

---

# Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren

---

Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen  
Straßenbau Heft S 202

---

# **Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren**

**Weiterentwicklung der SKM-Griffigkeits-  
messung durch Berücksichtigung der  
gemessenen Vertikalkraft**

---

von

Jürgen Schmidt, Julius Schmidt, Johannes Schmidt, Michael Müller  
IWS Messtechnik GmbH, Celle

---

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.

Seit 2015 stehen die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 04.0282  
Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der  
Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren (SKM)

Fachbetreuung:  
André Meyer

Referat:  
Zustandserfassung und -bewertung

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

Redaktion:  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:  
MedienMélange: 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 978-3-95606-785-3 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s202>

Bergisch Gladbach, Juni 2024

# Kurzfassung - Abstract

## Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren

### Weiterentwicklung der SKM-Griffigkeitsmessung durch Berücksichtigung der gemessenen Vertikalkraft

Ziel des Forschungsprojektes ist, aufbauend auf den SKM-Messdaten in 0,1m-Auflösung, eine einheitliche Vorgabe für die Aufzeichnung der Sensorrohdaten zu entwickeln. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf eine hohe Aussagekraft bezüglich der lokalen Fahrbahngriffigkeit gelegt.

Derzeit wird in Deutschland der Seitenkraftbeiwert des SKM-Messverfahrens als Quotient aus der gemessenen Seitenkraft und einer genau definierten, statisch bestimmten Normalkraft gebildet. Während die gemessene Seitenkraft eine zeit- und räumlich veränderliche Größe darstellt, ist die statisch bestimmte Normalkraft eine Konstante.

Dies hat zur Folge, dass der lokal bestimmte Seitenkraftbeiwert nicht nur von Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, sondern auch der aktuellen Vertikalkraft abhängt, die zum Teil deutlich von der statisch ermittelten Normalkraft abweicht. Dies bedingte in der Vergangenheit, durch Filterung und Mittelwertbildung über längere Streckenabschnitte diese dynamischen Einflüsse auszugleichen.

In dieser Arbeit wird nun eine Vorgehensweise entwickelt, mit der zum einen die Frage der Signalfilterung vereinheitlicht wird und gleichzeitig unter Nutzung der Messung der Vertikalkraft wesentlich kürzere Bewertungsabschnitte gebildet werden können.

Dabei wird der Quotient aus Seitenkraft und Normalkraft weiterhin konform mit der bestehenden TP Griff-StB (SKM) gebildet, um bislang ungeklärte Fragen wie beispielsweise Zusammenhänge zwischen verschiedenen Lastzuständen am Messreifen, Veränderungen im Drainageverhalten bei unterschiedlich großem Kontaktpatch zur Fahrbahn, variabler Reibungswärme durch verschiedene Auflastsituationen etc. zu umgehen.

Die hier entwickelten Vorschläge sind konform mit der bestehenden TP Griff-StB (SKM) und können dementsprechend sofort umgesetzt werden, um die Griffigkeit mit dem SKM-Messverfahren auch für sehr kurze Bewertungsabschnitte unter 10 m zuverlässig ermitteln zu können.

## Development of Fundamentals for Uniform Collection of Machine Raw Data in Sideway-Force Measurements

### Further development of the SKM skid resistance measurement by considering the measured vertical force

The aim of the research project is to develop a uniform specification for the recording and filtering of the raw sensor data based on the SKM measurement data in 0.1m resolution. Particular attention was paid to a high level of informative value with regard to the local road skid resistance.

In Germany, the sideway-force coefficient of the SKM measurement method is currently calculated as the quotient of the measured sideway-force and a precisely defined, statically determined normal force.

While the measured sideway-force represents a variable that changes over time and space, the statically determined normal force is a constant. In consequence the locally determined sideway-force coefficient depends not only on the properties of the road surface, but also on the current vertical force, which may differ significantly from the statically determined normal force. In the past, these dynamic influences had to be compensated through filtering and averaging over longer measured sections.

In this thesis, a procedure is developed with which, on the one hand, the question of signal filtering is standardized and, at the same time, significantly shorter evaluation sections can be formed using measured data of the vertical force.

The quotient of the sideway-force and the normal force will be in accordance with the existing technical standard in order to avoid open questions like the dependency between the sideway-force coefficient under different load conditions, changes in the drainage behaviour caused by size changing contact patches, variable frictional heating of the tire and its influence on friction behaviour of rubber in the contact area.

The suggestions developed here are conform with the existing technical standard and can accordingly be implemented immediately in order to be able to reliably determine the grip with the SKM measuring method even for very short evaluation sections smaller than 10 m.

# Summary

## Development of Fundamentals for Uniform Collection of Machine Raw Data in Sideway-Force Measurements

Further development of the SKM skid resistance measurement by considering the measured vertical force

### 1 Conceptual formulation

The sideway-force measurement method (SKM) has been used in Germany for more than 25 years to determine skid resistance of road surfaces. Due to its good repeatability and reproducibility this measurement technology -described in the TP Griff-StB (SKM), 2007 edition- has proven its usability both for the network-wide check of sufficient grip and for compliance tests of the required acceptance level of skid resistance of newly manufactured road surfaces within construction contracts.

According to TP Griff-StB (SKM), the measurement track has to be divided into 100m sections. For each section, an average value for the skid resistance is calculated. These sections are too large for many of today's questions. Sections of 10m or 20m in length would be more suitable. In the past, SKM measurements with this smaller section length have occasionally been tried, for example to evaluate smaller repair measures. The same applies to areas that are particularly affected by polishing, such as crossings, acceleration and deceleration lanes, curves and generally in towns. Effects of the section shortening on the test accuracy of the SKM measurement method were assumed, without being examined in detail so far.

Contrary to the British SCRIM measuring method, the design of the measuring mechanism for SKM devices is not precisely defined in all details. Depending on the manufacturer, the mechanical and electronic structure of the SKM measurement technology therefore may differ significantly in some cases. These differences affect the measurement result when shorter measurement sections are being evaluated. Older measuring systems have used analog filters to suppress periodic side force fluctuations, while newer systems initially record the data almost unfiltered and then average them.

The recording of 1m values introduced a few years ago (in some systems since 2004 optionally even in a 0.1m grid) shows a very wide range of side-force coefficients in the absence of analog low-pass filters with a cut-off frequency of 1-2Hz (Figure 1).

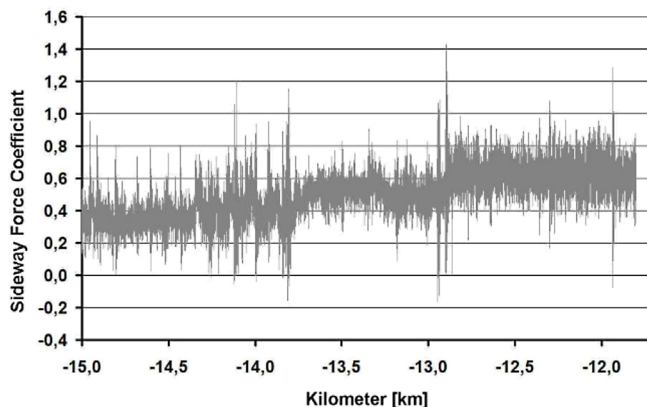
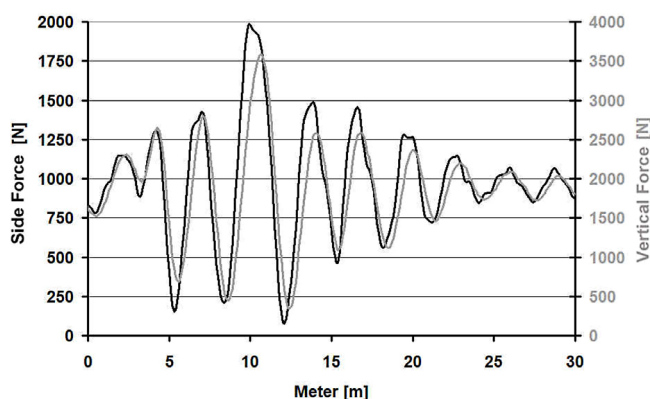


Fig. 1: Sideway-force measurement data with high local resolution (0.1m values)



**Fig. 2: Side force and correlating vertical force measurement data compared at a 0.1m resolution**

With higher resolution, the measurement data recording of the side forces reveals their periodic character (Figure 2).

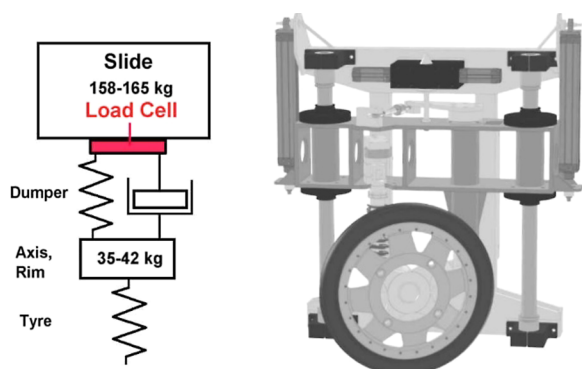
It has been assumed that these fluctuations are not caused by changes in the skid resistance of the pavement, but by the measurement principle itself. A first comparison between side force and vertical force (as shown in Figure 2) supports this assumption.

Taking into account the structural differences between various SKM measuring vehicles, a uniformly applicable method for recording raw machine data had to be developed with which reliable sideways-force coefficients can be determined even with high spatial resolution. The calculation method for the sideways-force coefficient also had to be adjusted. Since in the previous method a quotient of the dynamic side force and the statically determined vertical load has been calculated, the sideways-force coefficient followed the dynamic changes of the side force. The aim of the new calculation method is to eliminate the influence of the measuring mechanic on the measurement result as completely as possible in order to obtain sideways-force coefficients that reflect the skid resistance on the measurement section without distortion, even if the spatial resolution of the measurement data is high.

## 2 Methodology

As shown in Figure 2, a dynamic recording of the vertical force is therefore required.

The connection between the main mass formed by the carriage of the measuring mechanism and the shock absorber (Figure 3) is a standardized installation location for



**Fig. 3: The spring-mass system of the SKM measuring mechanism. Depending on the design, the distribution of the total mass of 200kg according to TP Griff-StB (SKM) between the slide and the other moving parts (shock absorber, wheel axle, rim, measuring tyre) may vary slightly.**

the recording of the vertical force. At this point a load cell can be easily implemented independently of the design of the SKM measuring mechanism. This mounting point is also preferred for the British SCRIM measuring method.

First, the frequency behaviour of the measuring mechanism was examined in the laboratory in detail. Various designs of measuring mechanics were taken into account, including the design of the SCRIM measuring mechanics.

For the development of a suitable correction method, the components involved in the natural frequency, in particular the shock absorber and the measuring tire, had to be characterized with regard to their effects on the natural frequency. Both components could change their properties due to aging. The viscoelastic properties of the test tire rubber also show a temperature dependency which in turn affects the natural frequency, due to a change in the spring stiffness of the tire.

A separate SKM measuring mechanism without a carrier vehicle had been used for the systematic investigation of these influencing factors in the laboratory. This approach had the advantage that the vehicle's own suspension could not interfere with the systematic examination of the individual components.

For the examination of the frequency behaviour both on the separate measuring mechanics and on complete measuring vehicles of different designs a roller test stand has been developed for dynamic investigations in the laboratory.

This roller stand allowed to differentiate between influences from the measurement mechanics and from the carrier vehicle during measurements.

Following the laboratory investigations, numerous test measurements were carried out with measuring vehicles equipped with SCRIM and SKM measuring mechanics.

The recording rate of the side force and the vertical force was increased significantly to around 4.5 kHz compared to the previous rate (0.1 m at 80 km/h corresponded to 220 Hz) in order to be able to examine the phase relationship of the two measurement signals as precisely as possible.

Using these measurement data, different calculation methods for the sideways-force coefficient could be compared with each other. In this context, a procedure specifically adapted to the conditions of the TP Griff-StB (SKM) was tested, which differs significantly from all previous proposals for sideways-force coefficient calculation.

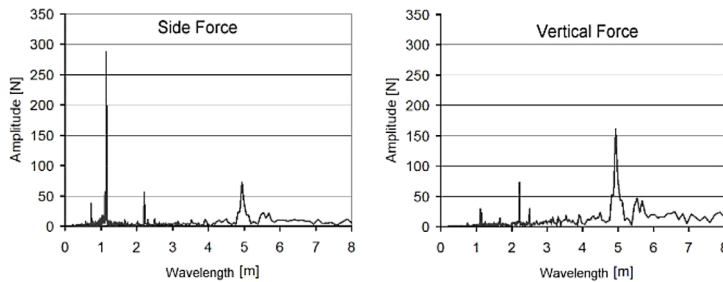
Finally, two further measuring vehicles have been equipped with a corresponding vertical force measuring unit. So, it was possible to perform comparative measurements with totally four measuring vehicles on the BASt test tracks, which are used for the annual operating approval of the SKM measuring vehicles.

### 3 Results

A first test of combined recording of side force and vertical force in measuring vehicles with SKM and SCRIM measuring mechanics showed that measuring mechanics of both designs produce other high-frequency fluctuations in addition to the expected natural frequency of the measuring mechanics both in the side force as well as the vertical force following Figure 3. They can only to a small extent be interpreted as harmonics of the natural frequency. In addition, these vibrations differ in frequency and amplitude depending on the mechanical design.

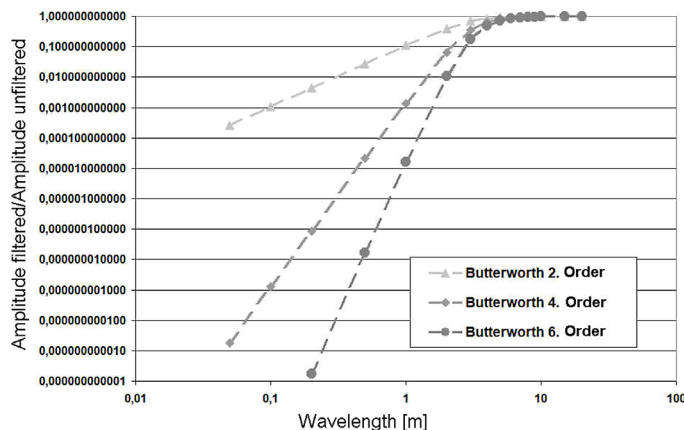


It is advantageous that there is a significant gap in the wavelength spectrum between the natural frequency of 4.5 Hz (or 5 m wavelength at 80 km/h) and the first higher-frequency vibration component at 9 Hz (or 2.5 m wavelength, presumably the first harmonic). This applies to both the side force and the vertical force (Figure 4). This gap occurs in both mechanical designs examined. Due to the clear separation between correctable natural vibrations of the measuring mechanics and higher-frequency vibrations without origin, suitable filtering can be used to separate the correctable signal portion for further processing.



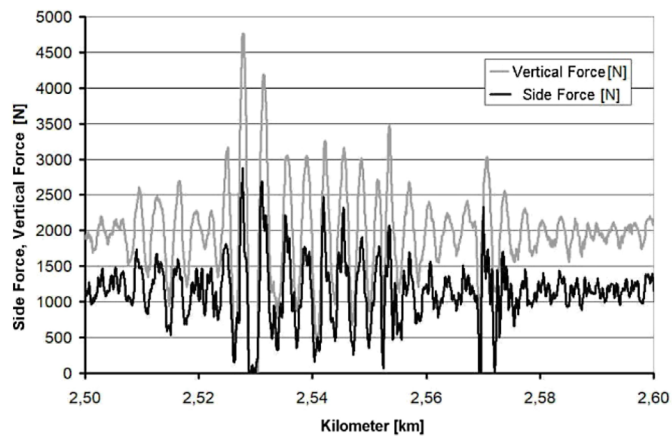
**Fig. 4: Wavelength spectra of the side force and the vertical force measured at 80 km/h.**

Shorter wavelengths below 2.5 m (at 80 km/h) are attenuated by steep-edged digital phase-neutral low-pass filtering in post-processing. As a result, the comparability of the spectra of different mechanical designs is much better. In our investigation, a phase-neutral 6th-order digital Butterworth filter with a cut-off frequency of 8.5 Hz has proven to be particularly suitable for this (Figure 5). The comparatively high cut-off frequency of the filter means that the measuring system can react very quickly in the case of a change in the skid resistance on the road surface. On such a sudden change, very steep flanks are achieved. 87% of the signal change is already achieved within two meters (at a measuring speed of 80 km/h), and after 1 meter at 40 km/h.

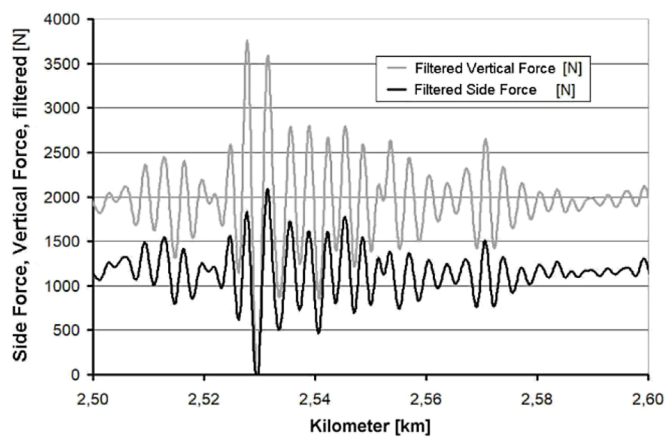


**Fig. 5: Filter characteristics of the digital phase-neutral Butterworth filter of the 2nd, 4th and 6th order.**

Figures 6 and 7 show typical side force and vertical force measurements before and after filtering. As easily observable, the digital filtering permits a significant improvement of the data basis regardless of the correction method used afterwards.



**Fig. 6:** Data from the force measurement sensors of a 100m section in unfiltered state.

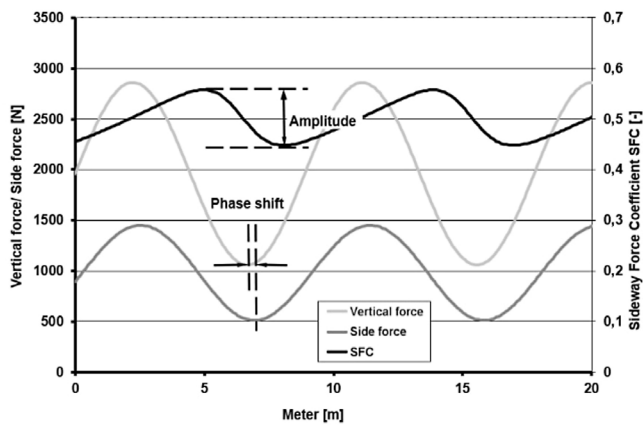


**Fig. 7:** Data from the force measurement sensors of the 100m section from Figure 6 after digital filtering

However, digital filtering requires a constant sampling rate. Until now, the SKM measurement method has been used to record measurement data in a path-controlled manner, for example in a 1m or 0.1m grid. Digital filtering, on the other hand, requires recording in a fixed time cycle so that the filter parameters do not have to be adjusted for every small change in the measurement speed.

During the investigations, a recorded clock rate of 4.5 kHz proved to be particularly suitable. At a measurement speed of 80 km/h, this corresponds to one set of measurement data for each 5mm of measurement distance. The clock rate, which is about 20 times higher compared to 0.1m recording or 200 times higher compared to the 1m clock rate according to TP Griff-StB (SKM), is necessary to detect and compensate any phase shift between side and vertical force to reliably determine the dimensionless sideways-force coefficient.

The measuring system must be constructed in such a way that even the smallest phase shifts can be prevented. Even small shifts in the phase position (Figure 8) lead to high fluctuations in the sideways-force coefficient and thus to a significant impairment of the precision of the local skid resistance measurement value.



**Fig. 8: Influence of smaller phase shifts on the stability of the calculation of the sideways-force coefficient.**

Tests in the laboratory showed that the phase shift initially also found in the SKM measuring vehicles had no physical cause in the measuring principle, as was variously assumed in the past. The cause is a different frequency response among different load cells and the analog signal filtering before the digitization of the measuring signals, which is often not carried out sufficiently similar. The analog pre-filter is necessary to suppress higher-frequency signal components (anti-aliasing) in accordance with the digital sampling rate. The higher sampling rate of 5 mm (4.5 kHz) compared to requirements in the TP Griff-StB SKM (1m values) has several advantages for the analog filter, which in that case does not have to have a high edge steepness, but can simply be designed as an RC element. This allows easy and precise adjustment of the phasing between the two measurement signals (side force and vertical force). A roller test stand, on which a measuring run can be simulated, has proven itself as an aid for setting and checking this in the laboratory (Figure 9). It is particularly easy to compare the vibrations of side force and vertical force, by using unevenness on the roller to incite a defined vibration of the measuring mechanics.



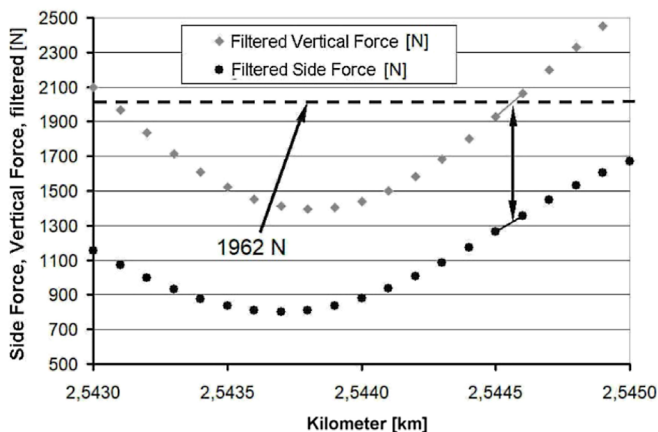
**Fig. 9: Measuring vehicle with SKM measuring mechanics on the roller test bench.**

In the past, various parties have suggested dividing the dynamic side force and the dynamically measured vertical force directly by one another, after appropriate averaging according to the desired section size if necessary.

However, this approach has various disadvantages. On the one hand, a very precise calibration of the vertical load cell becomes necessary, since the measured vertical force value has a direct impact on the dimensionless sideway-force coefficient. The vertical force measurement thus would represent an additional possible source of error for measurement errors in the sideway-force measurement method.

Furthermore, the dynamic vertical force can locally deviate significantly from the static vertical force. This then leads to significant changes in the measurement conditions. Due to the different energy conversion on the tire surface, different temperatures occur in the contact area of the measuring tire, so that the rubber changes its viscoelastic properties. The strong influence of the viscoelastic properties of the rubber on the level of the measured SKM values has been examined several times in the past. It is the reason for the temperature correction of the SKM measuring method as well as the high demands on a consistent rubber formulation of the test tire. Therefore, leaving the standardized measurement conditions of the TP Griff-StB (SKM) without further investigations into the influence of deviating vertical forces is currently hardly imaginable.

Therefore, a different approach is proposed here, which can be implemented very precisely due to the high sampling rate. The measured value of the side force may only be read when the dynamic vertical force equals the static vertical force. If such a dynamic vertical force measurement value is not available, linear interpolation may be carried out between two consecutive suitable measurement value pairs as shown in Figure 10.



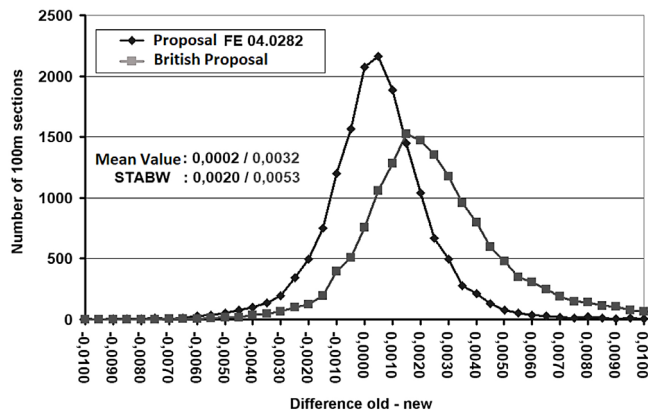
**Fig. 10: Determination of the pair of measured values from vertical force and lateral force by linear interpolation of the vertical force to 1962 N (normal force of the SKM)**

This procedure has the advantage that the measured values of the vertical force sensors do not necessarily have to be calibrated separately. Since the mean value of the dynamic vertical force data of the measurement track represents the force value of the static load with sufficient accuracy, it can be used as an alternative to the statically determined vertical force value.

The comparison between the mean value of the dynamic vertical force determined in this way as a value for the static vertical force and the current dynamic vertical force thus determines the moment at which the side force measurement value is to be read. Since any misadjustments of the vertical load cell have an equal effect on the mean value and the local vertical force measurement value, the system is extremely robust and insensitive

to changes in the measurement behaviour of the vertical force load cell. Additional sources of error from a possibly inaccurate detection of the vertical force are thus reliably avoided.

In addition, the comparability of the 100m values according to this new calculation method in relation to the previous method is very good (Figure 11). So, the new calculation method has advantages compared to a quotient method in which side force and vertical force are divided directly by one another.



**Fig. 11: Deviation of the 100m section values according to the quotient method and the new calculation method, based on the previous determination (assuming a static vertical force)**

Due to the natural vibrations of the mechanics, the dynamic and static vertical forces are equal every 2.5 m at a measuring speed of 80 km/h or every 1.25 m at 40 km/h. Since digital filtering of the data is necessary anyway, the associated response behaviour is completely sufficient. The 1m values according to TP Griff (StB) can be generated by linear interpolation without losing the edge steepness of the signal response.

## 4 Conclusions for the practice

Due to the uniform, standardized filtering of the SKM measurement data, differences in the dynamic behavior between different types of measurement mechanics can be compensated largely.

Therefore, it can be assumed that the comparability between the various SKM measuring vehicles will increase, especially for short measuring sections. Evidence would have to be provided by means of a corresponding round robin test.

Since the static vertical force is still decisive for the determination of each individual valid measured value, the TP Griff StB (SKM) applies unchanged in its previous form also when using the calculation method proposed here for the sideways-force coefficient.

For this reason, there is no need for extensive research on the comparability of the data from measurements done according to the current SKM procedure and the new proposed procedure since the new type of determination of the local 1m values is only a more precise application of the previous procedure. The continuation of the existing limits and tolerances in the technical and administrative regulations is still given.

The essential advantage is that skid resistance data are already generated for 1m sections, which do not require any further averaging in order to compensate deviations from the real skid resistance level caused by dynamical influences from the measuring device.

Thereby, the skid resistance of road surfaces can be described much more precisely, also with high local resolution, using the SKM measurement method.

---

# Inhalt

---

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Das Seitenkraftmessverfahren – Stand der Technik</b>	<b>17</b>
2.1	Das SCRIM-Messverfahren	17
2.2	Das SKM-Messverfahren	18
2.3	Stand der Vertikalkraftmessung in Deutschland	18
<b>3</b>	<b>Konzeption der Vertikalkraftmessung</b>	<b>20</b>
3.1	Stand der Technik	20
3.2	Integration der Radachsen-Beschleunigungsmessung	21
3.2.1	Wirkung der Radachse auf die Kontaktkraft	21
3.2.2	Verwendung von Beschleunigungssensoren	21
3.2.3	Beschreibung des Messverfahrens	22
3.2.4	Konzeption Messdatenerfassung	22
3.2.5	Auswirkungen auf Auswertung und Kalibrierung	22
<b>4</b>	<b>Erprobung der Technik im Labor</b>	<b>24</b>
4.1	Motivation für die Laboruntersuchungen	24
4.2	Aufbau und Durchführung der Laborprüfungen	28
4.3	Der Laborprüfstand	29
4.3.1	Mechanischer Aufbau des Prüfstandes	29
4.3.2	Elektronischer Aufbau des Prüfstandes	30
4.4	Durchführung der Versuche an der IWS Messmechanik	30
4.4.1	Messung der Reifenfeder	33
4.4.2	Messung der Stoßdämpfereigenschaften	35
4.4.3	Dynamische Schwingungsversuche	36
4.4.4	Simulation des Fahrbetriebes	37
4.4.5	Bewertung der Ergebnisse	38

4.5	Durchführung der Versuche an Messfahrzeugen	38
4.5.1	SKM-Messfahrzeug mit SKM-Mechanik	38
4.5.2	Messfahrzeug mit SCRIM-Mechanik	40
4.5.3	Bewertung der Ergebnisse	41
4.6	Einfluss von Wankbewegungen	42
4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	42
<b>5</b>	<b>Vergleich unterschiedlicher Berechnungsverfahren</b>	<b>43</b>
5.1	Vorbereitende Filterung der Daten	44
5.2	Prüfung auf Phasenlage	47
5.3	Das Quotientenverfahren	49
5.4	Ein einfacher neuer Korrekturansatz	50
5.5	Ansätze zur Vereinfachung der Vertikalkraftkalibrierung	52
5.6	Beurteilung der Modelle und Vergleich zu der bisherigen Berechnung des Seitenkraftbeiwertes	55
<b>6</b>	<b>Erprobung in weiteren SKM-Fahrzeugen</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Vorschläge für das Regelwerk</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>Weiterer Forschungsbedarf</b>	<b>62</b>
	<b>Literatur</b>	<b>63</b>
	<b>Bilder</b>	<b>64</b>

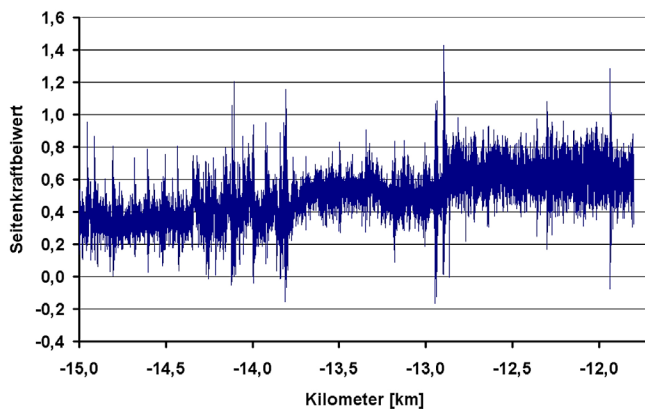
Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen  
 BAST-Archiv ELBA unter: <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

# 1 Aufgabenstellung

Das Seitenkraft-Messverfahren (SKM) wird in Deutschland zur Bestimmung der Griffigkeit seit über 25 Jahren eingesetzt. Die in der TP Griff-StB (SKM), Ausgabe 2007 [FGSV, 2007], beschriebene Messtechnik hat sich über die Jahre sowohl für die netzweite Überprüfung einer ausreichenden Griffigkeit auf Verkehrsflächen wie auch für die bauvertragliche Abnahme von neu hergestellten Fahrbahnoberflächen bewährt.

Allerdings besteht schon seit Jahren Bedarf, von der bisherigen Größe der Bewertungsabschnitte von 100m abzuweichen und auch kleinere Abschnitte zuverlässig bewerten zu können. Überall dort, wo kleinere Reparaturmaßnahmen an der Fahrbahndecke durchgeführt wurden, erweist sich eine Abschnittsgröße von 100m als ungeeignet, um die griffigkeitstechnischen Oberflächeneigenschaften der Baumaßnahme ausreichend genau charakterisieren zu können. Ähnliches gilt für besonders polierbeanspruchte Bereiche wie Kreuzungen, Beschleunigungs- und Verzögerungstreifen oder Kurven.

Zur vergleichbaren Bewertung auch kürzerer Messabschnitte ist eine einheitliche Erfassung der Daten unverzichtbar. Bislang werden in älteren Messsystemen teilweise analoge Filter zur Unterdrückung von periodischen Seitenkraftschwankungen eingesetzt, während bei neueren Systemen die Daten zunächst nahezu ungefiltert aufgezeichnet werden, um anschließend einer Mittelwertbildung unterzogen zu werden. Die seit einigen Jahren eingeführte Aufzeichnung in 1m-Werten (in einigen Systemen seit 2004 optional sogar im 0,1m Raster) offenbart bei Abwesenheit von analogen Tiefpass-Filtern ein sehr breites Band an Griffigkeitsmessdaten (Bild 1-1).



**Bild 1-1: Seitenkraftmessdaten mit hoher lokaler Auflösung (0,1m-Daten)**

Wie im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen wird, ist diese Ergebnisspannbreite auf Schwankungen der Auflast zurückzuführen. Im bisherigen Regelwerk wird diese jedoch als konstant angenommen, sodass die aus der Variabilität der Auflast resultierenden Seitenkraftschwankungen voll auf den dimensionslosen Seitenkraftbeiwert durchschlagen. Daher werden Vorschläge erarbeitet, wie diese aus dem Messsystem stammenden Einflüsse zukünftig über entsprechende Messwertkorrekturen zu realistischen Seitenkraftbeiwerten auch für sehr kurze Abschnittsgrößen führen. Dabei wird besonderes Augenmerk auf eine einheitliche und gut dokumentierte Erfassung der Rohdaten gelegt, auf die auch die bislang existierenden SKM Messsysteme umgerüstet werden können.

Bei diesem Eingriff in die Erfassungstechnik steht der Erhalt des bisherigen Messniveaus bezüglich der 100m-Abschnittsgröße im Vordergrund, damit der Konsens zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer bezüglich der bauvertraglichen Anwendung des Messver-



fahrens SKM nicht durch abweichende neue Messergebnisse (infolge neuer Berechnungsweise) infrage gestellt wird.

Um eine zuverlässige Vertikalkraftkorrektur beim SKM-Messverfahren zu gewährleisten, wird zunächst die Messmechanik theoretisch und in entsprechenden Versuchsaufbauten hinsichtlich Ihrer Schwingungseigenschaften beschrieben. Hierbei werden auch unterschiedliche SKM-/SCRIM-Konstruktionen berücksichtigt.

Unterschiedliche Ansätze für eine Berücksichtigung der Vertikalkraftmessung werden beschrieben und miteinander verglichen.

Aufbauend auf den Labormessungen werden die Korrekturverfahren verifiziert, bevor sie in einem nächsten Schritt in einem existierenden Fahrzeug implementiert werden. Mit diesem Fahrzeug werden umfangreiche Erprobungsmessungen durchgeführt. Die verschiedenen Berechnungsverfahren werden anhand der neu gewonnenen Messdaten überprüft und miteinander verglichen.

Aufbauend auf den Messergebnissen werden Vorschläge für ein künftiges standardisiertes Rohdatenformat erarbeitet.

Nach Erprobung der neuen Technik in weiteren Messfahrzeugen werden Vorschläge für die Neugestaltung des Regelwerkes erarbeitet.

## 2 Das Seitenkraftmessverfahren – Stand der Technik

Bereits in den 1930iger Jahren wurden in England erste Messfahrzeuge zur Überprüfung der Griffigkeit von Fahrbahndecken konzipiert [WEHNER, 1979]. Diese beruhten teilweise auf Motorrädern mit zusätzlichem schräg gestelltem profillosem Motorradreifen am Beiwagen. In späteren Jahren wurde dieser zusätzliche Messreifen in PKW verbaut.

### 2.1 Das SCRIM-Messverfahren

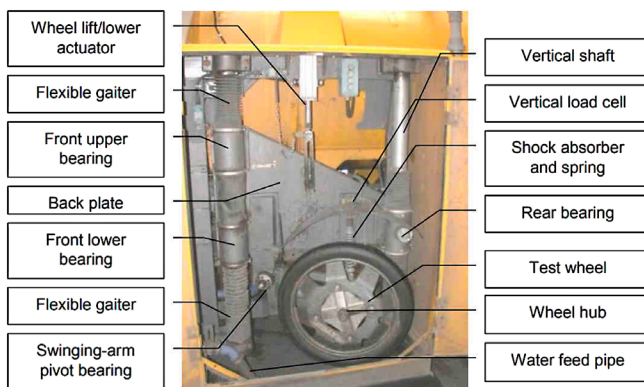
Auf Grundlage dieser frühen Erfahrungen wurde für den Routineeinsatz in Großbritannien für das Transport and Road Research Laboratory (TRL) 1967 ein auf LKW basierendes Messfahrzeug entwickelt, mit dem routinemäßig größere Messstrecken von 200-300 km pro Tag absolviert werden konnten [Wehner, 1979]. Dieses Fahrzeug gab als Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine (SCRIM) dem britischen Seitenkraftmessverfahren den Namen. SCRIM ist ein eingetragener Handelsname für derartige vom britischen Hersteller WDM produzierte Messfahrzeuge.

Ursprünglich wurde auch in Großbritannien ebenso wie in Deutschland angenommen, dass die Schwankungen bezüglich der Auflast gering sind im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren auf das Messergebnis. Deshalb wurde auf eine Messung der Vertikalkraft zunächst verzichtet. Bedingt durch die Notwendigkeit, unterschiedliche Fahrgestelle und Fahrzeuggrößen für den Aufbau von SCRIM-Messsystemen zu verwenden, wurde jedoch bald klar, dass unterschiedliche Fahrzeugtypen und Fahrzeuggrößen durchaus auch einen unterschiedlichen Einfluss auf die Dynamik des Messsystems haben könnten [FEHRL, 2006].

Ferner wurde angezweifelt, dass in Kurven oder auf Steigungsstrecken die tatsächliche Auflast der statisch bestimmten Radlast entsprechen würde.

Bereits 2002 wurde deshalb in Großbritannien die Dynamik der Auflast untersucht [DO, 2008]. Die Ergebnisse führten zu einer Nachrüstung aller in Großbritannien eingesetzten SCRIM-Messfahrzeuge um eine Vertikalkraft-Messvorrichtung. 2004 waren alle dort zum Netz-Monitoring eingesetzten Fahrzeuge entsprechend umgerüstet.

Das Messsystem zur Bestimmung der Vertikalkraft besteht seitdem aus einer Kraftmessvorrichtung, die am oberen Ende des Stoßdämpfers angebracht ist (siehe Bild 2-1).



**Bild 2-1: Vertikalkraftmessung der SCRIM [DO, 2008]**

Die Kalibrierung der Kraftmessdose erfolgt auf einer Waage, die die Auflast unter dem Reifenlatsch misst. Durch manuelles partielles Anheben des Schlittens werden unterschiedliche Lastzustände erzeugt, zu denen jeweils die Auflast auf der Waage und die gemessene Vertikalkraft protokolliert werden. In die so erzeugten Wertepaare wird eine Ausgleichsgerade gelegt. Diese Ausgleichsgerade bildet die Basis für die Umrechnung der gemessenen Kraft oberhalb der Radachse in die Auflast unter dem Messreifen.

Sowohl Vertikalkraft wie auch Seitenkraft werden im 0,1m-Raster aufgezeichnet. Die Berechnung des Seitenkraft-Beiwertes erfolgt seitdem in Abhängigkeit von der Abschnittsgröße durch Aufsummierung der im jeweiligen Abschnitt gemessenen 0,1m-Vertikalkraftwerte bzw. der 0,1m-Seitenkraftmesswerte. Anschließend wird der Seitenkraft-Beiwert als Quotient der Summe aller Seitenkraft-Messwerte dividiert durch die Summe aller kalibrierten Vertikalkraft-Messwerte ermittelt [ROE, 2005], [ROE, 2016].

## 2.2 Das SKM-Messverfahren

Das SKM-Messverfahren nach den TP-Griff StB (SKM) [FGSV, 2007] geht von einer konstanten Auflast aus, die statisch ermittelt wird und die bei der jährlichen Betriebszulassung in sehr engen Grenzen eingehalten werden muss.

Mit Einführung der 0,1m-Messwerte für die SKM-Messfahrzeuge der BASt im Jahr 2004 wurde allerdings deutlich, dass die dynamisch gemessenen Seitenkräfte und die daraus unter der Annahme einer konstanten Vertikalkraft generierten Seitenkraftbeiwerte erheblichen Schwankungen unterliegen (siehe hierzu auch Bild 1-1).

Daher wurden in Deutschland bislang Abschnittsgrößen von 20m oder 100m gewählt, bei denen sich die lokalen Schwankungen durch Mittelwertbildung über einen größeren Abschnitt hinweg annähernd ausgleichen.

Die von britischer Seite aufgeworfene Frage, ob Messsysteme sich aufgrund unterschiedlicher Fahrwerke so stark unterscheiden, dass sich für die einzelnen Abschnitte systematisch andere Messergebnisse in Abhängigkeit des betrachteten Fahrzeugs ergeben, konnte für Deutschland bislang nicht bestätigt werden [SCHMIDT, 2009].

Die deutsche Motivation der Einführung einer Vertikalkraftmessung in das bisherige SKM-Messverfahren liegt daher vor allem in der Chance für eine zuverlässige Messung und Seitenkraftbeiwert-Bestimmung auch kleinerer Abschnitte.

## 2.3 Stand der Vertikalkraftmessung in Deutschland

Da deutsche SKM-Messsysteme mittlerweile auch im europäischen Ausland zum Einsatz kommen, wurde in der Vergangenheit von dort mehrfach eine Ausstattung mit einer entsprechenden Vertikalkraft-Messvorrichtung nachgefragt. Verschiedene im europäischen Ausland eingesetzte SKM-Messsysteme sind deshalb mit einer entsprechenden Vorrichtung zur Messung der Vertikalkraft ausgestattet.

Die so generierten Vertikalkraft-Messdaten können allerdings bei Anwendung der TP-Griff StB (SKM), Ausgabe 2007, nicht berücksichtigt werden und dienen den Betreibern daher nur als Grundlage eigener Berechnungsverfahren sowie zu Vergleichszwecken. Abweichend von dem britischen Kalibrierverfahren für die Vertikalkraftmessung wird so kalibriert, dass der vertikale Kraftmesswert dieser Messdose tatsächlich der in den Stoß-

dämpfer eingeleiteten Kraft entspricht und nicht der Aufstandslast unter dem Reifen (siehe hierzu auch Bild 3-1).

In Deutschland selbst wird zu Forschungszwecken von der Firma IWS Messtechnik GmbH ein SKM-Messsystem mit britischer Messmechanik betrieben, welches ebenfalls über eine Vorrichtung zur Erfassung der Vertikalkraft verfügt (Bild 2-2).



**Bild 2-2: Einbau der Vertikalkraftmessdose bei dem SKM-Messfahrzeug mit SCRIM-Messmechanik der IWS Messtechnik GmbH**

Erste Erfahrungen mit der Verwertung von Vertikalmessdaten zur verbesserten Beschreibung lokaler Griffigkeitsverhältnisse offenbarten, dass die Radachse mit einer eigenen Frequenz schwingt, die deutlich oberhalb der Schwingfrequenz der Schlittenmasse (ca. 4-5 Hz) liegt. Die Gründe hierfür sind zum einen eine deutlich geringere Masse der Radachse (ca. 20 % der Schlittenmasse) und zum anderen eine verschiedene Anordnung der beiden Federn, die aus Sicht der Radachse parallel, aus Sicht der Schlittenmasse aber in Reihe geschaltet sind.

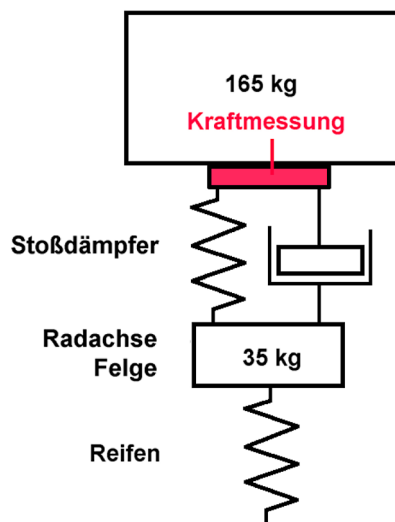
Die andere Schwingungsfrequenz macht deutlich, dass die britische Form der Verrechnung (die Masse der Radachse wird gewissermaßen der Masse des Schlittens zugeschlagen) bei hohen Präzisionsanforderungen kaum zielführend sein dürfte. Im Rahmen der ersten Vertikalkraft-basierten Berechnungen der Seitenkraft in Deutschland wurde deshalb diese Masse als „quasi-statisch“ behandelt, indem die Daten von Seitenkraft und Vertikalkraft zunächst entsprechend der Periodendauer der Radachsenschwingung einer Mittelwertbildung unterzogen wurden, bevor dann aus beiden Werten der Seitenkraftbeiwert berechnet wurde.

Das Verfahren ist sehr aufwändig, weil es eine Bestimmung der Schwingungsfrequenz der Radachse voraussetzt, die aber möglicherweise auf Dauer nicht konstant ist. Es ist anzunehmen, dass Reifenabrieb, Reifenalterung und Alterung des Stoßdämpfers diese Periodendauer mit beeinflussen.

# 3 Konzeption der Vertikalkraftmessung

## 3.1 Stand der Technik

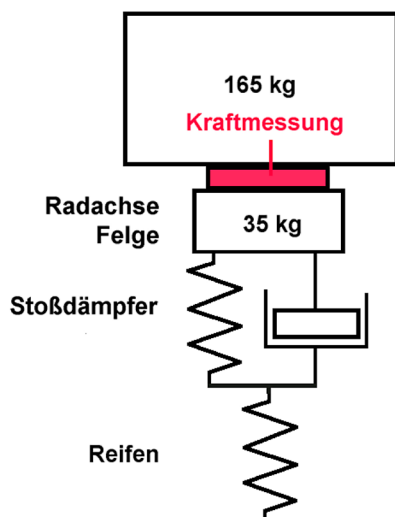
Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden SKM- oder auch SCRIM-Messsysteme lediglich mit einer Kraftmessvorrichtung zwischen Messschlitten und Stoßdämpfer ausgestattet (Bild 3-1).



**Bild 3-1: Vertikalkraftmessung an der SKM-Messmechanik**

Verfährt man bezüglich der Kalibrierung nach dem in [DO, 2008] beschriebenen Verfahren, wird auf den Messwert der Kraftmessdose im Zuge der Kalibrierung ein konstanter Betrag aufgeschlagen, der dem Eigengewicht von Felge, Reifen und Radachschwinge entspricht.

Eine eigene Dynamik dieser Teile der Messmechanik kann auf diese Weise nicht berücksichtigt werden. Das Messsystem wird behandelt, als seien Schlitten und die oben genannten Teile starr miteinander verbunden (Bild 3-2).



**Bild 3-2: Modellannahme auf Basis der britischen Kalibrierung**

Wie aus eigenen Messungen bekannt ist, weist die Radachse jedoch eine Eigenschwingung auf, die sich durchaus auf die Seitenkraft in eigenständiger Art und Weise auswirkt und ebenfalls aufgrund der Größenordnung von  $\pm 0,05 \mu\text{SKM}$  und mehr beim Seitenkraftbeiwert korrigiert werden muss.

Da nach Stand der Technik für die Messung der Radachsenschwingung und ihrer Auswirkung auf die Vertikalkraft unter dem Reifenlatsch keine Sensoren vorgesehen sind, wurde bislang die Schwingungsperiode aus den Seitenkraftmessdaten abgeleitet (als 2. Eigenfrequenz) und anschließend Vertikalkraft- und Seitenkraftmessdaten entsprechend der Periodendauer dieser 2. Eigenfrequenz gemittelt (gleitende Mittelwertbildung). Nachteil dieses Verfahrens ist wie bei allen auf Mittelwertbildung basierenden Verfahren eine Reduktion der Flankensteilheit bei Griffigkeitswechseln auf der Fahrbahn, die dann entsprechend der Mittelungslänge ausfällt. Bei 40 km/h Messgeschwindigkeit wird so für das Erreichen des neuen Messniveaus etwa 1,0-1,5 m Wegstrecke (Eigenfrequenz der Radachse von 10-20 Hz vorausgesetzt), bei 80 km/h entsprechend das Doppelte benötigt.

Es wäre daher wünschenswert, die dynamischen Kraftanteile, die aus der Radachsenschwinge und Felge stammen, näher zu kennen. Im Gegensatz zu der Kraftwirkung aus dem Messschlitten, die am Anlenkpunkt des Stoßdämpfers direkt gemessen werden kann, ist eine direkte Messung dieser Kraftanteile nicht möglich.

Ein möglicher Ansatz zur Erfassung der Kraftwirkung der Radachsenschwinge ist die Messung der Beschleunigung „a“, weil diese gemeinsam mit der Erdbeschleunigung „g“ und der Masse der Radschwinge (inkl. Reifen und Felge) „ $m_s$ “ (ca. 35 kg) eine Berechnung der Kraftwirkung der Schwinge „ $F_s$ “ zulässt:

$$F_s = m_s \cdot (g + a)$$

Mögliche Sensorausführungen zur Beschleunigungsmessung und ihre elektronische Einbindung in das Messkonzept werden im folgenden Abschnitt behandelt.

## 3.2 Integration der Radachsen-Beschleunigungsmessung

### 3.2.1 Wirkung der Radachse auf die Kontaktkraft

Der Einfluss der Radachsenschwinge auf dynamische Änderungen der Kontaktkraft unter dem Reifenlatsch ist bislang nur indirekt nachweisbar. Er äußert sich in einer höherfrequenten periodischen Schwingung der Seitenkraftmesswerte als die ebenfalls auftretende niederfrequentere Schwingung des Messschlittens.

### 3.2.2 Verwendung von Beschleunigungssensoren

Für die Messung der vertikalen Beschleunigung der Radachse sind verschiedene Arten von Beschleunigungssensoren denkbar. Erhältlich sind sowohl einfache Inertialsysteme (IMU), die aufgrund ihres Einsatzes in Flugmodellen in großem Maßstab kostengünstig gebaut werden, wie auch reine Beschleunigungssensoren.

Beide verfügen in der Regel über eine digitale Schnittstelle zur Datenausgabe. Dies stellt insoweit einen Nachteil dar, weil dann die zeitliche Lage der Beschleunigungsinformation relativ zu den anderen Kraftsensoren mit analogem Ausgang nicht auf einfache Weise mit einem Mehrkanal-Oszilloskop überprüft werden kann. Insbesondere in der Entwicklungsphase wäre aber wünschenswert, auf dem Laborprüfstand die zeitliche Lage dieser Signale zueinander zuverlässig bestimmen zu können, was mit einem Mehrkanal-Oszilloskop zweifelsfrei möglich ist. Aus diesem Grund werden die Sensoren mit digitalem Ausgang nur in

Verbindung mit einem D/A-Wandler verwendet, der die Beschleunigungsinformation dann in analoger Form bereitstellt.

Inertialsysteme bieten gegenüber einfachen Beschleunigungssensoren den Vorteil, dass die Beschleunigungsinformation gleichzeitig auf drei Achsen zur Verfügung steht. Der über einen D/A-Wandler generierte Analogausgang kann alle Achseninformationen nutzen. Ohne den Sensor zu lösen und neu zu positionieren, kann durch entsprechende Programmierung die Beschleunigungsinformation für jede Raumrichtung ermittelt werden.

So ist es auf einfache Art möglich, die Raumrichtung der Beschleunigung (und damit der Kraft) festzulegen. Aus diesem Grund wird derzeit dieser Art von Sensoren der Vorzug gegeben. Die zeitliche Auflösung derartiger Sensoren liegt bei bis zu 1 kHz und ist damit ausreichend, um periodische Beschleunigungsänderungen von maximal 20 Hz gut aufgelöst erfassen zu können.

### **3.2.3 Beschreibung des Messverfahrens**

Das Verfahren zur Bestimmung der Vertikalkraft unter dem Reifenlatsch setzt sich damit aus einer separat kalibrierten Kraftmessung am Stoßdämpfer, der Messung der Masse von Stoßdämpfer, Radachse, Felge und Reifen auf einer Waage (Bestimmung von  $m_s$ ) und der Messung der Vertikalbeschleunigung der Radachse (mittels Inertialsystem) zusammen. Parallel werden die Daten von bis zu zwei Kraftmesszellen erfasst (im Vorgriff auf das Referenzsystem der Bundesanstalt für Straßenwesen).

Um die Qualität des Korrekturverfahrens unter Verwendung eines Beschleunigungssensors beurteilen zu können, werden die beiden Sensoren für die Vertikalkraft rechnerisch zu einer berechneten Vertikalkraft in der Kontaktfläche des Reifens kombiniert und dieses Signal mit der einer Wägezelle unter dem Reifen verglichen. Näheres dazu wird im Kapitel 4.2 beschrieben.

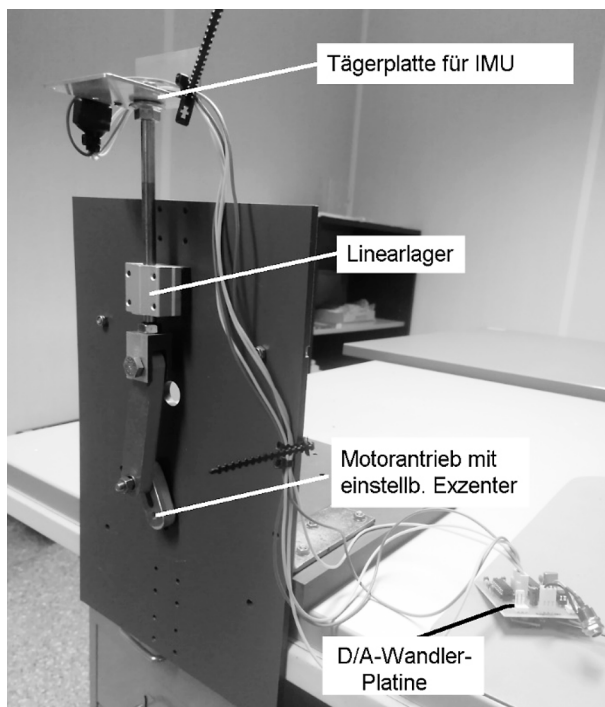
### **3.2.4 Konzeption Messdatenerfassung**

Für die parallele Erfassung der vier analogen Signalquellen (Vertikalkraftmessdose, Seitenkraftmessdose 1, Seitenkraftmessdose 2, Beschleunigungssensor) wurde eine netzwerkfähige A/D-Wandlertarte mit vier parallel auslesbaren A/D-Wandlern entwickelt, die hart synchronisiert die exakt gleichzeitige Auslesung der Signalquellen garantiert. Die zeitliche Auflösung liegt mit 5000 Hz weit oberhalb der zu erwartenden Schwingungsfrequenzen, sodass die relative Phasenlage der periodischen Schwankungen von Seitenkraft und den zwei Vertikalkraftquellen sehr genau analysiert werden kann. Eine noch höhere zeitliche Auflösung erscheint nicht sinnvoll, da die internen Filtereigenschaften von Kraftmessdosen eine Eckfrequenz von maximal 5 kHz aufweisen, in der Regel aber deutlich niedriger liegen.

### **3.2.5 Auswirkungen auf Auswertung und Kalibrierung**

Für die Kalibrierung und den Systemtest der Inertialsysteme wurde eine spezielle Vorrichtung entwickelt, mit der eine periodische Bewegung des Inertialsystems entlang einer Achse möglich ist.

Ein erster Prototyp für den Systemtest ist in Bild 3-3 dargestellt. Die Amplitude der Schwingung ist bei diesem Versuchsaufbau im Bereich 1-5 cm einstellbar, die Frequenz kann zwischen 3-30 Hz geregelt werden. Durch Drehen der IMU können die einzelnen Achsen untersucht und kalibriert werden. In der ersten praktischen Anwendung zeigte sich, dass höhere Aufwendungen getroffen werden müssen, um parasitäre Eigenschwingungen des Aufbaus sicher zu unterdrücken.



**Bild 3-3: Erster Prototyp für Systemtests an einer IMU mit Bewegungs-Frequenzen bis ca. 30 Hz**

Weitere Versuche mit der IMU zeigten dann allerdings, dass der Zugewinn an Information durch derartige Versuchsaufbauten gering ist und sich auf den Nachweis der Brauchbarkeit der Beschleunigungsmessung durch die IMU im genannten Schwingungsfrequenzbereich beschränkt. Für die Kalibrierung reicht dagegen eine einfache 3-Lagen-Überprüfung (Überkopflage=-1g, Seitenlage =0g und Regellage=1g) durch Drehung des Sensors völlig aus.

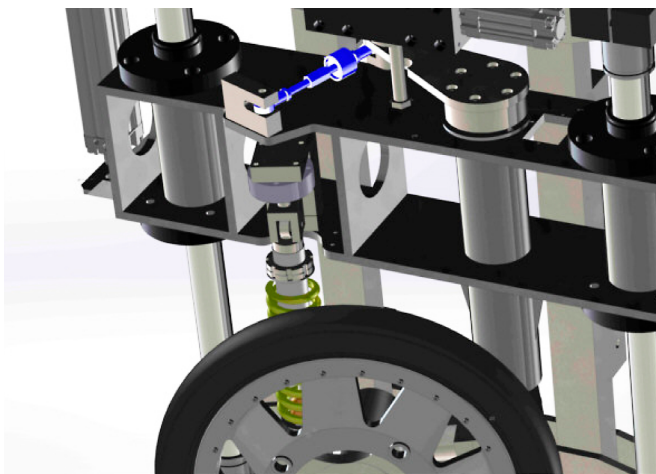


# 4 Erprobung der Technik im Labor

## 4.1 Motivation für die Laboruntersuchungen

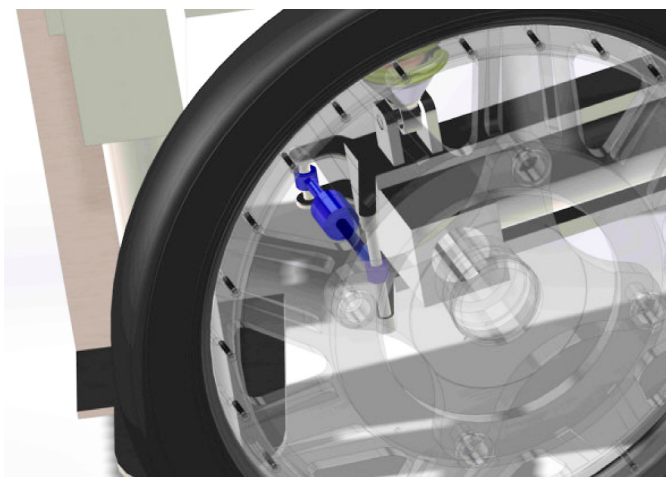
Die Untersuchungen im Labor sollen helfen, die grundsätzlichen Zusammenhänge und Einflussfaktoren auf Schwingungen, Phasenverschiebungen und Kompensationsmöglichkeiten periodischer Seitenkraftbeiwerte aufzuklären. Die Untersuchungen werden an zwei grundsätzlich verschiedenen mechanischen Konstruktionen, der SKM-Baureihe der Fa. IWS Messtechnik GmbH und der SCRIM-Bauform durchgeführt. Die Unterschiede bestehen vor allem im Einbauort der Kraftmessdose zur Aufnahme der Seitenkraft.

In den IWS-SKM-Messsystemen ist die Kraftmessdose auf dem Schlitten der Messmechanik montiert (siehe Bild 4-1).



**Bild 4-1: SKM-Messmechanik (IWS-SKM), Kraftmessdose (blau) einseitig am Schlitten befestigt**

Die SCRIM-Baureihe der Firma WDM hat dagegen die Kraftmessdose an der Radschwinge montiert und ist damit messtechnisch ähnlich zu Varianten deutscher SKM, bei denen die Seitenkraft in der Radachse gemessen wird (Bild 4-2).

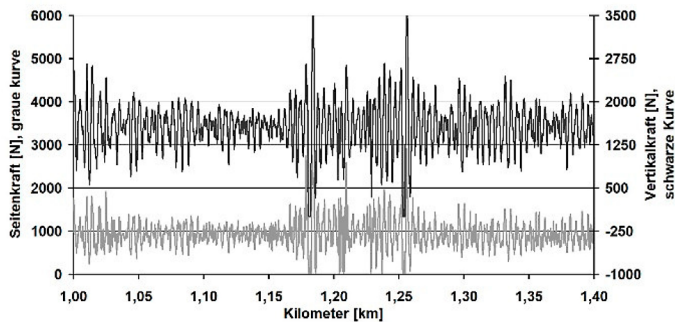


**Bild 4-2: SCRIM-Messtechnik (WDM), Kraftmessdose (blau) einseitig an der Radschwinge befestigt**

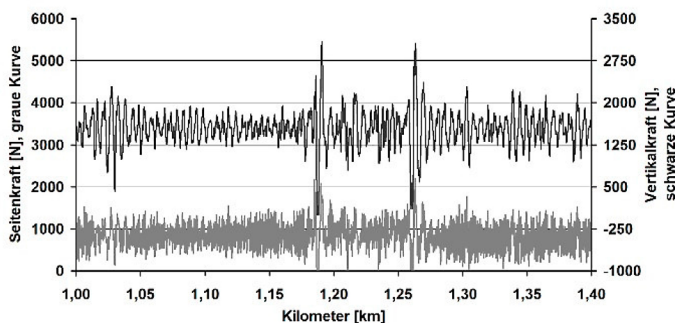
Beide Systeme wurden mit gleicher Messtechnik (Kraftsensoren, Messverstärker, Datenerfassung) ausgestattet. Konstruktionsbedingt unterscheiden sich allerdings außer der Messmechanik auch die Fahrgestelle und der System-Stoßdämpfer zwischen SKM-Achse und Schlitten. Ohne jegliche Filterung auf derselben Messstrecke betrieben, werden trotz

gleicher Messgeschwindigkeit von 80 km/h, gleicher Messelektronik etc. deutlich unterschiedliche Messkurven der Sensoren erhalten.

Während bei der SKM-Mechanik die Vertikalkraft deutlich stärker schwankt (Bild 4-3) als bei der SCRIM-Mechanik (Bild 4-4), ist die Seitenkraft bei der SCRIM-Mechanik offensichtlich von einer ausgeprägten hochfrequenten Schwingung überlagert. Bei der SKM-Mechanik hingegen ist der Kurvenverlauf der Seitenkraft-Kurve dem Verlauf der Vertikalkraft recht ähnlich.



**Bild 4-3: SKM-Messmechanik (IWS), Beispielmessung von Seitenkraft und Vertikalkraft (0,1m Auflösung/ ungefiltert)**

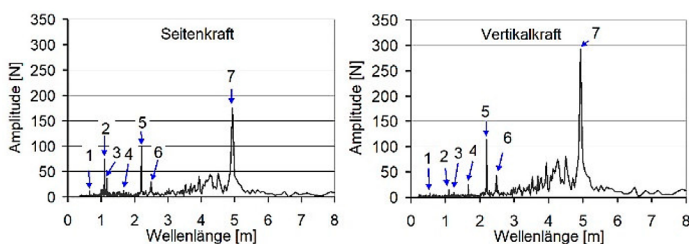


**Bild 4-4: SCRIM-Messmechanik (WDM), Beispielmessung von Seitenkraft und Vertikalkraft auf derselben Messstrecke wie in Bild 9 (0,1m Auflösung/ ungefiltert)**

Trotz dieser deutlichen Unterschiede liefern beide Messsysteme bei einer 100m-Abschnittsbildung auf der hier dargestellten 400-Meter-Strecke nahezu identische 100m-Werte (jeweils  $\Delta < 0,015$ ).

Mittels Fourier-Transformation aller vier Messkurven stellt man außer der Abschnittsmittelwerte eine weitere wichtige Übereinstimmung fest. Die auftretenden Periodizitäten von Vertikalkraft und Seitenkraft haben dieselbe Wellenlänge, aber deutlich unterschiedliche Amplituden.

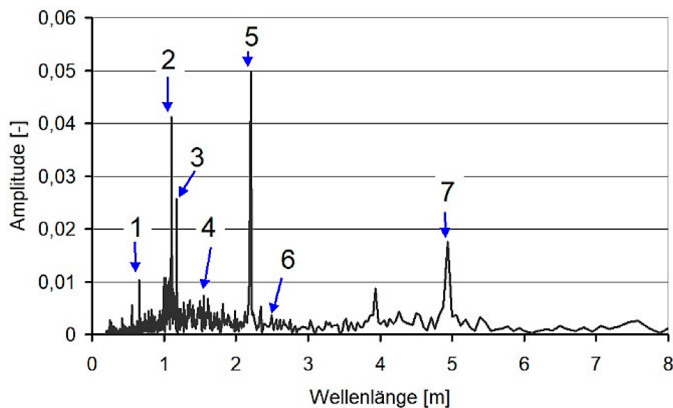
In Bild 4-5 sind die Frequenzspektren für die SKM-Messmechanik dargestellt.



**Bild 4-5: SKM-Messmechanik (IWS-SKM), Fourieranalyse mit Markierung der relevanten Frequenzen**

Die große Ähnlichkeit der Spektren in Bild 4-5 lässt eine Berechnung des Seitenkraftbeiwertes durch direkte Division von Seitenkraft und Vertikalkraft sinnvoll erscheinen. Auch dieser Reibbeiwert kann einer Frequenzanalyse unterzogen werden, um zu sehen, inwieweit Eigenfrequenzen des Systems sich durch die Vertikalkraftmessung unterdrücken lassen.

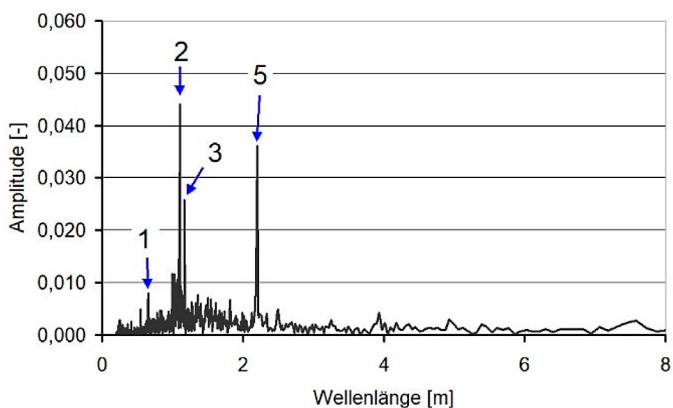
Das erste Ergebnis zeigt auch für den Reibbeiwert ein sehr ähnliches Frequenzspektrum (Bild 4-6), bei dem allerdings die kurzwelligen Frequenzanteile deutlich dominieren.



**Bild 4-6: SKM-Messmechanik (IWS-SKM), Fourieranalyse des Quotienten aus Seitenkraft und Vertikalkraft**

Man kann das Zurückdrängen von langwelligen Eigenfrequenzanteilen als ersten Teilerfolg bei der Bereinigung der Seitenkraftbeiwert-Ermittlung um systemeigene Schwingungen werten. Das Ziel einer systemunabhängigen Ermittlung eines Reibbeiwertes der Fahrbahn ist damit aber noch nicht erreicht.

Ein Stück näher kommt man, wenn die aufgezeichneten Daten von Seitenkraft und Vertikalkraft leicht zeitlich verschoben werden. Dividiert man die aktuelle Seitenkraft durch den Vertikalkraft-Messwert des folgenden 0,1m-Abschnittes, verschwinden die langwelligen Frequenzanteile im Spektrum vollständig (Bild 4-7).



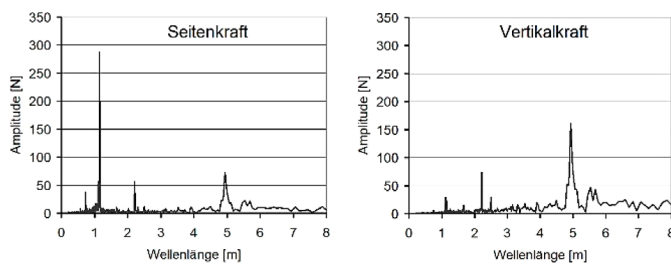
**Bild 4-7: SKM-Messmechanik (IWS-SKM), Fourieranalyse des Quotienten aus Seitenkraft und Vertikalkraft um 0,1m verschobener Vertikalkraft**

Selbst die kurzwelligeren Schwingungen bei 2,2m-Wellenlänge reduzieren sich etwas.

Wenn sich dieses Ergebnis auf anderen Messstrecken, mit anderer Messmechanik und bei anderen Messgeschwindigkeiten bestätigen ließe, wäre mit der Vertikalkrafterfassung ein geeignetes Mittel zur Reduzierung von langwelligen systembedingten Schwankungen des ermittelten Reibbeiwertes gegeben.

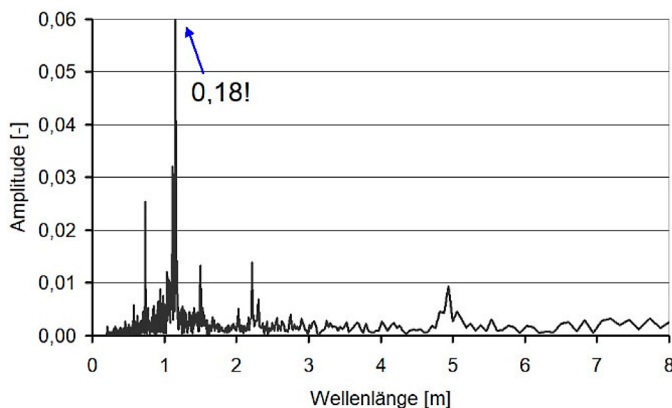
Das wichtige Werkzeug der Fouriertransformation macht aber das Dilemma deutlich, in dem man mit der bisherigen Datenaufzeichnung steckt. Die in Bild 4-7 vollzogene Phasenverschiebung durch Shift der protokollierten Vertikalkraft um eine Zeile in der Tabelle führt unmittelbar zu der Frage, wie bei 40 km/h-Messungen verfahren werden soll, weil ein Shift um die dann benötigte halbe Zeile nicht möglich ist. Außerdem führt jegliche Fouriertransformation zu unsinnigen Ergebnissen, wenn die aufeinander folgend protokollierten Messwerte keinen konstanten zeitlichen Abstand zueinander haben. Genau dies ist aber bei der derzeitigen Form der Aufzeichnung nur dann gegeben, wenn die Fahrgeschwindigkeit über den ausgewerteten Abschnitt von z. B. 4096 Messpunkten wie hier exakt eingehalten wird. Im regulären Messbetrieb kann dies aber nicht gewährleistet werden. Daher werden andere Formen der Datenaufzeichnung als bislang im Zuge einer einheitlichen Vorgehensweise zu diskutieren sein. Das unterschiedliche messtechnische Verhalten verschiedener Messmechaniken (Bild 4-3 und 4-4) lässt vermuten, dass auch hier eine Standardisierung sinnvoll wäre.

Die Fourieranalyse der Messdaten der SCRIM-Mechanik zeigt trotz aller offensichtlichen Unterschiede allerdings ein so ähnliches Spektrum zu Bild 4-5, dass doch die Möglichkeit bestehen könnte, zu vergleichbaren Ergebnissen bei der Quotientenbildung zu kommen (Bild 4-8).



**Bild 4-8: SCRIM-Messmechanik (WDM), Fourieranalyse von Seitenkraft und Vertikalkraft**

Zwar sind die Amplituden der einzelnen Frequenzanteile deutlich verschieden zu denen der SKM-Messmechanik, die charakteristischen Frequenzen ähneln sich jedoch. Vor allem entsprechen sie sich zwischen Seitenkraft und Vertikalkraft so genau, dass eine erfolgreiche Einbeziehung der Vertikalkraft auch hier wahrscheinlich erscheint. Auch hier führt eine Verschiebung der Vertikalkraft um 0,1m oder einen Datenpunkt zu einer deutlichen Ergebnisverbesserung bei der Quotientenberechnung (Bild 4-9).



**Bild 4-9: SCRIM-Messmechanik (WDM), Fourieranalyse des Quotienten aus Seitenkraft und um 0,1m verschobener Vertikalkraft**

Zudem lassen sich Frequenzen schon ab etwa 1,2 m Wellenlänge bei der Quotientenbildung recht gut unterdrücken (Bild 4-9), was sich sogar etwas günstiger darstellt als bei der SKM-Messmechanik, bei der erst ab 2,2 m Wellenlänge Eigenschwingungen aus dem Seitenkraftbeiwert verschwinden (siehe Bild 4-7).

Allerdings gelingt zurzeit noch nicht eine derart vollständige Unterdrückung wie bei der SKM-Messmechanik und die Schwingung bei 1,15 m Wellenlänge hat mit einer Amplitude von 0,18 einen 4x höheren Wert als die maximale Amplitude im Spektrum des SKM-Seitenkraftbeiwertes.

Der Aufklärung und möglichst Messung der kurzwelligen Schwingungen, die nicht durch die Messung der Vertikalkraft kompensiert werden können, kommt folglich bei den Versuchen im Labor eine besondere Bedeutung zu. Ein weiterer Fokus wird auf der Analyse der Phasenverschiebung zwischen den Messsignalen und deren Kompensation liegen.

Die Herausforderung nach Durchführung aller Laborversuche wird darin bestehen, unabhängig von der Bauform der Messmechanik eine Möglichkeit zur vollständigen Unterdrückung von Eigenschwingungen im Seitenkraftbeiwert zu finden. Insoweit stellt die Fourieranalyse ein wichtiges Instrument zur Ergebniskontrolle dar.

## 4.2 Aufbau und Durchführung der Laborprüfungen

Die Untersuchungen im Labor werden in zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten durchgeführt.

In dem ersten Aufbau ist unter der Messmechanik eine Waage mit Digitalausgang installiert, die einen Messbereich von 0-400 kg aufweist.

Mit dieser Waage werden statische Bestimmungen der Massen (Radachse mit Stoßdämpfer bzw. Schlitten) durchgeführt sowie die Federkonstanten von Stoßdämpfer und Reifen ermittelt. Dazu werden am Schlitten bzw. an der Felge Lasersensoren montiert, die die Änderung des Abstandes zu einer Bezugsfläche protokollieren.

Daneben ist für die statischen Versuche die Messmechanik in einem wichtigen Punkt umzubauen. Insbesondere für die Untersuchung des Stoßdämpfers sind höhere Kräfte statisch aufzubringen, als der Schlitten infolge seines Eigengewichtes hervorruft.

Normalerweise lösen sich die Hubzylinder aufgrund des Eigengewichtes ihrer Hubstange nach Ablassen der Messmechanik vom Schlitten und geben ihn damit frei. Dies ist notwendig, damit durch die Hubzylinder die Vertikalkraft nicht in undefinierter Weise beeinflusst wird.

Im Testaufbau nutzt man die Möglichkeit, die zum Heben der Mechanik verwendeten Zylinder durch Druckbeaufschlagung von der anderen Seite auch zur Erhöhung der statischen Last verwenden zu können. Dazu müssen die Druckluftzylinder aber fest mit dem Schlitten verbunden werden, was bei der SKM-Messmechanik einfach mittels einer zusätzlichen Unterlegscheibe am Ende der Kolbenstange gelöst werden kann. Diese sorgt dafür, dass das Ende der Kolbenstange und der Schlitten starr verbunden sind. Ein zusätzliches in die Druckluftversorgung eingeschaltetes Druckregelventil ermöglicht dann, die Vertikalkraft einzustellen.

Werden die Zylinder als Hubzylinder verwendet, können Auflasten zwischen 0-1962 N realisiert werden, als Druckzylinder ermöglichen sie Aufstandslasten zwischen 1962 N und über 4000 N. Damit können die gesamten in der Praxis auftretenden dynamischen Lasten

statisch nachgefahren werden. Insbesondere im Bereich von Brückenlagern kommt es häufig zu Stoßanregungen der Mechanik mit derart hohen Lastspitzen.

Der zweite Aufbau ermöglicht die Bestimmung von Seitenkraft, Vertikalkraft, Beschleunigung an der Radachse und als vierte Signalquelle wahlweise als zusätzliche Datenquelle einen Lasersensor zur Messung der Schlittenschwingungen oder alternativ die oben beschriebene Waage.

Dieser Aufbau, mit dem durch zeitgleiche Erfassung dieser vier Signalquellen die Amplituden und Phasenlagen bestimmt werden können, wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Die besonderen Herausforderungen bestanden darin, korrespondierende dynamische Änderungen von Vertikalkraft und Seitenkraft zu erzeugen und trotzdem einen quasi statischen Versuchsstand mit gleichbleibenden Reibbeiwerten und vor allem gleichbleibenden Reifentemperaturen zu haben.

Da im Labor eine Wasserkühlung des Reifens – wie im Messeinsatz üblich – nicht nur die Komplexität des Versuchsstandes übermäßig erhöht hätte, sondern auch deutlich kompliziertere Messbedingungen geschaffen hätte, wurde versucht, mit möglichst geringem Leistungseintrag sowohl die Messmechanik zum Schwingen anzuregen, als auch entsprechende Seitenkräfte auf natürliche Weise zu erzeugen, an denen dann Untersuchungen zur Phasenverschiebung etc. durchgeführt werden konnten. Gleichzeitig sollte durch den geringen Leistungseintrag erreicht werden, dass der Reifen sich nicht im Betrieb übermäßig erhitzt, sondern eine Luftkühlung mittels Gebläse ausreicht.

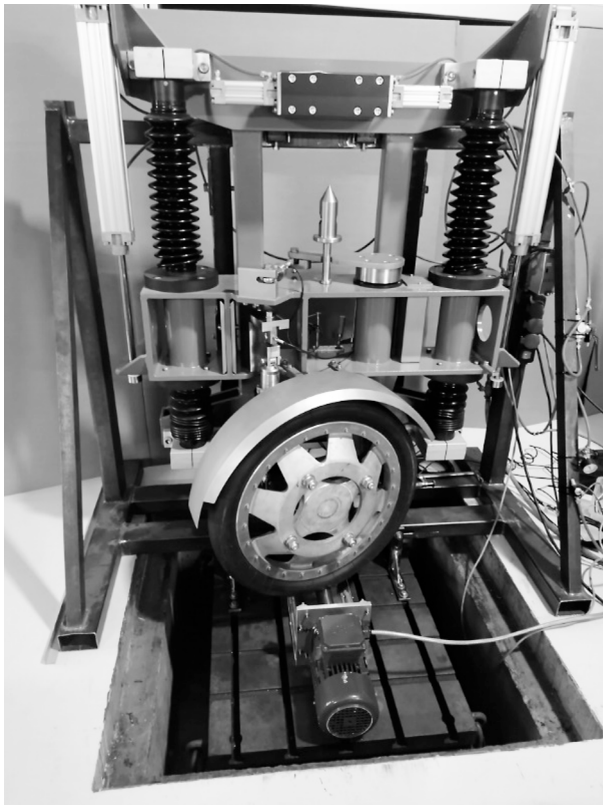
### 4.3 Der Laborprüfstand

Der Laborprüfstand musste geeignet sein, den rollenden SKM-Reifen und die Messmechanik insgesamt zum Schwingen anzuregen. Gleichzeitig sollte jedoch trotz eines mittleren Reibbeiwertes von 0,3-0,7  $\mu$ SKM kein übermäßiger Energieeintrag in den Reifen stattfinden, damit das System mit einfacher Luftkühlung betrieben werden konnte.

Vorversuche zeigten, dass unter diesen Rahmenbedingungen die Umfangsgeschwindigkeit an dem Messreifen drastisch reduziert werden musste. Aufgrund der angestrebten Seitenkraft von 0,6-1,4 kN und einer Gleitgeschwindigkeit aufgrund der 20°-Schrägstellung von 34 % der Umfangsgeschwindigkeit ergaben sich schon bei nur 20 km/h Reibleistungen von bis zu 2,6 kW, die den Reifen erhitzen. Eine wirkungsvolle Luftkühlung wäre bei dieser Größenordnung nicht zu realisieren gewesen. Aus diesen Gründen wurde der Durchmesser der Reibwalze auf 50 mm reduziert, sodass diese bei Drehzahlen bzw. Schwingungen von maximal 40 Hz zu einer Umfangsgeschwindigkeit von 6,3 m/s führte.

#### 4.3.1 Mechanischer Aufbau des Prüfstandes

Im Ergebnis wurde der Laborstand mit einer exzentrisch gebohrten 50mm-Walze (Schwingungsamplitude 0,5 mm) realisiert, die beidseitig mit Lagerböcken gelagert war und an der einseitig ein Drehstrommotor mit einer Leistung von 1,1 kW angeflanscht war (Bild 4-10). Hiermit konnte der drehende Reifen mit Schwingungen bis 40 Hz beaufschlagt werden, ohne dass dadurch hohe Leistungen in die Reifenoberfläche eingetragen worden wären.



**Bild 4-10: SKM-Messmechanik auf Walzen-Prüfstand**

#### **4.3.2 Elektronischer Aufbau des Prüfstandes**

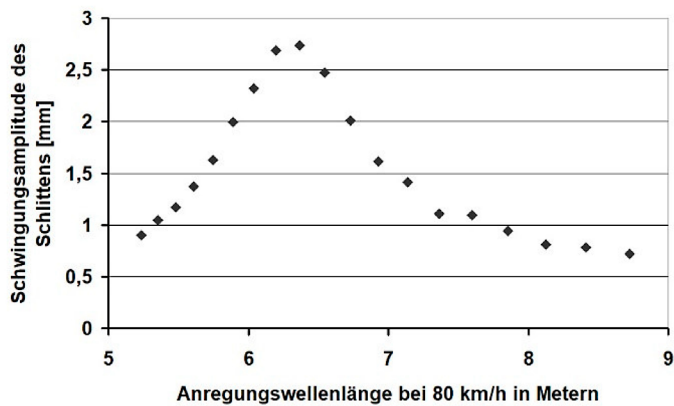
Insgesamt vier analoge Eingänge ermöglichen die Erfassung von Seitenkraft, Vertikalkraft, Gyrosensor und einem am Schlitten befestigten Lasersensor zur Messung der Schwingungen des Schlittens.

### **4.4 Durchführung der Versuche an der IWS Messmechanik**

Ein erster Probelauf des Versuchsaufbaus machte deutlich, dass zur Erzielung gleichmäßiger Ergebnisse die Haftung des Messreifens an der Walze reduziert werden musste. Die besten Ergebnisse wurden erzielt, wenn der Reifen oberflächlich mit Silikonspray behandelt wurde. Nach kurzem Einfahren wurden danach dauerhaft stetige Ergebnisse erzielt, ohne dass der Reifen erneut behandelt werden musste.

Die Versuche mit unterschiedlichen Drehzahlen am Walzenprüfstand zeigten, dass die Schwingungen am Schlitten bei einer bestimmten Drehzahl bzw. Schwingungsfrequenz ein Maximum annahmen, um dann bei höheren Drehzahlen wieder abzuflachen. Im Resonanzfall – denn um diesen handelte es sich – erreichten die Schwingungen des Schlittens etwa 550 % der eigentlichen Anregungsamplitude (Bild 4-11).

Die Dämpfung von Eigenschwingungen bei der SKM-Messmechanik ist also nicht besonders hoch. Dies steht möglicherweise in Zusammenhang mit der Einstellung der Stoßdämpfer-Eigenschaften, wie sie seinerzeit vom Straßenbauamt Traunstein vorgenommen wurden und seitdem standardmäßig verwendet werden. Hierauf wird im Zuge von Kapitel 4.4.2 noch näher eingegangen werden.

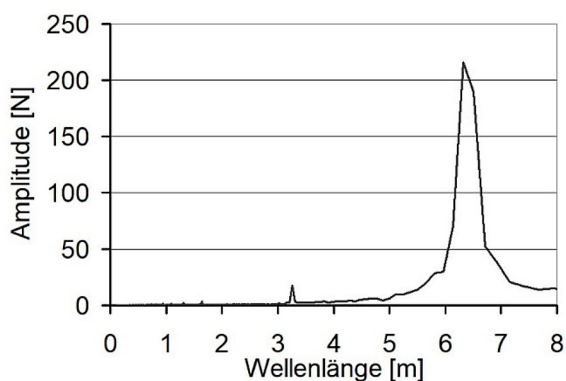


**Bild 4-11: Resonanzschwingung des Schlittens in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz, hier skaliert als resultierende Wellenlänge bei 80 km/h**

In Bild 4-11 wurde die Skalierung der Abszisse auf eine Messgeschwindigkeit von 80 km/h oder 22,2 m/s bezogen, um die Wellenlänge analog zu den bisherigen Darstellungen in Metern angeben zu können. Ein Maximum bei rund 6,3 Metern entspricht also einer Eigenfrequenz von  $22,2/6,3 = 3,52$  Hz. Die Eigenfrequenzen auf dem Prüfstand sind etwas niedriger als auf freier Strecke, wo sie bei rund 4,45 Hz liegen. Eine mögliche Ursache ist, dass die Federung durch den Messreifen auf einer gekrümmten Oberfläche deutlich weicher ist als auf ebener Unterlage. Diese Effekte werden im nächsten Abschnitt näher untersucht.

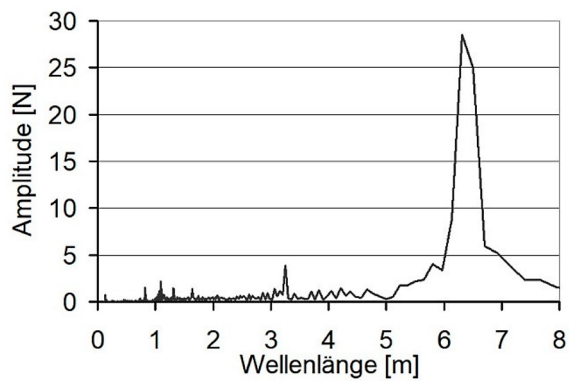
Vergleicht man die Spektren nach Fouriertransformation von Seitenkraft und Vertikalkraft mit den Spektren, wie sie aus Messungen im Fahrbetrieb ermittelt werden, so zeigt sich – bis auf die Verschiebung der Eigenfrequenz – eine gute Übereinstimmung mit den unter realen Bedingungen aufgenommenen Spektren:

Die Vertikalkraft weist im langwelligen Bereich zwei Maxima auf, die im Wellenlängenverhältnis 1:2 liegen. In Bild 4-5 sind dies die mit (6) und (7) gekennzeichneten Maxima, die bei 2,498 m bzw. 4,935m Wellenlänge liegen. In Bild 4-12 liegen sie dagegen bei 6,32-6,51 m und 3,25 m.



**Bild 4-12: Wellenlängenspektrum der Vertikalkraft bei einer Anregungsfrequenz von 3,49 Hz**





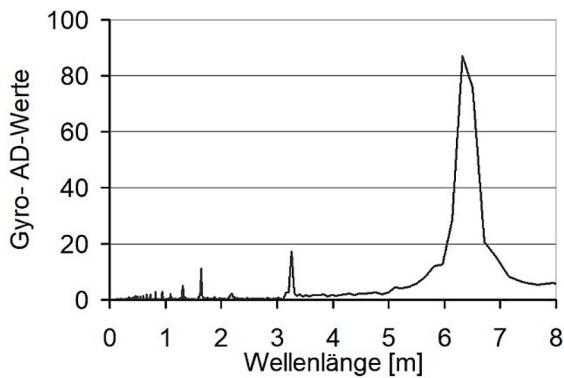
**Bild 4-13: Wellenlängenspektrum der Seitenkraft bei einer Anregungsfrequenz von 3,49 Hz zu Messkurve aus Bild 4-12**

Wie bereits im normalen Messbetrieb zeigt das Spektrum der Seitenkraft im Bereich kürzerer Wellenlängen  $< 2$  m einige lokale Maxima der Amplitude, für die es durch die Vertikal-kraftmessung keine Korrekturmöglichkeit gibt.

Eine erste Einbindung des Gyrosensors an der Rückseite der Radachse (Bild 4-14) und die gleichzeitige Datenerfassung dieser Signalquelle führt zu einem Spektrum, bei dem die lokalen Amplituden-Maxima des Seitenkraftspektrums ebenfalls auftreten (Bild 4-15).



**Bild 4-14: Anbau des Gyrosensors an der Rückseite der Radachse**

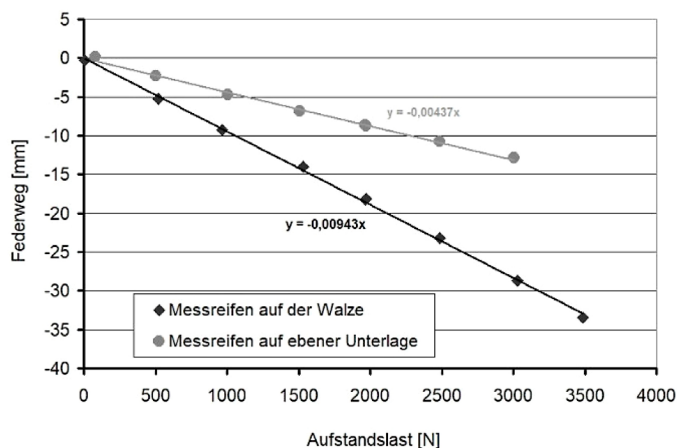


**Bild 4-15: Wellenlängenspektrum des Gyrosensor-Signals bei einer Anregungsfrequenz von 3,49 Hz**

Für Korrekturzwecke sind diese Daten zurzeit aber noch nicht geeignet, weil hierzu neben den charakteristischen Wellenlängen auch die Höhen der Amplituden passen und der Phasengang übereinstimmen muss. Dies ist momentan noch nicht gegeben.

#### 4.4.1 Messung der Reifenfeder

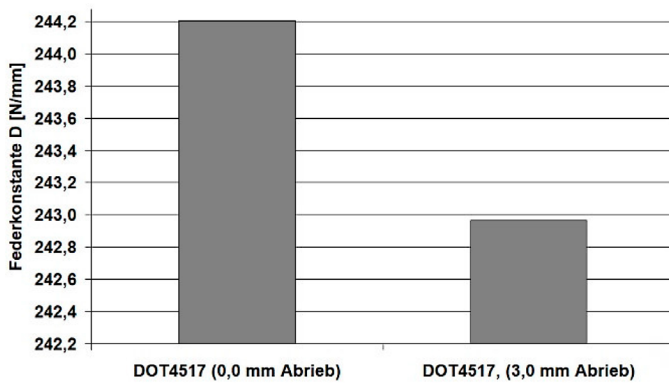
Im Zuge der Untersuchungen zur Ursache der Frequenzverschiebungen wurde die Federkonstante des Reifens sowohl auf ebener Unterlage als auch auf der gekrümmten Oberfläche der Walze des Prüfstandes bestimmt (Bild 4-16).



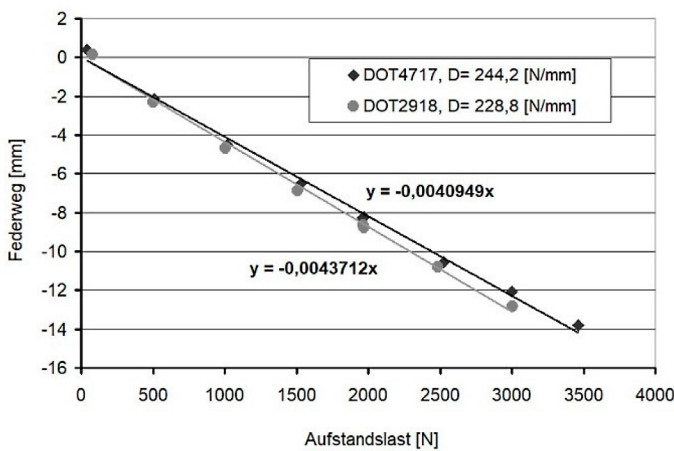
**Bild 4-16: Federweg eines unbenutzten Reifens (DOT 2918) auf ebener Unterlage und auf der Prüfstandwalze**

Das Verhältnis der Federkonstanten hat das Potenzial, die unterschiedlichen Eigenfrequenzen bzw. Wellenlängen zu erklären. Zwar liegen die rechnerischen Eigenfrequenzen zu hoch (3,66 Hz bzw. 5,38 Hz), berücksichtigen aber auch noch nicht die Federeigenschaften des Stoßdämpfers bzw. der Mechanik selbst, die zusammen mit der Reifenfeder zu etwas niedrigeren Eigenfrequenzen führen werden.

Die Eigenschaften der Reifenfeder sind stark vom Luftdruck und in geringem Umfang vom Reifenalter und vom Auffahrzustand des Reifens abhängig. Aufgefahrene Reifen haben eine etwas weichere Federkonstante als unbenutzte Reifen gleichen Alters (Bild 4-17). Ältere Reifen haben eine höhere Federkonstante als neuere Reifen (Bild 4-18).

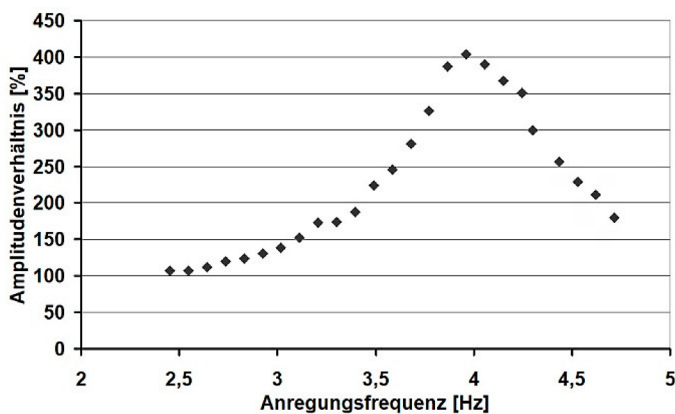


**Bild 4-17: Federkonstante eines unbenutzten Reifens (DOT 4517) auf ebener Unterlage und einem aufgefahre-  
nen Reifens gleicher DOT-Nummer**



**Bild 4-18: Federeigenschaften von unbenutzten Reifen unterschiedlichen Alters im Vergleich**

Im Vergleich dazu geht der stärkste Effekt von einem fehlerhaften Reifeninnendruck aus. Bei einem Innendruck von 5 bar lässt sich die Eigenfrequenz von 3,66 Hz auf 4 Hz anheben, was einer um 20 % höheren Federkonstante entspricht (Bild 4-19).

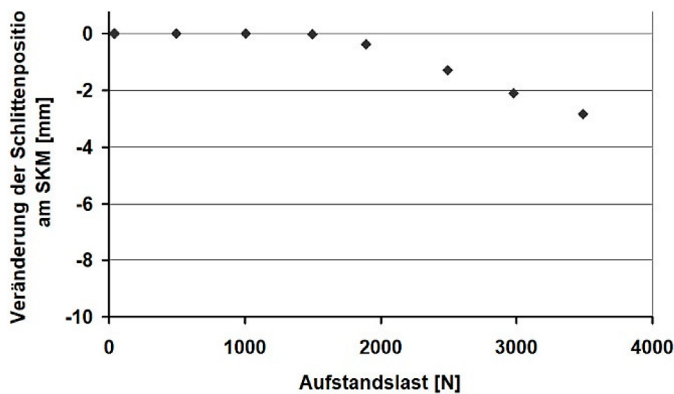


**Bild 4-19: Eigenfrequenz-Bestimmung an einer SKM-Messmechanik mit einem Messreifen (Innendruck: 5 bar)**

#### 4.4.2 Messung der Stoßdämpfereigenschaften

Neben dem Federungsverhalten des Reifens ist der Stoßdämpfer die zweite wichtige Komponente, um Schwingungseigenschaften erklären zu können. Daher wurden unterschiedlich alte Stoßdämpfer und eine feste Stange (zur Simulation eines festsitzenden Dämpfers) in der SKM-Mechanik verbaut und auf ihre Federeigenschaften hin getestet.

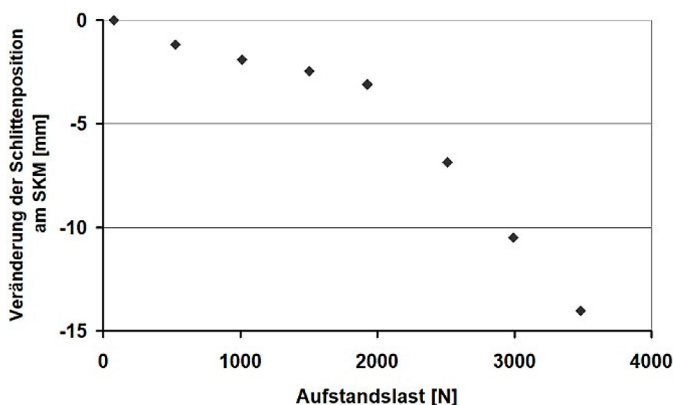
Mit eingebauter Stange anstelle des Stoßdämpfers ergibt sich die in Bild 4-20 dargestellte Änderung der Schlittenposition in Abhängigkeit von der statischen Last, wenn der aufgezoogene Reifen durch eine reine Felge ersetzt wird und somit die Reifenfeder das Ergebnis nicht beeinflussen kann.



**Bild 4-20: Federeigenschaften der Mechanik, gemessen über Vertikalverschiebung des Schlittens, bei Austausch des Stoßdämpfers gegen ein starres Element (ohne Reifen)**

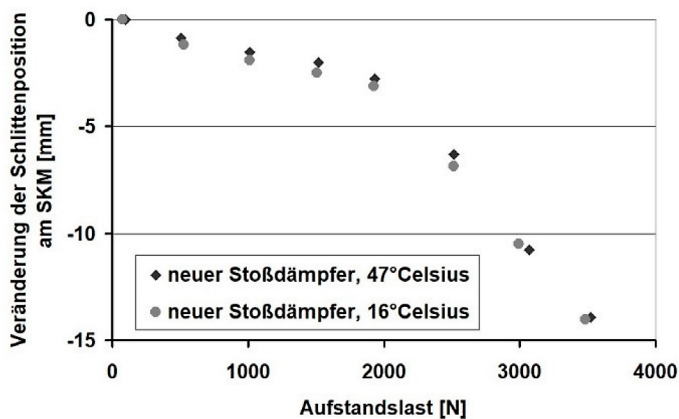
Das leichte Nachgeben der Mechanik bei Kräften ab ca. 1900-2000 N ist von der Ursache her nicht bekannt. Hier wären weitere Untersuchungen nötig, um dies zuordnen zu können.

Ein neuer Stoßdämpfer führt bei ansonsten gleichen Rahmenbedingungen üblicherweise zu nachfolgender Kennlinie (Bild 4-21).

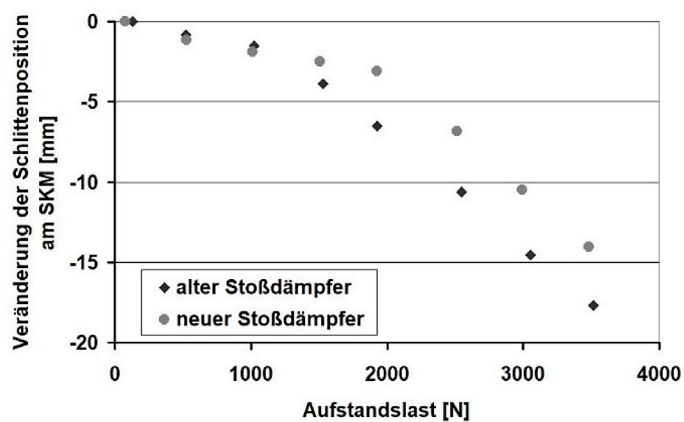


**Bild 4-21: Federeigenschaften der Mechanik mit neuem Stoßdämpfer (ohne Reifen)**

Während eine Erwärmung des Stoßdämpfers zu keinem signifikanten Effekt führt (Bild 4-22), können sich neue und ältere Stoßdämpfer (Bild 4-23) bzw. festsitzende Stoßdämpfer (Bild 4-20) in erheblichem Umfang unterscheiden,.



**Bild 4-22: Federeigenschaften der Mechanik, Vergleich zwischen warmem und kaltem neuem Stoßdämpfer (ohne Reifen)**

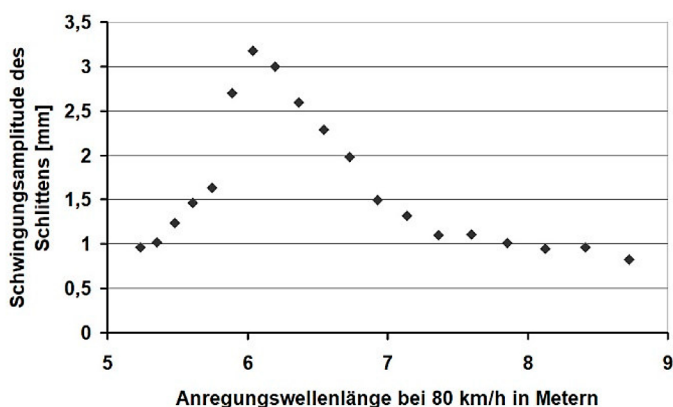


**Bild 4-23: Federeigenschaften der Mechanik, Vergleich zwischen altem und neuem Stoßdämpfer (ohne Reifen)**

Dies ist für die Eigenfrequenz des Systems von Bedeutung. Ob dies problematisch ist oder die Eigenfrequenz aus der Vertikalkraft so genau bestimmt werden kann, dass diese Verschiebung für die Qualität der Ermittlung des Seitenkraftbeiwertes ohne Bedeutung ist, muss die spätere Modellbildung zeigen.

#### 4.4.3 Dynamische Schwingungsversuche

Neben den bereits dokumentierten Schwingungsversuchen auf einem drehenden Walzenprüfstand mit dem Standard-Stoßdämpfer (siehe Bild 4-11) wurden derartige Versuche auch ohne Stoßdämpfer, also mit starrer Stange, durchgeführt (Bild 4-24).



**Bild 4-24: Resonanzschwingung des Schlittens in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz bei starrem Dämpfer, hier skaliert als resultierende Wellenlänge bei 80 km/h, Maximum der Schwingung hier bei 6,05 m**

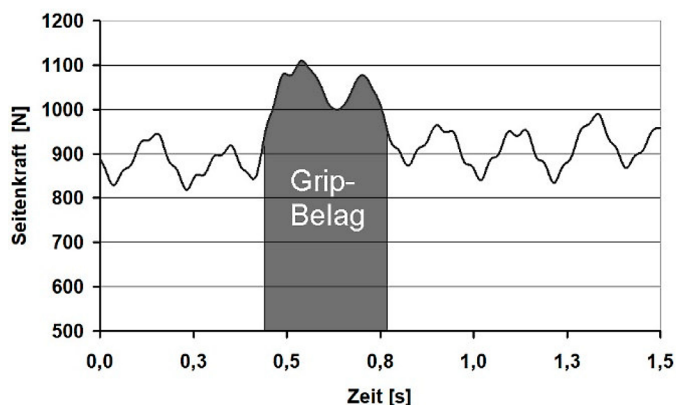
Die dabei ermittelte Eigenfrequenz bzw. Wellenlänge bei 80 km/h entsprach exakt der Eigenfrequenz, wie sie rechnerisch ermittelt worden war, wenn man ausschließlich den Reifen als Feder berücksichtigt:

$$f = 22,2 \text{ m/s} / 6,05 \text{ m} = 3,67 \text{ Hz}$$

Dies zeigt, wie zuverlässig mit dem Versuchsaufbau Eigenschaften der Messmechanik beschrieben werden können, die sich mit unabhängigen Untersuchungen wie den Messungen zur Federkonstante des Reifens bestätigen lassen.

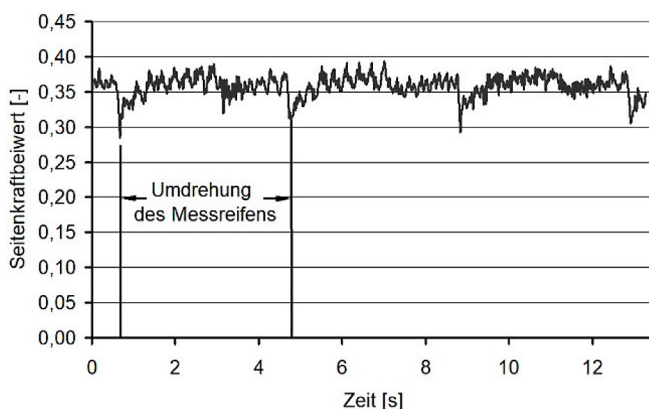
#### 4.4.4 Simulation des Fahrbetriebes

Zur Simulation des Fahrbetriebes am Walzenprüfstand wird bei feststehender Mechanik die Zeitachse durch eine auf 80 km/h (22,2 m/s) bezogene Wegachse umgerechnet. Die Simulation unterschiedlich hoher Reibbeiwerte war ursprünglich durch Aufbringung von high- $\mu$ -Folien auf die Walze des Prüfstandes geplant. Aufgrund des geringen Walzendurchmessers – wie auch der dann unvermeidlichen Kopplung an die Schwingung des Systems – wurde diese Möglichkeit jedoch verworfen. Ersatzweise wurde versucht, den Reifen durch Aufbringen eines Schmirgelleinen-Streifens auf der Lauffläche zu ertüchtigen. Dies funktionierte zwar prinzipiell (Bild 4-25), jedoch waren die Änderungen in den Federeigenschaften des Reifens erheblich.



**Bild 4-25: Messung mit auf den Reifen aufgetragenem Schmirgelleinen**

Außerdem stellte sich bei dem für die Versuche ausgewählten Reifen ohne weiteres Zutun eine über den Umfang unterschiedliche Griffigkeit ein (Bild 4-26), die für die weitere Untersuchung ausreichend war.



**Bild 4-26: Messung von 3 Messreifenumdrehungen und dem „Fingerprint“ des Messreifens bezüglich der Griffigkeit**

Der „Umfangs-Fingerprint“ des Messreifens führte letztlich auch zur Aufklärung eines lange ungelösten Problems.

Bei einigen Messfahrten war bei einer Wellenlänge von 2,1 m sowohl in dem Spektrum der Vertikalkraft wie auch im Spektrum der Seitenkraft ein lokales Amplitudenmaximum aufgetreten, das in anderen Messungen mit gleichem Messsystem und gleicher Messstrecke fehlte (siehe auch in Bild 4-5, 4-6 und 4-7).

Der Umfang des Messreifens beträgt 2,105 m. Eine Unwucht, Schwankungen im Abstand des Laufstreifens von der Messradachse (z. B. im Bereich des Ventils) und lokale Reibwertunterschiede haben genau diese Frequenz. Unwucht und Irregularitäten im Aufziehen (hier reicht bereits weniger als 1 mm) führen zu genau dieser Frequenz, sowohl im Seitenkraft-Spektrum wie im Vertikalkraft-Spektrum, während sich Griffigkeitsschwankungen im Laufstreifen nur in der Seitenkraft niederschlagen.

In Fahrversuchen wurde bestätigt, dass neben dem in der Frequenz konstanten Schwingungsverhalten der Messmechanik auch wegabhängige Periodizitäten auftreten, die nur teilweise aus der Fahrbahn stammen (z. B. infolge von Fugen zwischen den Betonplatten), aber auch aus der Unwucht des Messreifens resultieren können. Die in Metern gemessene Wellenlänge dieser Effekte ist – anders als die Schwingungen der Messmechanik – unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit.

#### 4.4.5 Bewertung der Ergebnisse

Mit der erfolgreichen Beschreibung der Schwingungssituation an der SKM-Mechanik wie auch der durch den Reifen ausgelösten Effekte ist es gelungen, ein Großteil der Schwingungen in der Seitenkraftaufzeichnung einer Ursache zuzuordnen. Allerdings sind nur die messbaren Schwingungen der Mechanik für eine Korrektur geeignet. Insbesondere kurzweilige Schwingungen im Seitenkraftspektrum sind nicht soweit aufzuklären, dass eine Möglichkeit zur Korrektur gegeben wäre. Deshalb ist eine Tiefpassfilterung der Messsignale unvermeidlich, die diese nicht korrekturfähigen Schwingungsanteile soweit dämpft, dass der Seitenkraftbeiwert hierdurch nicht mehr verfälscht wird.

## 4.5 Durchführung der Versuche an Messfahrzeugen

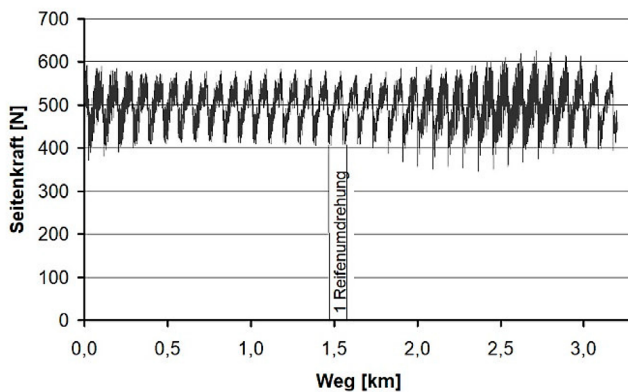
### 4.5.1 SKM-Messfahrzeug mit SKM-Mechanik

Für die Durchführung der Versuche auf dem Walzenprüfstand mit einem Messfahrzeug wird diesem ein künstliches Tachosignal zugeführt, welches eine Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h simuliert. Die Datenaufzeichnung während der Versuche erfolgt wie bei einer normalen Messfahrt, also weggesteuert. Allerdings ist durch das konstante Pulssignal für den Tacho gewährleistet, dass Zeit und Weg fest aneinandergelockt sind.

In Bild 4-28 wird ein Phänomen relativ deutlich, welches bei der Simulation von Fahrbahnunebenheiten mit dem Rollenprüfstand auftritt.



**Bild 4-27: Messfahrzeug mit SKM-Messmechanik auf dem Walzenprüfstand**



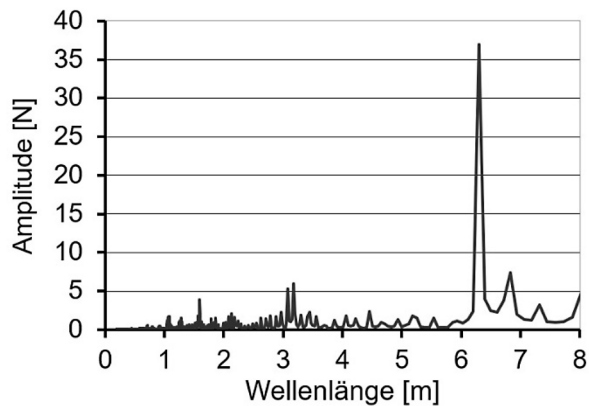
**Bild 4-28: Simulierte SKM-Messfahrt mit 34 Messreifenumdrehungen und Schwebung aufgrund leichter Differenzen zwischen Eigenfrequenz und Anregungsfrequenz**

Differieren Anregungsfrequenz und Eigenfrequenz bei einem schlecht gedämpften Schwinger – wie gezeigt wurde, ist der Stoßdämpfer beim SKM-Messsystem fast wirkungslos –, tritt die sogenannte Schwebung auf. Hierbei verstärken sich Anregung und Eigenschwingung phasenweise, zu anderen Zeiten schwingen sie entgegengesetzt und löschen sich so fast aus.

Im Bild äußert sich die Schwebung nicht nur in einer Zunahme der Amplitude, sondern vor allem darin, dass die Reifencharakteristik phasenweise von einer ausgeprägten hochfrequenten Schwingung überlagert wird. Ebenfalls in Bild 4-28 gut sichtbar ist der „Finger-print“ des Messreifens.



Das Seitenkraftspektrum (Bild 4-29) zeigt deutlich weniger und schwächer ausgeprägte Maxima im kurzwelligen Bereich unter 2m Wellenlänge als das Fahrzeug mit der SCRIM-Messmechanik. Dies passt zu den Erfahrungen im praktischen Fahrbetrieb und bestätigt damit die Aussagekraft der Versuche auf dem Rollenprüfstand.



**Bild 4-29: Wellenlängenspektrum der Seitenkraft des SKM-Messfahrzeuges auf dem Rollenprüfstand**

#### 4.5.2 Messfahrzeug mit SCRIM-Mechanik

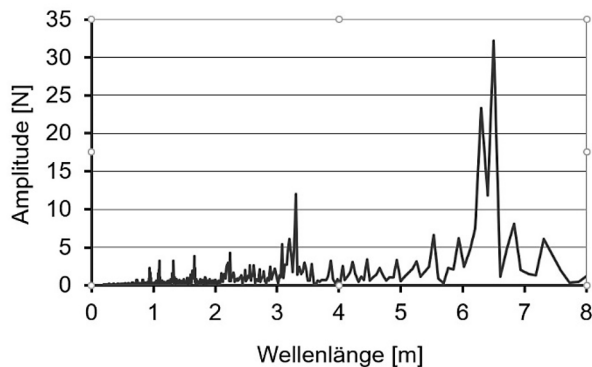
Das SKM-Messfahrzeug mit der SCRIM-Messmechanik von IWS wird in gleicher Weise auf dem Teststand durch externe Tachosignal-Erzeugung betrieben wie das Fahrzeug mit SKM-Messmechanik. Die Datenaufzeichnung erfolgt auch hier weggesteuert.



**Bild 4-30: Messfahrzeug mit britischer SCRIM-Messmechanik auf dem Walzenprüfstand**

Bei der Erprobung auf dem Messstand fällt auf, dass die Messmechanik kaum schwingt. Bei Analyse des Wellenlängenspektrums erkennt man im langwelligen Bereich sofort zwei dicht nebeneinander liegende Maxima (dies gilt auch für die Oberwelle bei der doppelten Frequenz).

Ursache ist, dass Anregungsfrequenz und Eigenschwingung nicht exakt aufeinander abgestimmt sind, sodass beide Frequenzen im Spektrum sichtbar werden.



**Bild 4-31: Wellenlängenspektrum der Seitenkraft des Messfahrzeuges mit SCRIM-Messmechanik auf dem Rollenprüfstand**

#### 4.5.3 Bewertung der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, wie die unterschiedlichen Messmechaniken sich bei hoher zeitlicher Auflösung der Messsignale erkennbar unterschiedlich verhalten. Dies ist im Labor gut reproduzierbar.

Basierend auf den Erkenntnissen zur Bandbreite des Schwingungsverhaltens aufgrund unterschiedlicher Ausführungen der Messmechanik muss unterschieden werden zwischen dynamischen Frequenzanteilen, die sich bei allen untersuchten Messmechaniken wiederfinden und die deshalb für eine Korrektur geeignet sind, und bauartbedingtem individuellem Schwingungsverhalten, das durch Tiefpassfilterung der Kraft-Messsignale unterdrückt werden muss.

Derzeit kann über den Rollenprüfstand das Messsystem nur mit einer periodischen Schwingung angeregt werden. Dies kann – sofern die Eigenfrequenz der Mechanik nicht exakt getroffen wird – zu dem beschriebenen Phänomen der Schwebung führen. Dieses könnte nur dann umgangen werden, wenn die mechanische Anregung zur Schwingung durch zufällige Auslenkungen erfolgen würde. Mit einem Rollenprüfstand dieser Bauform ist dies nicht möglich. Dennoch gibt es durchaus Parallelen zur Praxis, beispielsweise auf Betonoberflächen. Bei 80 km/h Messgeschwindigkeit verursachen Fugen bzw. Platten im 5m-Raster ebenfalls eine periodische Anregung der Messmechanik nahe der Eigenfrequenz des Messsystems.

Der eigentliche Nutzen eines Rollenprüfstandes dieser Art besteht aber darin, sowohl im Seitenkraft-Messsignal wie auch im Vertikalkraft-Messsignal periodische Schwingungen erzeugen zu können, die hinsichtlich ihrer Phasenlage sehr genau untersucht werden können.

Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung wurde auf gute Übereinstimmung der Maxima und Minima im Seitenkraft- und Vertikalkraft-Signal geachtet. Hiermit lassen sich die Messverstärker auch recht gut aufeinander einstellen.

Nach neuesten Erkenntnissen noch besser geeignet ist aber eine Abstimmung der Seitenkraft zu exakt dem Zeitpunkt, wenn die Vertikalkraft der statisch bestimmten Normalkraft entspricht. Innerhalb einer Periode tritt dieser Zustand zweimal ein. Sind die Seitenkräfte zu beiden Zeitpunkten gleich groß, liegen die Signale exakt in Phase. Aber bereits kleinste Phasenverschiebungen führen dazu, dass der Abtastwert auf der steigenden Flanke sich

vom Abtastwert auf der fallenden Flanke systematisch auch über viele Perioden hinweg immer in gleicher Weise unterscheidet.

Leider konnte diese sehr praktikable und hochempfindliche Justiermöglichkeit für die aktuell umgerüsteten Fahrzeuge noch nicht genutzt werden. Sie wird aber in der Zukunft ein wichtiges Hilfsmittel zur Messverstärker-Einstellung sein, um exakt gleiche Phasenlagen von Vertikalkraft und Seitenkraft gewährleisten zu können.

Hierin liegt ein Schlüssel, um die räumliche Auflösung des Seitenkraftbeiwertes nochmals um den Faktor zwei zu steigern. Auf die Hintergründe für diese Möglichkeit zur Erhöhung der Auflösung wird im folgenden Kapitel 5 eingegangen.

## 4.6 Einfluss von Wankbewegungen

Auf dem Walzenprüfstand führte ein manuelles Einleiten einer Wankbewegung in das Fahrzeug zu keiner erkennbaren Veränderung der Seitenkraftmesskurve. Dem Einfluss von Wankbewegungen auf das Messergebnis wird deshalb nicht weiter nachgegangen.

## 4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Erprobung der stationären SKM-Messmechanik sowie der Mechaniken der beiden Messfahrzeuge auf dem Laborprüfstand hat zu einer Reihe von Erkenntnissen über das Schwingungsverhalten der Seitenkraft-Prüfeinrichtung geführt. Die Ergebnisse sind, soweit sie nachprüfbar waren, in sich schlüssig und deshalb für die Korrektur des dynamischen Einflusses auf den Seitenkraftbeiwert verwertbar.

Weder im Labor noch durch Fahrversuche konnten die bei kürzeren Wellenlängen liegenden Eigenfrequenzen soweit aufgeklärt werden, dass hierauf ein Korrekturverfahren aufbauen könnte.

Gut messbar ist dagegen der Einfluss der Eigenfrequenz der Messmechanik. Ein Korrekturverfahren muss sich deshalb auf diese Frequenzanteile beschränken. Eine entsprechende Aufbereitung der Daten durch eine entsprechende Tiefpass-Filterung ist deshalb für qualitativ hochwertige Ergebnisdaten unverzichtbar. Im nachfolgenden Kapitel wird deshalb die Vorbereitung durch Filterung und ggf. Korrektur der Phasenlage besprochen, bevor die einzelnen Berechnungsmodelle zur Einrechnung der Vertikalkraft in das Messergebnis vorgestellt werden.

## 5 Vergleich unterschiedlicher Berechnungsverfahren

Für die Einbeziehung der Vertikalkraft-Messdaten in die Ermittlung des Seitenkraftbeiwertes existiert im Rahmen der europäischen Normung ein Entwurf, der sich auf die von ROE et al. [ROE, 2005] vorgeschlagene Berechnungsweise bezieht. Diese Vorgehensweise wird in Großbritannien seit vielen Jahren praktiziert. Hierbei wird entsprechend der gewünschten Abschnittsgröße eine für diesen Abschnitt geltende mittlere Seitenkraft und mittlere Vertikalkraft durcheinander dividiert.

Erscheint die Vorgehensweise auch zunächst nachvollziehbar, ergeben sich in dem weiteren Umgang mit den so gewonnenen Seitenkraftbeiwerten einige Schwierigkeiten. So ist zum Beispiel der Mittelwert von 100 aufeinander folgenden 1m-Abschnitten nicht gleich dem Wert, der sich für den entsprechenden 100m-Abschnitt ergibt. Somit können Abschnittswerte nicht im Nachgang zusammengefasst werden, sondern müssen auf Basis der Rohdaten (Kraftmesswerten) dann neu berechnet werden. Ursache ist, dass entsprechend dem oben angeführten Beispiel die beiden Berechnungsergebnisse

$$SFC_{100} = F_{S1}/F_{V1} + F_{S2}/F_{V2} \dots + F_{S100}/F_{V100}$$

$$SFC_{100} = (F_{S1} + F_{S2} \dots + F_{S100}) / (F_{V1} + F_{V2} \dots + F_{V100})$$

nicht zum selben Ergebnis führen.

Über die Ursachen, die zu einem solchen komplizierten Berechnungsverfahren geführt haben, liegen keine Informationen vor. Aufgrund von Hinweisen, dass bei den britischen Messfahrzeugen eine Phasenverschiebung zwischen Seitenkraft und Vertikalkraft auftritt, wäre aber zumindest ein Anhaltspunkt gegeben, weshalb die Vertikalkraft und Seitenkraft nicht direkt miteinander verrechnet werden können, sondern man je nach Technologie des Fahrzeugs so große Mittelwerte bildet, dass die Phasenverschiebung zwischen beiden gemessenen Kräften von untergeordneter Bedeutung ist.

Auch im Rahmen dieses Vorhabens wurden zunächst Phasenverschiebungen zwischen beiden Kraft-Messsignalen gefunden, die aber im Verlauf der Untersuchungen aufgeklärt werden konnten (vgl. Bild 4-6/Bild 4-7, siehe dazu auch Kapitel 5.2).

Hauptursache war eine in die Messverstärker integrierte analoge Vorfilterung der Messsignale, bevor diese digitalisiert werden. Eine solche Filterung ist grundsätzlich sinnvoll, sowohl zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses wie auch zur Vermeidung von Problemen bei der Abtastung (Alias-Effekte). Sie muss nur bei beiden Kraftmesssensoren exakt gleich ausgeführt sein, da derartige analoge Filter nicht phasenneutral sind. Da bei den SCRIM-Messfahrzeugen die Vertikalkraft-Messung häufig nachgerüstet wurde, besteht zumindest die Möglichkeit, dass aufgrund der unterschiedlichen Zeitpunkte der Integration in das Messfahrzeug beide Signalquellen unterschiedlich analog gefiltert werden.

Bei den im Rahmen dieses Forschungsprojektes verwendeten Messfahrzeugen konnte der Phasengang zwischen beiden Signalquellen (Seitenkraft-/ Vertikalkraft-Sensor) bis auf einen sehr kleinen Restbetrag beseitigt werden.

## 5.1 Vorbereitende Filterung der Daten

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt werden konnte, treten in den Seitenkraftmessdaten periodische Schwankungen des Messwertes auf, deren Ursprung auf die Eigenfrequenz der Messmechanik zurückgeführt werden kann. Andere höherfrequente Schwingungen konnten zwar teilweise auch mit der Messvorrichtung in Verbindung gebracht werden (z. B. bedingt durch Exzentrizitäten am Messreifen, Oberwellen der Grundschwingung der Mechanik), sind aber ebenso wie bislang unaufgeklärte Frequenzanteile nicht korrekturfähig. Deshalb ist es sinnvoll, die Messdaten der Kraftmessdosen einer digitalen Filterung zu unterziehen, die die nicht korrigierbaren Frequenzanteile in den Kraftmesssignalen der Vertikalkraft bzw. Seitenkraft unterdrückt.

Eine sichere Trennung zwischen korrekturfähigen Frequenzanteilen und nicht korrigierbaren Schwingungen wird dadurch erschwert, dass die entsprechenden Frequenzen relativ dicht beieinander liegen. Die Eigenfrequenz der Messmechanik liegt je nach Stoßdämpfer und dessen Einstellung bei ungefähr 5 Hertz. Bei Frequenzen oberhalb von etwa 10 Hertz beginnen bereits die nicht korrekturfähigen Anteile des Schwingungsspektrums. Demzufolge wird ein Tiefpass-Filter mit möglichst hoher Flankensteilheit benötigt, der einerseits möglichst detailliert Griffigkeitsunterschiede in der Fahrbahn abbildet, etwaige Verfälschungen des Messergebnisses durch höherfrequente Schwingungen der Mechanik aber weitestgehend unterdrückt.

Die digitale Filterung der Messdaten mittels Butterworth-Filter ist in der Signalaufbereitung weit verbreitet und hat beispielsweise Eingang in die Norm zur Aufbereitung von profilometrischen Texturmessdaten (ISO 13473-1:2019 [ISO, 2019]) gefunden.

Durch doppelte Anwendung des Filter-Algorithmus, wobei dieser zunächst vorwärts in Richtung steigender Datensatznummern und anschließend rückwärts beginnend am letzten Datensatz ausgeführt wird, entsteht ein Filterergebnis ohne Phasenverschiebung der Spektralanteile zueinander. Dadurch ist sichergestellt, dass der Ortsbezug von Griffigkeitsveränderungen im Zuge der Datenaufbereitung in jedem Fall erhalten bleibt.

Der auf diese Weise gestaltete, phasenneutrale Butterworth-Filter 2. Ordnung kann zudem mehrmals auf den Datensatz der Messung angewendet werden, wodurch ein Filterergebnis entsprechend höherer Ordnung entsteht. Bei der Kaskadierung des Filters ist zu beachten, dass diese eine Verschiebung der Grenzfrequenz (-3 dB Dämpfung bzw. Halbierung der Leistung) zur Folge hat, während die Eckfrequenz (Schnittpunkt der Geraden in logarithmischer Darstellung) erhalten bleibt (Bild 5-1 und Bild 5-2).

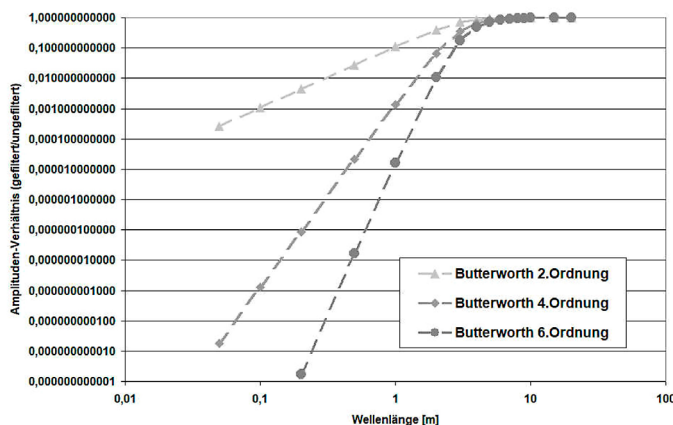
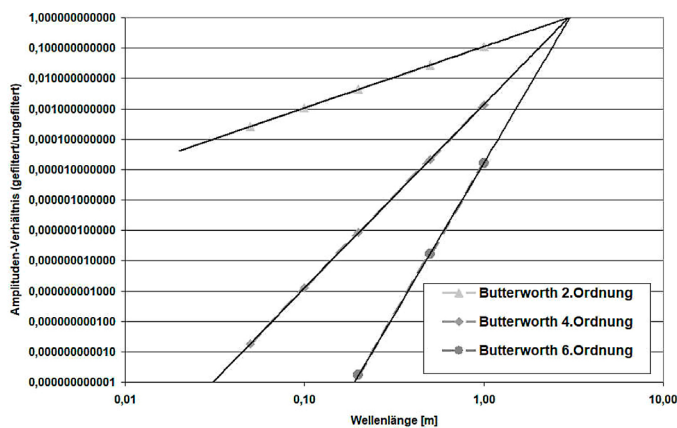


Bild 5-1: Filterkennlinien des digitalen phasenneutralen Butterworth-Filters 2., 4. und 6. Ordnung



**Bild 5-2: Gemeinsamer Schnittpunkt (Eckfrequenz) der kaskadierten Butterworth-Filter 2., 4. und 6. Ordnung**

In der Anwendung hier, in der das Messergebnis der Quotient zweier gefilterter Signalquellen ist, ist die Eckfrequenz etwa mittig zwischen korrekturfähigen und nicht korrigierbaren Schwingungsanteilen anzuordnen. Die besten Ergebnisse wurden mit einem digitalen Butterworth-Filter 6. Ordnung erzielt. Hierzu ist der nachfolgend beschriebene Algorithmus, bestehend jeweils aus einer Vorwärts- und einer Rückwärts-Filterung, insgesamt dreimal hintereinander anzuwenden.

Nachfolgend sind die Filterparameter für verschiedene Dateiformate angegeben. Bei annähernd konstanter Messgeschwindigkeit können Filterparameter auch für äquidistante Messdateiformate angegeben werden. Variiert die Messgeschwindigkeit entlang der Messstrecke deutlich (z. B. im Rahmen von ZEB-Messungen), müssten die Filterparameter bei Verwendung äquidistanter Datenaufzeichnung fortlaufend angepasst werden. Hier ist eine Datenaufzeichnung in festem Zeittakt deutlich günstiger, weil in diesem Fall die Filterparameter unabhängig von der Messgeschwindigkeit stets unverändert bleiben.

Für die Datenspeicherung mit festem Zeittakt im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde eine Frequenz von 4.5 kHz gewählt. Bei einer Messgeschwindigkeit von 80 km/h ergibt dieser Takt einen Messpunktabstand von annähernd 5mm.

Gegenüber bisherigen Auflösungen des Messergebnisses bedeutet dies eine Steigerung sowohl zeitlich als auch räumlich um mehr als eine Größenordnung. Diese hohe Auflösung ist jedoch nur für Forschungszwecke sinnvoll. Im praktischen Messbetrieb würde dies eine erhebliche Vergrößerung der Messdatenfiles bedeuten, die dementsprechend deutlich schwieriger zu handhaben wären.

Vor dem Hintergrund der hier vorgestellten einheitlichen Datenfilterung wären Taktraten von mehr als 200 Hz in jedem Fall ausreichend. Zu beachten ist, dass die drei Parameter des Filters sich nach der realisierten Taktrate und der Eckfrequenz richten. Mit Übernahme der Bezeichnungen aus der ISO 13473-1:2019 sind dies:

$$A_0 = t / r^2$$

$$A_1 = -(1 + r^2 - r\sqrt{2}) / t$$

$$A_2 = -(r^2 - 1) * 2 / t$$

mit den beiden Hilfsvariablen r und t:

$$r = \tan(\pi * t_s / \lambda_c)$$

$$t = r^2 + 1 + r\sqrt{2}$$

Die Abtastrate  $t_s$  ist dabei wahlweise in Sekunden (bei fester Abtastfrequenz) oder in Metern (bei äquidistanter Abtastung) anzugeben, die Eckwellenlänge  $\lambda_c$  entsprechend ebenfalls in Sekunden (Kehrwert der Eckfrequenz) oder in Metern (Messgeschwindigkeit dividiert durch die Eckfrequenz).

Die besten Ergebnisse der vorbereitenden Filterung von Seitenkraft und Vertikalkraft wurden mit einer Eckfrequenz von 8,5 Hz erzielt.

Bei äquidistanter Datensatz-Speicherung sollten demzufolge mindestens 1 Datensatz je 10 cm vorliegen, da ansonsten die digitalen Filter aufgrund der sich ergebenden Eckwellenlänge von 1,3m bei 40 km/h (2,0m bei 60 km/h bzw. 2,6m bei 80 km/h) nicht sinnvoll angewendet werden können.

Die Formeln für die Butterworth-Filterung lauten dann mit der Eingangsgröße  $x$  (ungefiltertes Kraftsignal) und der Ausgangsgröße  $y$  (Kraftsignal-Ergebnis nach Filterung):

$$y_i = (x_{i-2} + 2x_{i-1} + x_i) / A_0 + A_1 y_{i-2} + A_2 y_{i-1}$$

mit

$$y_1 = x_1, y_2 = x_2$$

für die Vorwärts-Filterung sowie

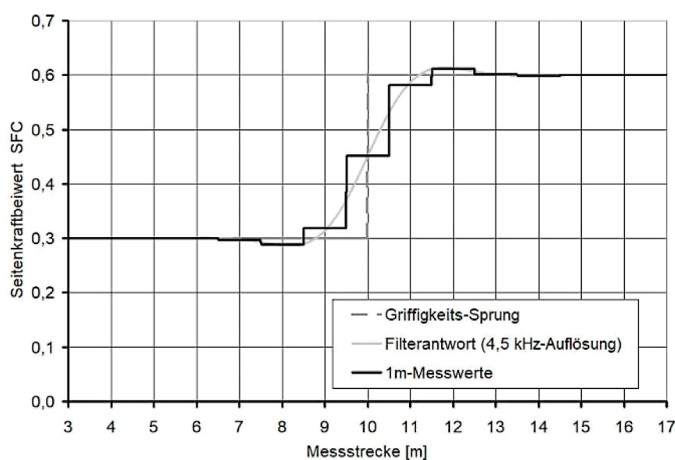
$$y_i = (x_{i+2} + 2x_{i+1} + x_i) / A_0 + A_1 y_{i+2} + A_2 y_{i+1}$$

mit

$$y_n = x_n, y_{n-1} = x_{n-1}$$

für die Rückwärts-Filterung.

Wendet man die vorgeschlagene Filterung auf einen simulierten Datensatz mit einer stufenförmigen Änderung der Griffigkeit – im Beispiel (Bild 5-3) von 0,3  $\mu$ SKM auf 0,6  $\mu$ SKM nach 10 Metern – an, so sind von der Veränderung insgesamt fünf 1m-Datensätze betroffen, wovon allerdings die ersten beiden und letzten beiden nur wenige Prozent Abweichung vom ungefilterten Signal aufweisen. 87 % der Signaländerung erfolgen innerhalb von 2 Metern. Bei niedrigerer Messgeschwindigkeit erfolgt der Anstieg entsprechend zügiger (z. B. 87 % Signaländerung innerhalb von 1 Meter bei 40 km/h).

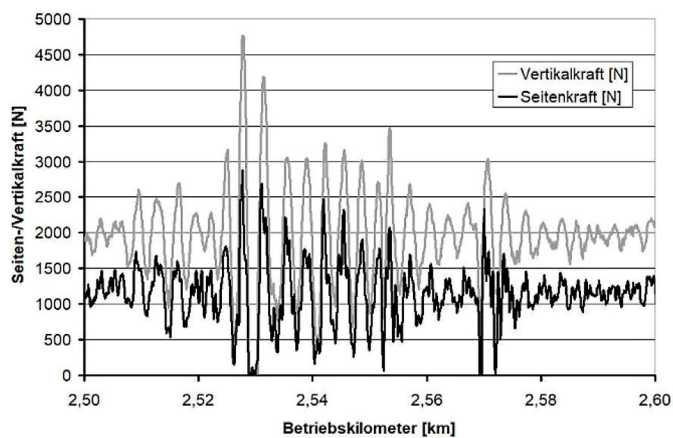


**Bild 5-3: Rechnerische Stufenantwort des vorgeschlagenen Filters bei 80 km/h Messgeschwindigkeit**

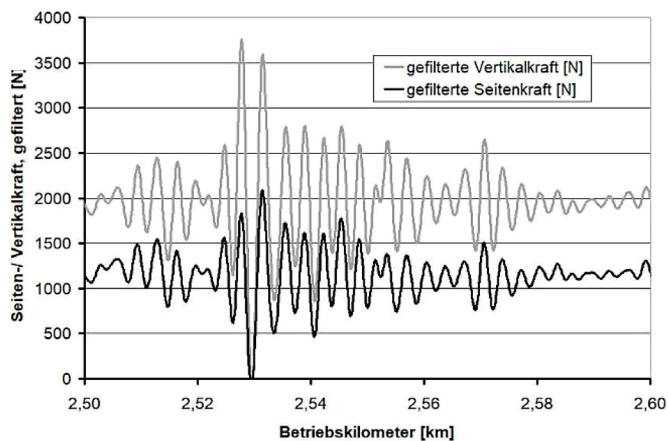
Insofern steht die Filterung dem ursprünglichen Ziel, möglichst gültige 1m-Werte zu generieren, nicht entgegen.

Die vorgeschaltete Filterung der Daten ist zwingend notwendig, um eine ausreichende Korrelation zwischen lokalem Seitenkraft- und Vertikalkraft-Verlauf zu erzielen. Ohne vorherige Filterung sind auch Phasenverschiebungen zwischen Seiten- und Vertikal-Kraft nicht hinreichend genau zu identifizieren. Beides ist jedoch Voraussetzung für eine stabile, dem Griffigkeitsverlauf der Fahrbahn entsprechende Berechnung des Seitenkraftbeiwertes.

Im nachfolgenden Beispiel sind anhand eines 100m-Abschnittes einer 60km/h-Messung die Messergebnisse beider Kraftmesssensoren ungefiltert (Bild 5-4) und gefiltert (Bild 5-5) dargestellt, um die Auswirkungen des Filters anhand eines praktischen Beispiels beurteilen zu können.



**Bild 5-4: Daten der Kraftmesssensoren eines 100m-Abschnittes im ungefilterten Zustand**



**Bild 5-5: Daten der Kraftmesssensoren des 100m-Abschnittes aus Bild 5-4 nach Durchführung der Filterung**

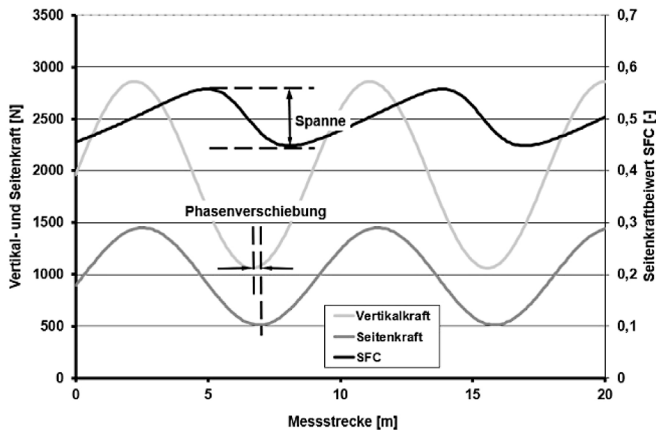
## 5.2 Prüfung auf Phasenlage

Die einheitliche Filterung der Daten von Vertikal- und Seitenkraft führt dazu, dass die Phasenlage beider Messsignale zueinander recht gut beurteilt werden kann. Eine gute Übereinstimmung der Phasenlage beider Messsignale ist essentiell für ein stabiles Berechnungsergebnis des Seitenkraftbeiwertes, unabhängig vom verwendeten Korrekturverfahren. Um die Bedeutung von auch nur geringen Phasenverschiebungen deutlich zu machen,



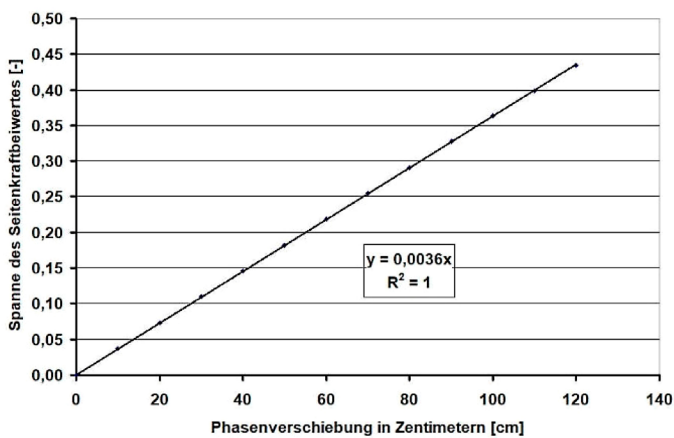
sind nachfolgend Simulationsergebnisse dargestellt, mit denen die Bedeutung kleiner Phasenverschiebungen aufgezeigt werden kann.

In Bild 5-6 sind zwei simulierte Signale für Seitenkraft und Vertikalkraft dargestellt, deren Verhältnis zueinander zu einem mittleren Seitenkraftbeiwert von 0,5  $\mu$ SKM führt. Die Wellenlänge entspricht dabei der Wellenlänge einer schwingenden SKM-Messmechanik bei 80 km/h Fahrgeschwindigkeit des Messfahrzeuges.



**Bild 5-6: Einfluss geringer Phasenverschiebungen auf die Stabilität der Berechnung des Seitenkraftbeiwertes**

Trägt man die Spanne gegen die Phasenverschiebung auf, erhält man für kleine Phasenverschiebungen einen nahezu linearen Verlauf (Bild 5-7).



**Bild 5-7: Zusammenhang von Phasenverschiebung und Spanne des Seitenkraftbeiwertes für das in Bild 5-6 dargestellte Beispiel**

Im Ergebnis bedeutet eine Phasenverschiebung von nur 0,1 m in diesem Beispiel, dass der ermittelte Quotient aus Seitenkraft und Vertikalkraft schon einen deutlichen periodischen Anteil (in diesem Beispiel mit einer Spanne von 0,036) aufweist.

In diesem Zusammenhang erweist sich die Abtastung im 0,1 m Raster als hinderlich, um auch kleinere Phasenverschiebungen unter 10 cm bestimmen und ggf. korrigieren zu können.

Versuche, durch lineare Interpolation Zwischenpunkte zu generieren und auf diese Weise auch kleinere Phasenverschiebungen kompensieren zu können, haben sich bislang wegen der damit verbundenen Signaldämpfung nicht als zielführend erwiesen.

Übersteigt die Phasenverschiebung die Breite des Abtastintervalls, ist dies dagegen zwingend zu korrigieren.

### 5.3 Das Quotientenverfahren

Die direkte Division von lokal gemessener Seiten- und Vertikalkraft setzt voraus, dass dynamische Schwingungsvorgänge an beiden Sensoren und in der nachfolgenden Datenverarbeitung richtig und mit ausreichender Auflösung aufgezeichnet werden. Der Messabschnitt ist so zu wählen, dass etwaige verbliebene leichte Phasenverschiebungen im Verhältnis zur Gesamtgröße des Mittelungsabschnittes von untergeordneter Bedeutung sind. Wird gegen diesen Grundsatz verstoßen, zeigt der Seitenkraftbeiwert weiterhin aus der Messmechanik stammendes Schwingungsverhalten.

Der direkte Vergleich von auf Basis von Quotienten aus lokaler Vertikalkraft und lokaler Seitenkraft berechneten Seitenkraftbeiwerten und beispielsweise 100m-Mittelwerten zeigt eine recht gute Übereinstimmung, wenn die lokal ermittelten Werte zu 100m-Mittelwerte zusammengefasst werden.

Mit Blick auf die zukünftige Standardisierung des Rohdatenformates ist zu prüfen, inwieweit die gleiche Phasenlage bei den Sensoraufzeichnungen auch bei unterschiedlichen aufgebauten Messfahrzeugen gewährleistet werden kann. Dem Rollenprüfstand im Labor wird hierbei vermutlich zukünftig eine wesentliche Funktion zukommen, um den Abgleich der Phasenlage während der Durchführung von Einstellungsmaßnahmen nachweisen zu können.

Gelingt dies, kann die Länge der Mittelungsabschnitte, auf die das Quotientenverfahren angewendet wird, durchaus 1m oder sogar weniger betragen.

Die Grenzen des Quotientenverfahrens für eine bauvertragliche Anwendung liegen darin begründet, dass eine Reihe von Fragestellungen nicht durch entsprechende Untersuchungsergebnisse beantwortet werden können.

Es mag plausibel erscheinen, wenn die dynamische Seitenkraft auf eine ebenso dynamische Vertikalkraft bezogen wird. Es ist aber völlig unklar, ob die so ermittelten Seitenkraftbeiwerte vergleichbar mit den bisherigen Ergebnissen sind.

Insbesondere ist nicht bekannt, ob bei sehr hohen oder sehr niedrigen Vertikalkräften ein gänzlich anderes Verhältnis zwischen Vertikalkraft und Seitenkraft vorliegt, als dies im schwingungsfreien Messen der Fall gewesen wäre. Es gibt hierfür zumindest einige Gründe:

1. Mit zunehmender Vertikalkraft vergrößert sich auch die Kontaktfläche zur Fahrbahn. Dies könnte die Wasserdrainage aus der Kontaktfläche erschweren und somit zu einer niedrigeren Seitenkraft durch partielles Aufschwimmen des Messreifens führen.
2. Mit zunehmender Vertikalkraft erhöht sich die in der Kontaktfläche freigesetzte Reibungswärme. Die Erwärmung des Reifengummi lässt dieses weicher werden. Wie aus anderen Untersuchungen bekannt, führt wärmeres und damit weiches Gummi ebenfalls zu niedrigeren Reibbeiwerten.
3. Wenn die Schwingung des Reifens so ausgeprägt ist, dass dieser zeitweise den Kontakt zur Fahrbahn verliert, ist keine Bestimmung des Reibbeiwertes mehr möglich. Daher muss ein Mindestwert für die Vertikalkraft festgelegt werden. Wird dieser unterschritten, sind die Reibbeiwerte nicht mehr aus dem Quotienten zu berechnen, sondern durch lineare Interpolation zwischen den angrenzenden gültigen Werten zu ersetzen.

Zwar hat die Erprobung des Quotientenansatzes gezeigt, dass vergleichbare Ergebnisse zum bisherigen Verfahren gefunden werden. Dennoch haben derartige Untersuchungen

allenfalls den Status eines Wissensdokumentes, bis die Datengrundlage sich soweit vergrößert hat, dass von gesicherten Erkenntnissen auszugehen ist.

Deshalb ist zu befürchten, dass eine entsprechende Umstellung der Berechnung in der TP Griff-StB (SKM) noch Jahre in Anspruch nehmen würde.

Die quantitative Übereinstimmung der Ergebnisse innerhalb des im Rahmen dieses Projektes an einem Messfahrzeug erprobten Ermittlung von 100m-Werten nach beiden Verfahren reicht allein nicht, weil weder verlässliche Aussagen für andere Messfahrzeuge noch zu verschiedenen physikalischen Effekten wie beispielsweise Drainageverhalten als Funktion der Größe des Kontaktpatches zwischen Reifen und Fahrbahn getroffen werden können.

Um zeitnah und ohne große weitere Aufwendungen die dynamische Vertikalkraftmessung in den vorhandenen TP Griff-StB (SKM) verankern zu können, ist es sinnvoll, bei der Berücksichtigung der dynamisch gemessenen Vertikalkraft den bisherigen Berechnungsansatz zu übernehmen, also auch weiterhin den Seitenkraftbeiwert als Quotienten aus dynamisch gemessener Seitenkraft und statisch ermittelter Vertikalkraft zu berechnen. Dass dennoch ein erheblicher Nutzen im Sinne einer Präzisierung des Messverfahrens aus der dynamisch gemessenen Vertikalkraft gezogen werden kann, wird im folgenden Abschnitt dargelegt.

## 5.4 Ein einfacher neuer Korrekturansatz

Ein vergleichsweise einfaches Verfahren lässt sich aus der Annahme ableiten, dass das SKM-Messsystem immer dann gültige Messwerte im Sinne der TP Griff-StB (SKM) liefert, wenn die dynamisch gemessene Vertikalkraft gerade der statisch ermittelten Vertikalkraft entspricht.

Aufgrund der Eigenfrequenz des schwingenden Messsystems von rund 5 Hz ergibt sich eine Wellenlänge von etwa 4,4 Metern bei 80 km/h Fahrgeschwindigkeit. Innerhalb einer Periode wird der Mittelwert der dynamisch gemessenen Vertikalkraft zweimal durchlaufen, sodass zu erwarten wäre, dass bei dieser Messgeschwindigkeit etwa alle 2,2 Meter die dynamische Vertikalkraft kurzzeitig der statisch ermittelten Vertikalkraft entspricht.

Dieses Verfahren hätte den für Deutschland entscheidenden Vorteil, dass es sich hierbei lediglich um eine Präzisierung der bisherigen Vorgehensweise handelt. Der im Regelwerk dokumentierte Quotient aus dynamisch gemessener Seitenkraft und statisch ermittelter Vertikalkraft hätte weiterhin Bestand. Lediglich die gemessenen Seitenkräfte würden dahingehend „präzisiert“, dass nur die Werte gelten, bei denen die dynamisch gemessene Vertikalkraft auch tatsächlich der statisch gemessenen Vertikalkraft entspricht. Im Übrigen sind dies auch die einzig sinnvollen Seitenkraftbeiwerte. Die Berechnung eines Reibbeiwertes setzt voraus, dass die beiden zugrunde liegenden Kräfte tatsächlich zeitgleich am Reifen angreifen.

Formal wird deshalb in der TP Griff-StB (SKM) ein Fehler begangen, wenn Reibbeiwerte bis auf den 1m-Maßstab heruntergebrochen werden, weil dann die beiden in den Quotienten eingehenden Kräfte in keinerlei Sachzusammenhang stehen. Richtiger wäre, im 1m-Maßstab nur Seitenkräfte aufzuzeichnen und diese dann zu einem Abschnitt zusammenzufassen, wenn die Annahme gerechtfertigt ist, dass der Mittelwert der Vertikalkraft aufgrund der Abschnittsgröße zumindest annähernd dem statisch ermittelten Wert entspricht.

Es ist deshalb dringend geboten, den lokalen Seitenkraftbeiwert wieder in eine Form zu überführen, die den physikalischen Grundvoraussetzungen für die Angabe eines solchen Quotienten genügt.

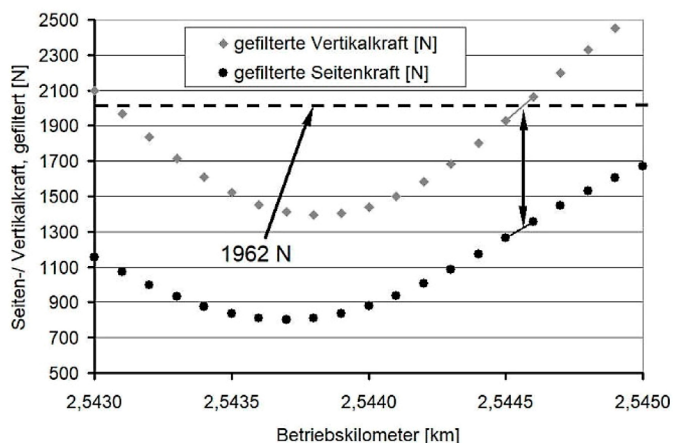
Der hier vorgeschlagene Korrekturansatz verfolgt genau dieses Ziel. Seitenkraft und Vertikalkraft werden zeitgleich ermittelt, sodass die Berechnung eines Reibbeiwertes zulässig ist.

Allerdings sieht das Regelwerk vor, dass Messwerte im 1m-Takt vorliegen, dementsprechend pro 100m-Abschnitt mindestens 100 Einzelwerte dem Mittelwert zugrunde zu legen seien. Bei 40 km/h-Messungen würde rechnerisch diese Datenmenge aufgrund des Nulldurchgangs im erwarteten 1,1m-Abstand auch zumindest näherungsweise erreicht, bei 80 km/h jedoch auf etwas weniger als die Hälfte reduziert.

Diese Überlegungen lassen jedoch außer Acht, dass bedingt durch die vorgeschaltete Tiefpass-Filterung jeder einzelne gefilterte Wert auf einer Vielzahl von ungefilterten Einzelwerten beruht. Da als Voraussetzung für die Filterung mindestens im 200Hz-Takt abgetastet werden muss, ist die Datenmenge selbst bei 80 km/h Messgeschwindigkeit um etwa eine Zehnerpotenz höher, als in den TP Griff-StB (SKM) gefordert. Infolge der Tiefpassfilterung bei 8,5 Hz gehen auch alle diese Werte – unterschiedlich gewichtet – in die ausgewählten Messpunkte mit ein.

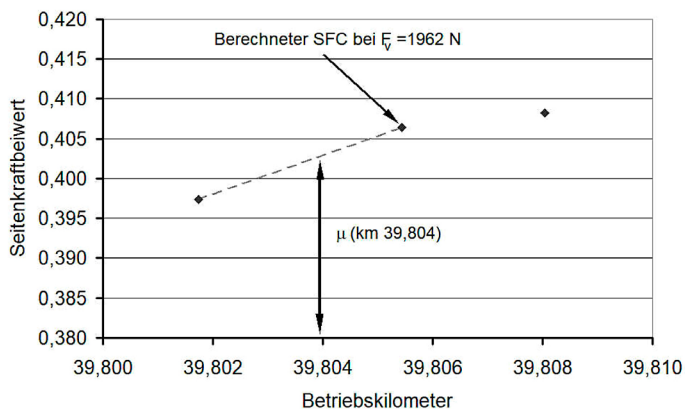
In der praktischen Umsetzung dieses Berechnungsansatzes würde wie folgt vorgegangen:

1. Auf Basis der vorliegenden Rohdaten würden der Zeitpunkt (bei Aufzeichnung der Daten in festem Zeittakt) bzw. die Stelle längs der Messstrecke (bei äquidistanter Datenaufzeichnung) ermittelt, an der die dynamische Vertikalkraft der statisch ermittelten Vertikalkraft entspricht. Zur exakten Festlegung ist es notwendig, dass zwischen den vorhandenen Datensätzen an der Übergangsstelle von zu hoher auf zu niedrige Vertikalkraft linear interpoliert wird. Analog dazu wird auch die zugehörige Seitenkraft durch lineare Interpolation an dieser Stelle ermittelt (Bild 5-8).



**Bild 5-8: Bestimmung des Messwertpaares aus Vertikalkraft und Seitenkraft durch lineare Interpolation der Vertikalkraft auf 1962N (Normalkraft der SKM)**

2. Die auf diese Weise ermittelten gültigen Messpunktpaare werden zu einem Seitenkraftbeiwert an dieser Stelle verrechnet. Diese Seitenkraftbeiwerte werden dann linear zu einem Kurvenzug verbunden. Die Überführung in das 1m-Raster gemäß der TP Griff-StB (SKM) erfolgt durch Integration der Fläche unter dem Kurvenzug im jeweiligen 1m-Abschnitt, wie in Bild 5-9 dargestellt.



**Bild 5-9: Ermittlung der Reibbeiwerte zu jedem 1m-Abschnitt, hier für km 39,804**

## 5.5 Ansätze zur Vereinfachung der Vertikalkraftkalibrierung

Die Kalibrierung der Messvorrichtung für die Vertikalkraft wurde zunächst wie folgt durchgeführt:

Die Verbindung zwischen Vertikalkraftmessdose und Stoßdämpfer wurde gelöst, die Radachse mit Stoßdämpfer auf eine unter dem Messreifen zentral angeordnete Plattformwaage abgesenkt und gewogen.

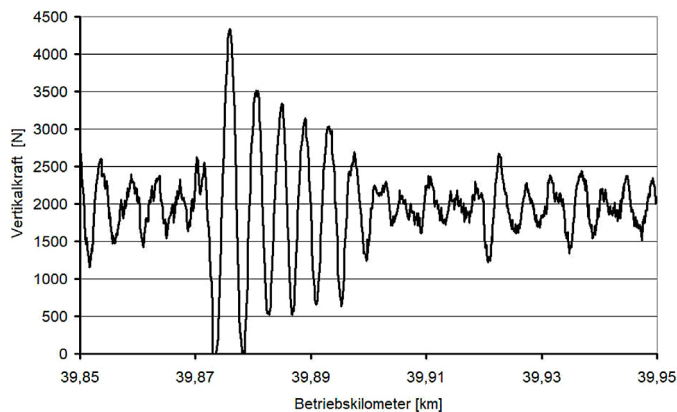
Das Gewicht der Einheit aus Reifen, Felge, Radachse und senkrecht gehaltenem Stoßdämpfer wurde bestimmt. Je nach Messfahrzeug und Ausführung der Messmechanik wurden Gewichte dieser Komponenten zwischen 42,5 und 43,5 kg ermittelt.

Der von dem AD-Wandler gemessene Wert an der einseitig freien Kraftmessdose wurde protokolliert.

Anschließend wurde der Stoßdämpfer wieder montiert, das Messrad erneut auf die Waage abgelassen und die von der Plattformwaage angezeigte Last ( $200 \text{ kg} \pm 1,0 \text{ kg}$ ) sowie die zugehörigen AD-Werte der Vertikalkraft-Messdose wurden ebenfalls festgehalten.

Es zeigte sich, dass die Reproduzierbarkeit bei Wiederholungsversuchen nicht mit derselben Präzision möglich ist, wie dies bei der Messeinrichtung für die Seitenkraft der Fall ist. Ursache hierfür sind unter anderem Wankbewegungen des Fahrzeuges, vermutlich aufgrund des mitgeführten Wassers, die durch das Ablassen der Messmechanik initiiert werden. Außerdem kommt es beim Ablassen des Rades zu Verspannungen (Querkräften) zwischen Messrad und Waagenplattform.

Im Ergebnis fehlt zurzeit eine geeignete Vorrichtung, die das exakte Kalibrieren der Vertikalkraft-Messdose ermöglicht. Dabei ist zu beachten, dass dynamisch Vertikalkräfte auftreten können, die das Doppelte der statischen Vertikalkraft erreichen oder sogar überschreiten können (Bild 5-10).



**Bild 5-10: Beispiel für hohe auftretende Vertikalkräfte, hier von der A4 (ZbBz-Strecke der BASt)**

Auch dieser Lastbereich müsste durch die Kalibrierung der Kraftmessvorrichtung abgedeckt werden. Bei einigen Messmechaniken ist es möglich, zwischen Schlitten und dessen Halteklötzchen einen Gas- oder Hydraulikzylinder (beispielsweise einen Wagenheber) einzubringen, mit dem die auf der Plattformwaage gemessene Auflast zusätzlich erhöht werden kann. Für alle Messmechaniken gilt dies jedoch nicht, sodass hier Überprüfungen der Vertikalkraftmessvorrichtung deutlich oberhalb der statischen Last derzeit nicht umsetzbar sind.

Aufgrund der beschriebenen Schwierigkeiten wird kurzfristig eine angemessene Kalibrierungsvorrichtung nicht zur Verfügung stehen.

Für die vorgesehene Anwendung, mit der Messung der Vertikalkraft lediglich den richtigen Zeitpunkt für die Ermittlung des Reibbeiwertes zu ermitteln, ist allerdings eine Umrechnung des AD-Messwertes in eine Vertikalkraft nicht erforderlich.

Vereinfacht kann deshalb im Rahmen der Betriebszulassung der SKM und im Zuge der Auflastprüfung der AD-Wert bestimmt werden, wenn die Vertikalkraft gerade der vorgeschriebenen Normalkraft (1962 N) entspricht.

Dieser AD-Wert ist dann das zukünftige Filterkriterium für den richtigen Zeitpunkt, um gültige Messwertpaare zu ermitteln und tritt damit an die Stelle des Vertikalkraft-Messwertes.

Mit dieser einfachen Vorgehensweise wurden die Messungen auf den Zulassungstrecken der BASt ausgewertet.

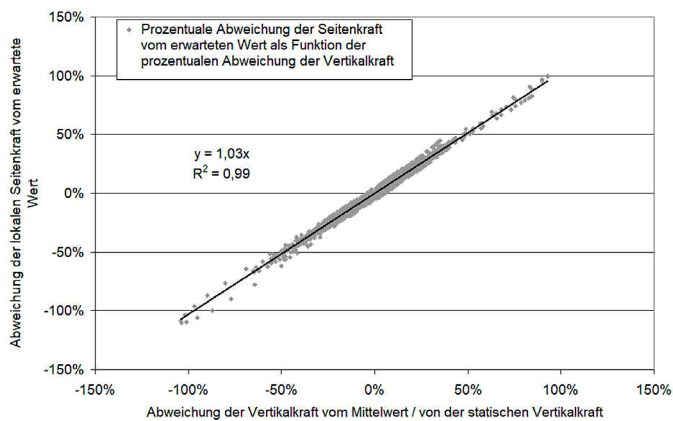
Bei allen vier teilnehmenden Fahrzeugen wurden hohe Dichten an gültigen Messwertpaaren erreicht. Die Vergleichbarkeit zu den 100m-Abschnittswerten nach konventioneller Ermittlungsmethode war in vollem Umfang gegeben.

Allerdings hat die Nutzung der neuen Berechnungsweise dort noch Lücken, wenn aufgrund der Querneigung des Messfahrzeuges die Vertikalkraft im Mittel reduziert ist. Im Zuge der umfangreichen Erprobung auf über 3000km im kontinuierlichen Messeinsatz traten gelegentlich Abschnitte auf, in denen sich der Abstand zwischen zwei gültigen Messwertpaaren auf bis zu 7 m vergrößerte. Insbesondere in engen Kurven können derartige Situationen eintreten.

Wenn in solchen Bereichen, in denen die geforderte Vertikalkraft nicht erreicht wird, ebenfalls Seitenkraftbeiwerte angegeben werden sollen, müssen sowohl die Seitenkraft wie auch die Vertikalkraft korrigiert werden. Zur Ermittlung einer Korrekturfunktion für das SKM-Fahrzeug der IWS wurde deshalb wie folgt vorgegangen:

Auf Basis der gültigen Messwertpaare aus Seitenkraft und Vertikalkraft (mit  $F_v = 1962\text{N}$ ) wurde für die Seitenkraft ein Kurvenzug ermittelt, sodass für jeden beliebigen dynamischen Seitenkraftmesswert ein entsprechender Bezugswert vorlag. Für die Vertikalkraftmesswerte war dieser Bezugswert ja konstant und betrug immer 1962 N. Mithilfe der Bezugswerte konnte nun berechnet werden, wie stark an jeder beliebigen Stelle der Messung der reale Kraftmesswert vom für ihn geltenden Bezugswert abwich. Die Abweichung wurde sowohl für Seitenkraft als auch Vertikalkraft als prozentuale Abweichung vom Bezugswert angegeben, wobei der jeweilige Bezugswert mit 100 % gleichgesetzt wurde. Für die Vertikalkraft waren 100 % dementsprechend gleichbedeutend mit 1962 N, für die Seitenkraft markierte der Kurvenzug aus den gültigen Wertepaaren die 100 %-Linie.

Erstaunlicherweise wiesen prozentuale Abweichung der Seitenkraft und prozentuale Abweichung der Vertikalkraft eine nahezu ideal lineare Abhängigkeit auf. Für eine Messstrecke mit teilweise sehr hohen dynamischen Veränderungen der Vertikalkraft ist exemplarisch in Bild 5-11 dieser Zusammenhang dargestellt.



**Bild 5-11: Prozentuale Abweichung der Seitenkraft als Funktion der prozentualen Abweichung der Vertikalkraft**

In allen untersuchten Fällen ergab sich ein vergleichbar linearer Zusammenhang mit Steigungen sehr nahe an 1,000. Die festgestellte Spanne zwischen 0,97 und 1,03 hat dabei voraussichtlich wenig Bedeutung, da der Phasenwinkel ja noch nicht vollständig korrigiert war.

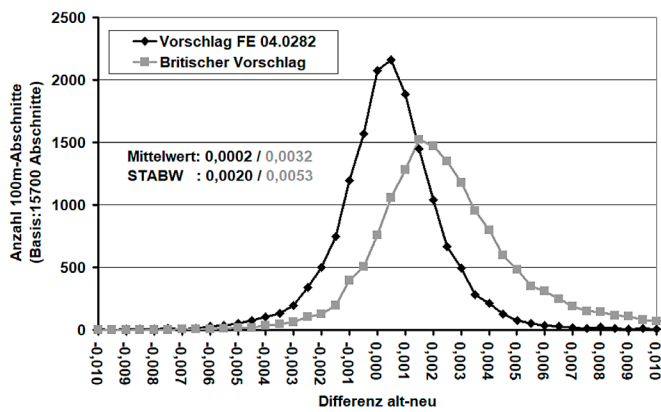
Der in Bild 5-11 an einem Beispiel dargestellte Zusammenhang erklärt, warum die bisherige Form der Ermittlung des Seitenkraftbeiwertes so gut mit der neuen Form unter Einbeziehung der Vertikalkraftmessung deckt. Wenn das Verhältnis aus Seitenkraft und Vertikalkraft tatsächlich nahezu unabhängig von der tatsächlichen Höhe der Vertikalkraft ist, sind auch Wertepaare zulässig, die stark von der statischen Normalkraft abweichende Vertikalkräfte aufweisen. Leider ist die Berechnung zu aufwändig, um sie im Rahmen dieses Projektes für eine Vielzahl von Strecken durchzuführen. Wenn er aber in identischer Weise auch für andere Messfahrzeuge gilt, zeigt dies letztendlich, dass auch das Quotientenverfahren als Berechnungsverfahren für den Seitenkraftbeiwert zulässig ist.

Für die Fragestellung, wie mit Messungen in Kurven umzugehen ist, wenn die Vertikalkraft nicht die statisch ermittelte Normalkraft erreicht, liefert dieses Diagramm die Antwort: Abweichungen der Vertikalkraft sind zulässig, allerdings ist der Seitenkraftmesswert dann auch entsprechend zu korrigieren.

## 5.6 Beurteilung der Modelle und Vergleich zu der bisherigen Berechnung des Seitenkraftbeiwertes

Zunächst ist für die Übernahme eines veränderten Berechnungsansatzes der Nachweis einer Kontinuität bezüglich des Messniveaus der 100m-Abschnitte zu führen. Hierzu wurden die verschiedenen Berechnungsverfahren anhand Daten der umfangreichen Erprobungsmessungen verglichen.

Grundlage des Bildes 5-12 sind 1570 Messkilometer mit der IWS-eigenen SKM (mit SKM-Mechanik) aus den Jahren 2020-2021. Die Berechnung des Seitenkraftbeiwertes erfolgte auf Basis von 1m-Daten der Seitenkraft und Vertikalkraft im Falle des Quotientenverfahrens und auf Basis des vereinfachten Verfahrens nach Kapitel 5.5 für das neu vorgeschlagene Berechnungsverfahren.



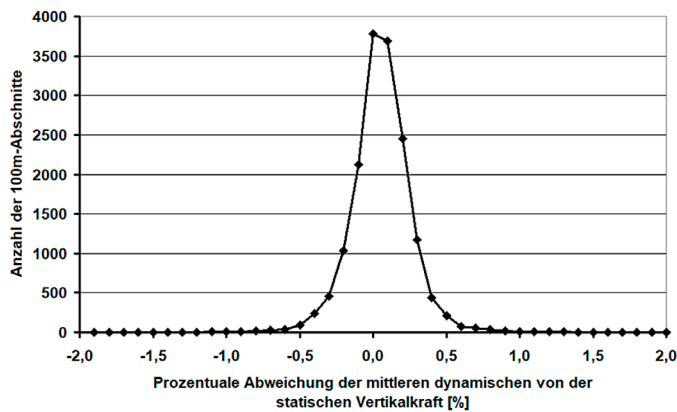
**Bild 5-12: Abweichung der 100m-Abschnittswerte nach Quotientenverfahren und neuem Berechnungsverfahren, bezogen auf die bisherige Ermittlung (Annahme einer statischen Vertikalkraft)**

Um die Datenbasis für die Berechnung der 100m-Abschnitte möglichst vergleichbar zu halten, wurden auch hier 1m-Daten durch lineare Interpolation wie in Bild 46 dargestellt erzeugt.

Die Abweichungen zu den nach dem bisherigen Verfahren ermittelten 100m-Abschnittsmittelwerten sind für beide Berechnungsverfahren sehr gering. Allerdings schneidet das Quotientenverfahren etwas schlechter ab und weist neben einer größeren Standardabweichung auch eine leichte systematische Verschiebung auf.

Die Ursache der Abweichungen zwischen neuer und alter Berechnung ist vor allem in der Differenz zwischen mittlerer dynamischer Vertikalkraft (100m-Abschnittsmittelwert) und statischer Vertikalkraft zu suchen (Bild 5-13). Die Abweichungen sind näherungsweise normalverteilt und liegen bei knapp unter  $\pm 0,5\%$  (95 % Quantil), die Standardabweichung liegt bei rund 0,2 %. Bezogen auf einen mittleren Seitenkraftbeiwert von etwa 0,4 ergäbe sich hieraus eine Standardabweichung von 0,002 des Seitenkraftbeiwertes, welche sehr genau dem Wert aus (Bild 5-12) entspricht.



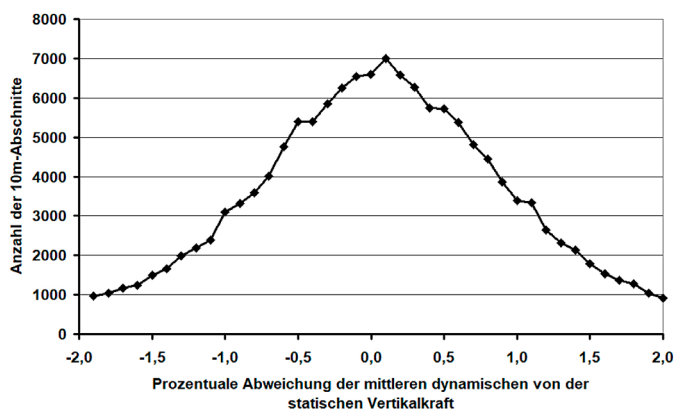


**Bild 5-13: Prozentuale Abweichung der mittleren dynamischen Vertikalkraft der 100m-Abschnittswerte von der statisch bestimmten Vertikalkraft**

Aus Bild 5-13 ist ablesbar, warum das alte Berechnungsverfahren unter Nutzung der statischen Vertikalkraft in der Vergangenheit zumindest für Abschnittsgrößen von 100m so erfolgreich war: Die Abweichungen zwischen dynamischer und statischer Vertikalkraft sind bei derartigen Abschnittsgrößen äußerst gering. Verglichen mit anderen Fehlerquellen des Messverfahrens (z. B. aus der Wahl der Messspur etc.) ist die Differenz zwischen statischer und mittlerer dynamischer Vertikalkraft so klein, dass hieraus kein relevanter Betrag zum Gesamtmessfehler des Messverfahrens ableitbar ist.

Ein Fehler dieser Größe ist auch an anderer Stelle zulässig, zum Beispiel bei der Überprüfung der Auflast ( $200 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$ ) oder  $\pm 0,005$  bei der Überprüfung des Seitenkraftbeiwertes. Für die Fehlerfortpflanzung ist es besonders günstig, wenn die einzelnen voneinander unabhängigen Fehlerquellen in derselben Größenordnung liegen. Dies ist zumindest bei 100m großen Bewertungsabschnitten der Fall.

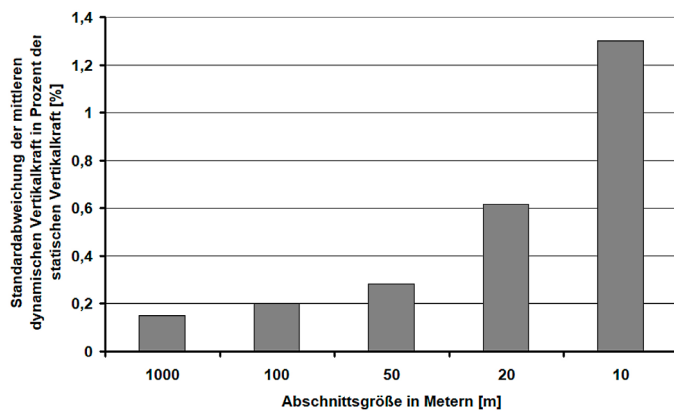
Für kleinere Abschnittsgrößen als 100m gilt dies jedoch nicht mehr. Beispielsweise streut die mittlere dynamische Vertikalkraft im 10m-Abschnitt wesentlich stärker (Bild 5-14).



**Bild 5-14: Prozentuale Abweichung der mittleren dynamischen Vertikalkraft der 10m-Abschnittswerte von der statisch bestimmten Vertikalkraft**

Mit einer prozentualen Abweichung von über 2 % (95 %-Quantil) wird die Differenz zwischen statischer und mittlerer dynamischer Vertikalkraft zur alles dominierenden Fehlerquelle. Diese zusätzliche Fehlerquelle hat dann auch Auswirkungen auf die Prüfgenauigkeit des gesamten Messverfahrens. Bezogen auf 10m-Messabschnitte müssten deshalb bei Beibehaltung der bisherigen Bestimmung des Seitenkraftbeiwertes eigene Vergleichs- und Wiederholstrebereiche ermittelt werden, die voraussichtlich eine deutlich höhere Messunsicherheit ausweisen würden.

In Bild 5-15 sind die Standardabweichungen der prozentualen Abweichung zwischen abschnittsbezogen gemittelter dynamischer und statischer Vertikalkraft für unterschiedliche Abschnittsgrößen dargestellt.



**Bild 5-15: Standardabweichung der Häufigkeitsverteilungen der prozentualen Abweichung zwischen abschnittsbezogener mittlerer dynamischer Vertikalkraft und statischer Vertikalkraft für unterschiedliche Abschnittsgrößen**

Bei Abschnittsgrößen unter 50m steigt die Streubreite der Häufigkeitsverteilung schnell an.

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ab Abschnittsgrößen von 20m oder weniger die Präzision des Messverfahrens von dem neuen Ansatz profitieren wird. Sofern durch den kleineren Messabschnitt die anderen Fehlerquellen (z. B. aus der Abstandshaltung) nicht signifikant zunehmen, könnten mit dem neuen Berechnungsverfahren auch für kurze Messabschnitte vergleichbare Messpräzisionen erreicht werden, wie sie von 100m-Abschnitten bekannt sind. Ob dies tatsächlich der Fall ist, kann aber letztlich erst durch einen entsprechenden Ringversuch beantwortet werden.

Die mittlere dynamische Vertikalkraft nähert sich mit steigender Abschnittsgröße immer stärker der statischen Vertikalkraft an.

1000m-Mittelwerte streuen nochmals deutlich weniger als 100m-Mittelwerte der Vertikalkraft. Dies legt nahe, bei dem neuen vereinfachten Verfahren auf den statisch ermittelten AD-Wert der Vertikalkraft vollständig zu verzichten und stattdessen den Mittelwert der dynamischen Vertikalkraft (bzw. dessen mittleren AD-Wert) der jeweiligen Messung zu verwenden.

Dies hätte erhebliche Vorteile, falls sich Messverstärker oder Vertikalkraftmessdose hinsichtlich eines Offsets oder einer Verstärkung im längeren Betrieb z. B. aufgrund von Lastspitzen verändern sollten. In diesem Falle würde sich der AD-Wert der statischen Vertikalkraft ebenfalls verändern und müsste neu ermittelt werden, damit es zu keinem Messfehler aufgrund der Dejustierung der Vertikalkraftmessung kommt.

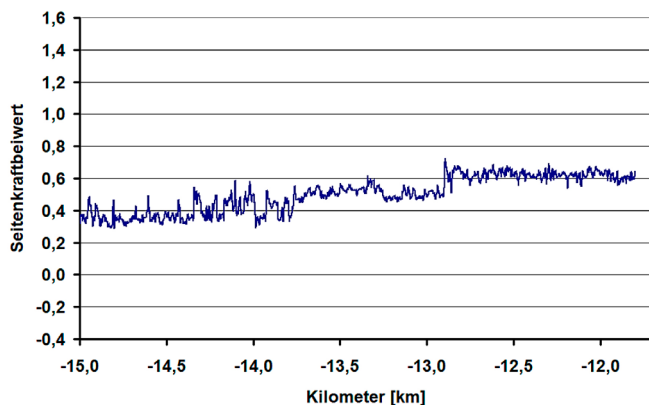
Wird dagegen statt des statisch ermittelten AD-Wertes der mittlere AD-Wert der Messung verwendet, würde hierdurch die Dejustierung quasi automatisch kompensiert.

Da 1000m-Abschnitte hinsichtlich der mittleren Vertikalkraft deutlich weniger streuen als 100m-Abschnitte, wäre gegenüber dem bisherigen Verfahren selbst bei dieser weiteren Vereinfachung ein Zugewinn an Messpräzision zu erwarten.

Beim britischen Auswerteverfahren schlägt dagegen jede Ungenauigkeit bei der Vertikalkraftermittlung voll auf das Messergebnis durch. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die hier vorgeschlagene Vorgehensweise nicht nur präziser, sondern auch deutlich störungsempfindlicher ist.

Es wird deshalb vorgeschlagen, während einer Übergangsfrist zunächst alte und neue Berechnung parallel laufen zu lassen. Wenn sich das neue Verfahren hierbei in der Praxis bewährt, sollte aber zeitnah vollständig umgestellt werden.

Abschließend wurde die Messung aus Bild 1-1 erneut ausgewertet, diesmal mit dem neuen Berechnungsverfahren. Für die bessere Vergleichbarkeit wurde die Achsenskalierung in Bild 5-16 gegenüber Bild 1-1 beibehalten.



**Bild 5-16: Messung aus Bild 1-1, ausgewertet mit dem neuen Berechnungsverfahren für den Seitenkraftbeiwert**

Trotz hoher 1m-Auflösung ist jetzt der Griffigkeitsverlauf genau zu erkennen. Die zahlreichen Flickstellen auf der Messstrecke sind im Verlauf gut auszumachen. Sie weisen in der Regel eine höhere Griffigkeit als die alte Fahrbahndecke auf.

Anders als in Bild 1-1 ist das Messergebnis jetzt jedoch nicht mehr durch das Messverfahren verfälscht. Prinzipiell ist damit jeder einzelne 1m-Messwert gültig, sodass auf Mittelwertbildung aufgrund der Dynamik des Messverfahrens verzichtet werden kann.

Abschließend ist festzustellen, dass aufgrund der im 1m-Raster angegebenen neuen Seitenkraftbeiwerte die Korrekturfunktionen der TP Griff-StB (SKM) weiterhin unverändert angewendet werden können.

## 6 Erprobung in weiteren SKM-Fahrzeugen

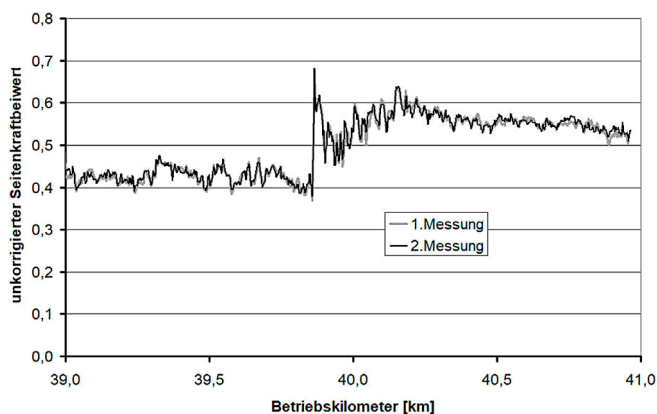
Die IWS-eigenen SKM-Messfahrzeuge sind in der Lage, Seiten- und Vertikalkräfte sowohl im Weg- als auch im Zeitbereich aufzuzeichnen. Bei Datenaufzeichnung im Wegbereich sind die Filter der jeweiligen Messgeschwindigkeit anzupassen, was neben einem erhöhten Aufwand auch eine mögliche Fehlerquelle bei der Datenaufbereitung darstellt. Zudem ist die nachträgliche Erweiterung bestehender Programmstrukturen schwierig. Bei einem der Fahrzeuge für die Erprobung ist die Gerätetechnik so veraltet, dass eine Protokollierung im 10 cm-Raster nicht möglich gewesen wäre.

Aus diesen Gründen wurden die beiden externen Messfahrzeuge ausschließlich mit einer Zeit getakteten Datenaufzeichnung ausgestattet, die sich vergleichsweise leicht installieren ließ. Bedingt durch die hohe Datendichte von 4,5 kHz war auch kein besonderer Rechenaufwand für die Ermittlung der gültigen Messwertpaare notwendig. Für die angestrebte Genauigkeit reichte es aus, jeweils den Datensatz nach dem Erreichen des Sollwertes des Vertikalkraft-AD-Wandlers zu verwenden.

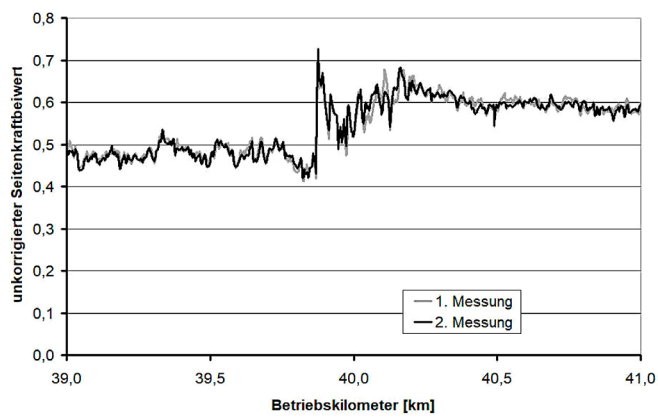
Da aber die Filterung aufgrund der geforderten Phasenneutralität nur nach jeder Messung durchgeführt werden konnte, mussten sämtliche Messwerte gespeichert werden, sodass zusätzlich zu den normalen Messdaten ein weiteres größeres Datenfile von etwas über 11 Mbyte/Messkilometer anzulegen war. Die Datenspeicherung erfolgte in einem bedarfsgerechten reduzierten XML-Format, um hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten zu gewährleisten.

Die Vergleichsmessungen auf den Zulassungsstrecken der BAST konnten nicht zeitgleich durchgeführt werden, aus diesem Grund und aufgrund der Vielzahl der Messkurven ist eine gemeinsame Darstellung der Messergebnisse in einem Diagramm nicht sinnvoll. Um dennoch visuell Vergleiche vornehmen zu können, wurden die Messstrecken in Abschnitte von jeweils 200m unterteilt. Pro Messfahrzeug wurde ein eigenes Diagramm angelegt und die vier zugehörigen Diagramme auf einer Seite zusammengefasst. (siehe Anhang).

Um einen ersten Eindruck von dem hohen Detaillierungsgrad der Messungen und der hervorragenden Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit zu erhalten, sind in Bild 6-1 und Bild 6-2 die Doppelmessungen für zwei der Messsysteme auf der A4 (km39,0-41,0) dargestellt.



**Bild 6-1: Doppelmessung des SKM-Messfahrzeugs der BAST auf der A4, km 39,0-41,0**



**Bild 6-2:** Doppelmessung eines externen Systembetreibers auf der A4, km 39,0-41,0. Die Höhenverschiebung gegenüber Bild 6-1 ist eine Folge des unterschiedlichen Messzeitpunktes und der fehlenden Messwertkorrekturen

## 7 Vorschläge für das Regelwerk

Aufgrund der verschiedenen noch ungeklärten Fragen bezüglich der Auswirkung von Laständerungen auf die Größe der Kontaktfläche zur Fahrbahn, der Einflüsse auf Oberflächentemperatur und Gummihärte des SKM-Messreifens wäre eine Umstellung der Reibbeiwertermittlung von der bisherigen statischen Vertikalkraftermittlung zu einer dynamischen Erfassung der Vertikalkraft und deren Einrechnung in den Seitenkraftbeiwert noch verfrüht.

Dies gilt auch deshalb, weil eine ausreichend genaue Kalibrierung der Vertikalkraft besondere Anforderungen stellt, für die die Ausstattung erst noch entwickelt werden muss.

Die vorgeschlagene Vorgehensweise, mittels Vertikalkraftmessung zu prüfen, wann die statische Normalkraft in der dynamischen Messung erreicht ist und hieraus ein gültiges Messwertpaar für die Berechnung des Seitenkraftbeiwertes zu generieren, räumt dagegen mit der bisherigen Unzulänglichkeit in der Technischen Prüfvorschrift auf, wonach erst durch Langzeitmittelung beider dynamischen Kräfte ein der statischen Normalkraft entsprechende mittlere Vertikalkraft vermutet werden darf, sodass jetzt eine Quotientenbildung aus beiden gemittelten Kräften zulässig ist. Auf der Maßstabsebene der 1m-Werte waren hierfür die formalen Voraussetzungen, dass beide Kräfte in einem engen physikalischen Zusammenhang stehen müssen, bislang nur unzureichend erfüllt.

Durch das Herausgreifen von gültigen Messwertpaaren, die diese Voraussetzung erfüllen, wird die Umsetzung der TP Griff-StB (SKM) in diesem bislang unbefriedigenden Punkt entscheidend präzisiert. Wie die Vergleichsmessungen von vier Fahrzeugen zeigen, wird damit eine hohe Vergleichbarkeit der Prüfergebnisse auch für kleine Messabschnitte erreicht.

Die einheitliche Tiefpassfilterung der Kraftmessdaten zur Eliminierung von Schwingungen höherer Ordnung schafft für die Auswertungsqualität die notwendigen Voraussetzungen. Ebenfalls zwingend muss gewährleistet sein, dass zwischen Vertikalkraft und Seitenkraft jegliche Phasenverschiebung möglichst vollständig zu eliminieren ist.

Im Interesse einer vereinfachten Handhabung der Datenfilterung ist die Möglichkeit zu schaffen, alternativ zur äquidistanten Datensatzspeicherung auch Daten in festem Zeittakt TP-konform speichern zu können. Aufgrund der Notwendigkeit, die dort geforderten 1m-Werte angeben zu können, muss die Datenspeicherung mindestens im 200Hz-Takt erfolgen, sodass auch bei hohen Messgeschwindigkeiten annähernd 10 Zeit getaktete Messwerte jedem 1m-Wert zugrunde liegen.

Zur Vermeidung von Abtastfehlern bei der Datenerfassung sind analoge Vorfilter sowohl bei der Seitenkrafterfassung wie auch bei der Vertikalkraftmessung vorzuschreiben, die an die gewählte Abtastrate angepasst sind.

## 8 Weiterer Forschungsbedarf

Derzeit ist keine Technik erprobt, mit der Phasenverschiebungen zwischen Vertikalkraft und Seitenkraft am Fahrzeug genauer als auf 10 cm bzw. ca. 5 Millisekunden gemessen und nachjustiert werden können.

Daher muss zurzeit noch zwischen zwei aufeinander folgenden Phasendurchgängen bei Vertikalkraft und Seitenkraft gemittelt werden.

Wenn es gelingt, die Seitenkräfte in beiden Phasendurchgängen auf annähernd gleiches Niveau zu heben, könnte auf diese Mittelung verzichtet werden. Hierdurch würde sich die Flankensteilheit bei Schwankungen der Griffigkeit nahezu verdoppeln.

Derzeit ist die Filterung der Daten so bemessen, dass periodische Schwingungen aus einer Unwucht oder ungleichmäßigen Montage des Messreifens auf der Felge weitgehend unterdrückt werden. Dies geht zu Lasten der Auflösung längs der Messrichtung. Wenn Griffigkeit noch detaillierter erfasst werden soll als hier vorgestellt, wären Maßnahmen zu entwickeln, um auch bei der Montage der Messreifen Unwucht oder Exzentrizität entgegen wirken zu können.

# Literatur

[DO, 2008]

DO, M.-T, ROE, P.G.: TYROSAFE Report D4: Report on state-of-the art test methods, 2008

[FEHRL, 2006]

Hermes Final Report, FEHRL Berichte 2006/01

[FGSV, 2007]

TP Griff-StB (SKM) - Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau, Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM) Ausgabe 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln

[ISO, 2019]

ISO 13473-1:2019: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe, ISO – International Organization for Standardization

[ROE, 2005]

ROE, P.G., SINHAL, R.: Recent Developments to the SCRIM Measurement Technique in the UK, International Surface Friction Conference, Christchurch, New Zealand 2005

[ROE, 2016]

ROE, P.G., CAUDWELL, L.: Skid resistance policy in the UK – where did it come from and where is it going?, SaferRoads Conference, 2016

[SCHMIDT, 2009]

SCHMIDT, J.: Erfassung von jahreszeitlichen Griffigkeitsschwankungen bei Messungen mit dem SKM-Messverfahren, FE 08.177 /2003/GRB, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009

[WEHNER, 1979]

WEHNER, B. SIEDECK, P. SCHULZE, K.-H.: Handbuch des Straßenbaus, Band 1: Grundlagen und Entwurf, Springer-Verlag 1979



# Bilder

Bild 1-1: Seitenkraftmessdaten mit hoher lokaler Auflösung (0,1m-Daten).....	15
Bild 2-1: Vertikalkraftmessung der SCRIM [DO, 2008].....	17
Bild 2-2: Einbau der Vertikalkraftmessdose bei dem SKM-Messfahrzeug mit SCRIM-Messmechanik der IWS Messtechnik GmbH .....	19
Bild 3-1: Vertikalkraftmessung an der SKM-Messmechanik .....	20
Bild 3-2: Modellannahme auf Basis der britischen Kalibrierung.....	20
Bild 3-3: Erster Prototyp für Systemtests an einer IMU mit Bewegungs-Frequenzen bis ca. 30 Hz .....	23
Bild 4-1: SKM-Messmechanik (IWS-SKM), Kraftmessdose (blau) einseitig am Schlitten befestigt .....	24
Bild 4-2: SCRIM-Messtechnik (WDM), Kraftmessdose (blau) einseitig an der Radschwinge befestigt.....	24
Bild 4-3: SKM-Messmechanik (IWS), Beispielmessung von Seitenkraft und Vertikal- kraft (0,1m Auflösung/ ungefiltert) .....	25
Bild 4-4: SCRIM-Messmechanik (WDM), Beispielmessung von Seitenkraft und Vertikalkraft auf derselben Messstrecke wie in Bild 9 (0,1m Auflösung/ ungefiltert).....	25
Bild 4-5: SKM-Messmechanik (IWS-SKM), Fourieranalyse mit Markierung der rele- vanten Frequenzen .....	25
Bild 4-6: SKM-Messmechanik (IWS-SKM), Fourieranalyse des Quotienten aus Seitenkraft und Vertikalkraft.....	26
Bild 4-7: SKM-Messmechanik (IWS-SKM), Fourieranalyse des Quotienten aus Seitenkraft und Vertikalkraft um 0,1m verschobener Vertikalkraft .....	26
Bild 4-8: SCRIM-Messmechanik (WDM), Fourieranalyse von Seitenkraft und Verti- kalkraft.....	27
Bild 4-9: SCRIM-Messmechanik (WDM), Fourieranalyse des Quotienten aus Seitenkraft und um 0,1m verschobener Vertikalkraft.....	27
Bild 4-10: SKM-Messmechanik auf Walzen-Prüfstand .....	30
Bild 4-11: Resonanzschwingung des Schlittens in Abhängigkeit der Anregungsfre- quenz, hier skaliert als resultierende Wellenlänge bei 80 km/h .....	31
Bild 4-12: Wellenlängenspektrum der Vertikalkraft bei einer Anregungsfrequenz von 3,49 Hz .....	31
Bild 4-13: Wellenlängenspektrum der Seitenkraft bei einer Anregungsfrequenz von 3,49 Hz zu Messkurve aus Bild 4-12 .....	32
Bild 4-14: Anbau des Gyrosensors an der Rückseite der Radachse .....	32
Bild 4-15: Wellenlängenspektrum des Gyrosensor-Signals bei einer Anregungsfre- quenz von 3,49 Hz .....	33

Bild 4-16: Federweg eines unbenutzten Reifens (DOT 2918) auf ebener Unterlage und auf der Prüfstandwalze.....	33
Bild 4-17: Federkonstante eines unbenutzten Reifens (DOT 4517) auf ebener Unterlage und einem aufgefahre­nen Reifen gleicher DOT-Nummer.....	34
Bild 4-18: Federeigenschaften von unbenutzten Reifen unterschiedlichen Alters im Vergleich.....	34
Bild 4-19: Eigenfrequenz-Bestimmung an einer SKM-Messmechanik mit einem Messreifen (Innendruck: 5 bar).....	34
Bild 4-20: Federeigenschaften der Mechanik, gemessen über Vertikalverschiebung des Schlittens, bei Austausch des Stoßdämpfers gegen ein starres Element (ohne Reifen).....	35
Bild 4-21: Federeigenschaften der Mechanik mit neuem Stoßdämpfer (ohne Reifen).....	35
Bild 4-22: Federeigenschaften der Mechanik, Vergleich zwischen warmem und kaltem neuem Stoßdämpfer (ohne Reifen).....	36
Bild 4-23: Federeigenschaften der Mechanik, Vergleich zwischen altem und neuem Stoßdämpfer (ohne Reifen).....	36
Bild 4-24: Resonanzschwingung des Schlittens in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz bei starrem Dämpfer, hier skaliert als resultierende Wellenlänge bei 80 km/h, Maximum der Schwingung hier bei 6,05 m.....	36
Bild 4-25: Messung mit auf den Reifen aufgetragenem Schmirgelleinen.....	37
Bild 4-26: Messung von 3 Messreifenumdrehungen und dem „Fingerprint“ des Messreifens bezüglich der Griffigkeit.....	37
Bild 4-27: Messfahrzeug mit SKM-Messmechanik auf dem Walzenprüfstand.....	39
Bild 4-28: Simulierte SKM-Messfahrt mit 34 Messreifenumdrehungen und Schwebung aufgrund leichter Differenzen zwischen Eigenfrequenz und Anregungsfrequenz.....	39
Bild 4-29: Wellenlängenspektrum der Seitenkraft des SKM-Messfahrzeuges auf dem Rollenprüfstand.....	40
Bild 4-30: Messfahrzeug mit britischer SCRIM-Messmechanik auf dem Walzenprüfstand.....	40
Bild 4-31: Wellenlängenspektrum der Seitenkraft des Messfahrzeuges mit SCRIM-Messmechanik auf dem Rollenprüfstand.....	41
Bild 5-1: Filterkennlinien des digitalen phasenneutralen Butterworth-Filters 2., 4. und 6. Ordnung.....	44
Bild 5-2: Gemeinsamer Schnittpunkt (Eckfrequenz) der kaskadierten Butterworth-Filter 2., 4. und 6. Ordnung.....	45
Bild 5-3: Rechnerische Stufenantwort des vorgeschlagenen Filters bei 80 km/h Messgeschwindigkeit.....	46
Bild 5-4: Daten der Kraftmessensoren eines 100m-Abschnittes im ungefilterten Zustand.....	47

Bild 5-5: Daten der Kraftmesssensoren des 100m-Abschnittes aus Bild 5-4 nach Durchführung der Filterung.....	47
Bild 5-6: Einfluss geringer Phasenverschiebungen auf die Stabilität der Berechnung des Seitenkraftbeiwertes.....	48
Bild 5-7: Zusammenhang von Phasenverschiebung und Spanne des Seitenkraftbeiwertes für das in Bild 5-6 dargestellte Beispiel.....	48
Bild 5-8: Bestimmung des Messwertpaares aus Vertikalkraft und Seitenkraft durch lineare Interpolation der Vertikalkraft auf 1962N (Normalkraft der SKM) .....	51
Bild 5-9: Ermittlung der Reibbeiwerte zu jedem 1m-Abschnitt, hier für km 39,804.....	52
Bild 5-10: Beispiel für hohe auftretende Vertikalkräfte, hier von der A4 (ZbBz-Strecke der BAST).....	53
Bild 5-11: Prozentuale Abweichung der Seitenkraft als Funktion der prozentualen Abweichung der Vertikalkraft .....	54
Bild 5-12: Abweichung der 100m-Abschnittswerte nach Quotientenverfahren und neuem Berechnungsverfahren, bezogen auf die bisherige Ermittlung (Annahme einer statischen Vertikalkraft).....	55
Bild 5-13: Prozentuale Abweichung der mittleren dynamischen Vertikalkraft der 100m-Abschnittswerte von der statisch bestimmten Vertikalkraft .....	56
Bild 5-14: Prozentuale Abweichung der mittleren dynamischen Vertikalkraft der 10m-Abschnittswerte von der statisch bestimmten Vertikalkraft .....	56
Bild 5-15: Standardabweichung der Häufigkeitsverteilungen der prozentualen Abweichung zwischen abschnittsbezogener mittlerer dynamischer Vertikalkraft und statischer Vertikalkraft für unterschiedliche Abschnittsgrößen.....	57
Bild 5-16: Messung aus Bild 1-1, ausgewertet mit dem neuen Berechnungsverfahren für den Seitenkraftbeiwert.....	58
Bild 6-1: Doppelmessung des SKM-Messfahrzeugs der BAST auf der A4, km 39,0-41,0...	59
Bild 6-2: Doppelmessung eines externen Systembetreibers auf der A4, km 39,0-41,0. Die Höhenverschiebung gegenüber Bild 6-1 ist eine Folge des unterschiedlichen Messzeitpunktes und der fehlenden Messwertkorrekturen.....	60

# Schriftenreihe

## Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Unterreihe „Straßenwesen“

### 2023

#### **S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens**

Hülsbömer, Weßelborg, Gogolin, Mörchen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen**

Neumann, Liu, Blasl, Reinhardt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalteinlagen**

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen**

Berthold, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärmarmer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton**

Freudenstein, Bollin, Eger, Klein, Kränkel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 186: Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen**

Oeser, Schulze, Benninghoff, Renken

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 187: Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen**

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 188: Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörrnitz**

Kuhnsch

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 189: Optimierung der Zusammensetzung Offenporiger Asphalte zur Verbesserung des Nutzungsverhaltens**

Radenberg, Breddemann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 190: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an Bauweisen mit Betondecke der Belastungsklasse Bk100**

Ressel, Engel, Ferraro, Alber, Garrecht, Mielich, Wellner, Kamratowsky, Kraft

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 191: Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteilen**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher, Schindler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

#### **S 192: Analyse von Auswertungs- und Bewertungsverfahren für die Anwendung des Traffic-Speed-Deflectometers auf Asphaltbefestigungen**

Čičković, Bald, Middendorf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 193: Materialsteifigkeit des Straßenbetons im Verlauf des Ermüdungsprozesses**

Bolz, Wellner, Lindner, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 194: Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur**

**Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen**

Wellner, Sommer, Clauß, Spanier, Villaret, Tschernack, Villaret, Gebhardt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 195: Verfahren zur Bildung und Beschreibung zustandshomogener Abschnitte und repräsentativer Kennzahlen für das Erhaltungsmanagement**

Berthold, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 196: Eignung konventioneller Prüfverfahren für Recycling-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte im Erdbau**

Huber, Birle, Heyer, Demond

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 197: Lösungsstudie zur Umsetzung der ASR A5.2 im Kontext mit der Herstellung von Betonfahrbahndecken**

Tschernack, Gebhardt, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 198: Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundhafte Erneuerung auf dem duraBAST**

Alte-Teigeler, Britz, Kispert, Riwe, Tschernack, Villaret, Lüdiike

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 199: Identifizierung relevanter Klimaparameter und Bestimmung von Schwellenwerten zu gravitativen Massenbewegungen**

Steffen, Brendel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 200: Einfluss der Betonzusammensetzung von Straßenbetonen auf die Spaltzugfestigkeit unter Berücksichtigung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit**

Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

**S 201: Textilbewehrter Oberbeton als Basis für eine fugenlose Oberfläche von Betonfahrbahnen**

Breitenbücher, Neumann, Curbach, Baumgärtel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

## 2024

**S 202: Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren – Weiterentwicklung der SKM-Griffigkeitsmessung durch Berücksichtigung der gemessenen Vertikalkraft**

Jürgen Schmidt, Julius Schmidt, Johannes Schmidt, Müller

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.



ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-785-3  
<https://doi.org/10.60850/bericht-s202>

[www.bast.de](http://www.bast.de)