausschnitt, der in Abbildung 247 im Detail dargestellt ist.
- Abbildung 247: Ausschnitt der 3D-Textur für Testfeld 1.2 (Beton 1 ohne Grooving). X-Achse und y-Achse: 200 Punkte im Abstand von jeweils 0,4 mm. Z-Achse: -2 mm bis +1 mm.
- Abbildung 248: Ausschnitt der 3D-Textur für Testfeld 2.2 (Beton 2 ohne Grooving). X-Achse und y-Achse: 200 Punkte im Abstand von jeweils 0,4 mm. Z-Achse: -2 mm bis +1 mm.
- Abbildung 249: Griffigkeitsmesssystem ViaFriction (oben) und Schlupfkurve (unten)
- Abbildung 250: Griffigkeitsmessung mit ViaFriction auf der Erprobungsstrecke A 12, Abschnittsgrenzen violett
- Abbildung 251: Griffigkeitsmessung mit SKM auf der Erprobungsstrecke A 12, Abschnittsgrenzen violett
- Abbildung 252: Abwitterungen der Bohrkern der A 12 mit Textur 3
- Abbildung 253: Nahaufnahme eines Bohrkerns des Unterbetons (Textur 3) nach 28 Frost-Tau-Wechseln
- Abbildung 254: Nahaufnahme eines Bohrkerns der Betone mit Waschbetonzusammensetzung (Textur 3) nach 28 Frost-Tau-Wechseln, oben: Ausfallkörnung, unten: WB stetig
- Abbildung 255: Abwitterungen der im Labor gegrindeten Betonplatten der A 12 (Grinding mit Textur 3)
- Abbildung 256: Oberfläche der Grindingprobekörper des Unterbetons nach 28 Frost-Tau-Wechseln: Links: Bohrkern aus A 12, rechts: Bohrkern aus einer Platte, die im Labor gegrindet wurde.
- Abbildung 257: Prozentualer Anteil der groben Gesteinskörnung auf den Grindingtexturen der untersuchten Betone (Bohrkerne aus der A 12 und im Labor gegrindete Betonplatten) nach 28 Frost-Tau-Wechseln
- Abbildung 258: Bohrkern (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 1
- Abbildung 259: Bohrkern (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 1
- Abbildung 260: Bohrkern (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 2
- Abbildung 261: Bohrkern (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 2
- Abbildung 262: Bohrkern (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 3
- Abbildung 263: Bohrkern (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Unterbeton, Textur 3
- Abbildung 264: Bohrkern (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 1
- Abbildung 265: Bohrkern (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 1
- Abbildung 266: Bohrkern (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTe: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 2

- Abbildung 267: Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 2
- Abbildung 268: Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 3
- Abbildung 269: Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit Ausfallkörnung, Textur 3
- Abbildung 270: Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 1
- Abbildung 271: Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 1
- Abbildung 272: Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 2
- Abbildung 273: Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 2
- Abbildung 274: Bohrkerne (d = 300 mm) vor Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 3
- Abbildung 275: Bohrkerne (d = 300 mm) nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE: Waschbeton mit stetiger Sieblinie, Textur 3
- Abbildung 276: ETD- Werte der Bohrkerne (d = 300 mm) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE
- Abbildung 277: SRT- Werte der Bohrkerne (d = 300 mm) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE
- Abbildung 278: Texturinduzierte Strömungswiderstände der Bohrkerne (d = 300 mm) vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE
- Abbildung 279: Berechnete Vorbeifrollpegel der Bohrkerne vor und nach Beanspruchung mit der Prüfanlage ARTE (v = 120 km/h, Reifentyp: ContiEcoContact)
- Abbildung 280: Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$ , V = 80 km/h, Neuzustand
- Abbildung 281: Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$ , V = 80 km/h, nach Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 282: Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$ , V = 120 km/h, Neuzustand
- Abbildung 283: Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$ , V = 120 km/h, nach Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 284: Texturprofil und Foto der Bohrkernoberfläche Bohrkern B3T2, Neuzustand
- Abbildung 285: Texturprofil und Foto der Bohrkernoberfläche Bohrkern B3T2, nach der Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 286: Texturprofil und Foto der Bohrkernoberfläche Bohrkern B2T3, Neuzustand
- Abbildung 287: Texturprofil und Foto der Bohrkernoberfläche Bohrkern B2T3, nach der Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 288: Fotos der Oberfläche von Probekörper HF3 vor (oben) und nach (unten) der Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 289: Fotos der Oberfläche von Probekörper UB08 vor (oben) und nach (unten) der Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 290: Fotos der Oberfläche von Probekörper UB16 vor (oben) und nach (unten) der Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 291: Fotos der Oberfläche von Probekörper UB32 vor (oben) und nach (unten) der Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 292: Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der Laborprobekörper, V = 80 km/h, Neuzustand
- Abbildung 293: Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der Laborprobekörper, V = 80 km/h, nach Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 294: Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der Laborprobekörper, V = 120 km/h, Neuzustand
- Abbildung 295: Berechnete A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{pA}$  der Laborprobekörper, V = 120 km/h, nach Beanspruchung im ARTE
- Abbildung 296: Oberbetone und Texturen der Erprobungsstrecke A 5
- Abbildung 297: Texturgeometrie der Erprobungsstrecke A 5
- Abbildung 298: Beginn der Betonierarbeiten bei km 610,280
- Abbildung 299: Runde Gesteinskörnung
- Abbildung 300: Tagesansatz zwischen Abschnitt VIII und VII
- Abbildung 301: Übergangsweise Kunstrasentextur der Fahrbahnoberfläche

- Abbildung 302: Grinding auf der Erprobungsstrecke A 5
- Abbildung 303: Wellenbesatz für Textur 2: oben: Grinding, unten: Grooving
- Abbildung 304: Texturgeometrien am Beispiel des Betons „Rundkorn GK 16 mm“ im Abschnitt VIII
- Abbildung 305: Mittelwerte der Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone der Erprobungsstrecke A 5: Abschnitt VI: 100% Rundkorn mit Größtkorn 32 mm, Abschnitt VII: 30% gebrochene Gesteinskörnung mit Größtkorn 22 mm, Abschnitt VIII: 100% Rundkorn mit Größtkorn 16 mm
- Abbildung 306: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld V-1
- Abbildung 307: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld V-1
- Abbildung 308: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VI-1
- Abbildung 309: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VI-1
- Abbildung 310: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VI-2
- Abbildung 311: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VI-2
- Abbildung 312: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VI-3
- Abbildung 313: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VI-3
- Abbildung 314: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VII-3
- Abbildung 315: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VII-3
- Abbildung 316: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VII-2
- Abbildung 317: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VII-2
- Abbildung 318: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VII-1
- Abbildung 319: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VII-1
- Abbildung 320: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VIII-1
- Abbildung 321: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VIII-1
- Abbildung 322: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VIII-2
- Abbildung 323: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VIII-2
- Abbildung 324: Laserprofil der Grindingtextur in Querrichtung auf der A 5, Testfeld VIII-3
- Abbildung 325: Grindingtextur auf der A 5, Testfeld VIII-3
- Abbildung 326: Werte des  $CPX_p$ -Index für die Messfahrten in Fahrtrichtung Nord vor Verkehrsfreigabe.  $v = 80$  km/h
- Abbildung 327: Werte und Standardabweichungen des  $CPX_p$ -Index für die Erprobungsstrecken mit akustischem Grinding. Oben: Testfelder auf der BAB A 12, Richtungsfahrbahn Berlin; unten: Testfelder auf der BAB A 5 vor Verkehrsfreigabe, Richtungsfahrbahn Frankfurt, CPX-Messfahrtrichtung Nord.  $v = 80$  km/h. Gestrichelte rote Linie: Anhaltswert des  $CPX_p$ -Index für Fahrbahnbeläge mit einem  $D_{StO}$ -Wert
- Abbildung 328: Werte des  $CPX_p$ -Index für die Messfahrten in Fahrtrichtung Nord nach Verkehrsfreigabe.  $v = 80$  km/h
- Abbildung 329: Werte und Standardabweichungen des  $CPX_p$ -Index für die Erprobungsstrecken mit akustischem Grinding. Testfelder auf der BAB A 5, Richtungsfahrbahn Frankfurt, CPX-Messfahrtrichtung Nord.  $v = 80$  km/h. Oben: vor Verkehrsfreigabe; unten: nach Verkehrsfreigabe. Gestrichelte rote Linie: Anhaltswert des  $CPX_p$ -Index für Fahrbahnbeläge mit einem  $D_{StrO}$ -Wert nach den RLS-90 von 0 dB(A).
- Abbildung 330: Griffigkeitsmessung mit SKM auf der Erprobungsstrecke A 5
- Abbildung 331: Textur-, Herstellungs- und Erfassungsdaten der Versuchsstrecke auf der A 13
- Abbildung 332: Zusammenstellung der Messergebnisse auf der Versuchsstrecke auf der A 13
- Abbildung 333: Textur-, Herstellungs- und Erfassungsdaten der Erprobungsstrecke auf der A 12
- Abbildung 334: Zusammenstellung der Messergebnisse auf der Erprobungsstrecke auf der A 12
- Abbildung 335: Textur-, Herstellungs- und Erfassungsdaten der Erprobungsstrecke auf der A 5
- Abbildung 336: Zusammenstellung der Messergebnisse auf der Erprobungsstrecke auf der A 5
- Abbildung 337: Anzahl der Überlappungsbereiche in Abhängigkeit von der Wellenbreite

## Tabellen

- Tabelle 1: Texturvarianten zur Kalibrierung des Rechenmodells SPERoN®
- Tabelle 2: Akustische Messungen auf dem Abschnitt der Grindingmaßnahme A 93
- Tabelle 3: Akustische Messungen auf dem Abschnitt der Grindingmaßnahme A 92
- Tabelle 4: Ergebnisse der Texturmessungen auf den Versuchsstrecken
- Tabelle 5: Ergebnisse der Strömungswiderstandsmessungen (n.v.: Ausfall des Messgeräts, kein Messwert vorhanden)
- Tabelle 6: Statistische Kennwerte der Griffigkeit auf den Versuchsstrecken
- Tabelle 7: Spaltzugfestigkeiten Oberbeton
- Tabelle 8: Spaltzugfestigkeiten Unterbeton
- Tabelle 9: Deckendicken
- Tabelle 10: Gesteinskörnungsfractionen für die Laborversuche
- Tabelle 11: Eigenschaften der verwendeten Gesteinskörnungen
- Tabelle 12: Beton 1 (Waschbeton)
- Tabelle 13: Beton 2: Oberbeton für z.B. Jutetuch- oder Kunstrasentextur
- Tabelle 14: Optimierung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit: Unterbetone mit gerundeter Gesteinskörnung, Größtkorn 32 mm (Beton 3)
- Tabelle 15: Optimierung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit: Unterbeton mit gerundeter Gesteinskörnung, Größtkorn 16 mm (Beton 4)
- Tabelle 16: Optimierung hinsichtlich Wirtschaftlichkeit: Unterbetone mit gerundeter Gesteinskörnung, Größtkorn 8 mm (Beton 5)
- Tabelle 17: Optimierung hinsichtlich der Dauerhaftigkeit bzw. Formgenauigkeit der Texturgeometrie (Beton 6)
- Tabelle 18: Art und Anzahl der für die jeweilige Untersuchung erforderlichen Probekörper
- Tabelle 19: Segment- und Blattkernbreite der Sägebblätter
- Tabelle 20: Distanzscheiben ( $d = 200$  mm)
- Tabelle 21: Textur 1 (Referenztextur)
- Tabelle 22: Einfluss Segmentbreite: Texturen 1, 2 und 3
- Tabelle 23: Einfluss Segmentabstand: Texturen 2, 4 und 5
- Tabelle 24: Einfluss eines zusätzlichen Groovings: Texturen 4 und 6
- Tabelle 25: Untersuchung der Dauerhaftigkeitseigenschaften: Textur 7
- Tabelle 26: Wellenbesatz der Textur 8
- Tabelle 27: maximale horizontale Zugspannung infolge Radlast in Fahrtrichtung [MPa]
- Tabelle 28: maximale horizontale Zugspannung infolge Radlast und Temperaturgradient in Fahrtrichtung [MPa]
- Tabelle 29: maximale vertikale Zugspannung infolge Radlast und Temperaturgradient in Fahrtrichtung [MPa]
- Tabelle 30: Stegflächen als prozentualer Anteil an der Fahrbahnfläche
- Tabelle 31: Betonzusammensetzungen auf der Erprobungsstrecke der A 12
- Tabelle 32: Frischbetoneigenschaften der Oberbetone zum Zeitpunkt der Probekörperherstellung
- Tabelle 33: Texturkennwerte A 12, Testfeld 1.1
- Tabelle 34: Texturkennwerte A 12, Testfeld 1.2
- Tabelle 35: Texturkennwerte A 12, Testfeld 1.3
- Tabelle 36: Texturkennwerte A 12, Testfeld 2.3
- Tabelle 37: Texturkennwerte A 12, Testfeld 2.2
- Tabelle 38: Texturkennwerte A 12, Testfeld 2.1
- Tabelle 39: Texturkennwerte A 12, Testfeld 3.1
- Tabelle 40: Texturkennwerte A 12, Testfeld 3.2
- Tabelle 41: Texturkennwerte A 12, Testfeld 3.3
- Tabelle 42: Ergebnisse der Strömungswiderstandsmessungen
- Tabelle 43: Mittlerer Strömungswiderstand  $R_s$  der Bohrkerne aus den Testfeldern der BAB A 12. Alle Werte in Pa s/m.
- Tabelle 44: Mittlerer Strömungswiderstand  $R_s$  der Bohrkerne aus den Laborprobekörpern. Alle Werte in Pa s/m
- Tabelle 45: Aus SPERoN® empfohlene Texturvarianten auf der Erprobungsstrecke A 5
- Tabelle 46: Anforderungen an Betonrezeptur Abschnitt V und VI der A 5
- Tabelle 47: Anforderungen an Betonrezeptur Unterbeton Abschnitt VII der A 5
- Tabelle 48: Anforderungen an Betonrezeptur Oberbeton Abschnitt VII der A 5

Tabelle 49: Anforderungen an Betonrezeptur Unterbeton Abschnitt VIII der A 5

Tabelle 50: Anforderungen an Betonrezeptur Oberbeton Abschnitt VIII der A 5

Tabelle 51: Frischbetoneigenschaften der Oberbetone zum Zeitpunkt der Probekörperherstellung

Tabelle 52: Texturkennwerte A 5, Testfeld V-1

Tabelle 53: Texturkennwerte A 5, Testfeld VI-1

Tabelle 54: Texturkennwerte A 5, Testfeld VI-2

Tabelle 55: Texturkennwerte A 5, Testfeld VI-3

Tabelle 56: Texturkennwerte A 5, Testfeld VII-3

Tabelle 57: Texturkennwerte A 5, Testfeld VII-2

Tabelle 58: Texturkennwerte A 5, Testfeld VII-1

Tabelle 59: Texturkennwerte A 5, Testfeld VIII-1

Tabelle 60: Texturkennwerte A 5, Testfeld VIII-2

Tabelle 61: Texturkennwerte A 5, Testfeld VIII-3

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2018

#### S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tiemann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherkenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

#### S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

#### S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 127: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton

Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 128: Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

#### S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins

€ 15,50

#### S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost

€ 15,50

#### S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser

€ 16,50

#### S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr

€ 22,50

**S 138: Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**

Groschup, Große, Eger, Freudenstein  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn**

Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**

Radenberg, Flottmann, Drewes  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummi-modifiziertem Bindemittel**

Radenberg, Manke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2020

**S 142: Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

**S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

Bräu, Vogt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 144: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

**S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren**

Weise, Werner, Maier, Wilsch  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze**

Radenberg, Gehrke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2021

**S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST**

Birle, Cudmani, Melsbach  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken**

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen**

Koukoulidou, Birle, Cudmani  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums**

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

**S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze**

Klein, Gehlen, Kränkel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken**

Mielich  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ**

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirsakawetz € 23,00

**S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)**

Büchler, Wistuba  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte**

Villaret, Augter, Kayser, Riwe  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen**

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW**

Schipek, Steffen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette**

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren**

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.