

Integrale Bewertung der Ebenheit

FA 4.248

Forschungsstelle: LEHMANN + PARTNER GmbH, Erfurt
 Bearbeiter: Ebersbach, D.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
 Abschluss: November 2015

1 Aufgabenstellung

Die Straße wird als räumliches Gebilde geplant und gebaut. Hinsichtlich der funktionalen Anforderungen an die Ebenheit erfolgt die Bewertung jedoch immer noch in zwei voneinander getrennten Dimensionen. Dies war in der Vergangenheit der Tatsache geschuldet, dass die Messtechnik ein dreidimensionales Abbild der Straßenoberfläche in der erforderlichen Messgenauigkeit und Messgeschwindigkeit nicht liefern konnte. Die Erfassung erfolgt nach dem derzeitigen Regelwerk getrennt in Längsebenheit und Querebenheit. Insbesondere die Längsebenheit wird nur durch ein einziges Profil repräsentiert. Mittlerweile ist die Messtechnik jedoch so weit fortgeschritten, dass die Straßenoberfläche mit einem schnellfahrenden Messsystem dreidimensional erfasst werden kann. Die aufgenommene Oberfläche kann so auf die Anregung durch Unebenheiten in Längsrichtung in verschiedenen Lagen des Querschnitts beurteilt werden. Dies ermöglicht zum einen eine Bewertung unabhängig von der Lage des erfassten Höhenlängsprofils, zum anderen aber auch die Anwendung von dreidimensionalen Fahrzeugmodellen (Anregung linkes und rechtes Rad). Eine dreidimensionale Erfassung der Oberfläche bietet damit die Chance zu einer integralen und an der wirklichen Form und Wirkung von Unebenheiten orientierten Bewertung. Im Rahmen dieses Projekts wurden die Erfassung und erste Ansätze zur Bewertung der Ebenheit in 3-D entwickelt.

2 Untersuchungsmethodik

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden zum einen die Möglichkeiten zur Erfassung der Ebenheit in 3-D und zum anderen die möglichen Bewertungen der Ebenheit in 3-D untersucht. Während im ersten Teil der Arbeit die generellen Möglichkeiten zur 3-D-Erfassung aufgezeigt wurden, erfolgte anschließend im zweiten Teil eine Bewertung der Qualität der erzeugten 3-D-Oberflächen. Dazu wurden die erzeugten Oberflächen geometrisch und anhand von Wirkgrößen gegenüber Referenzmessungen verglichen und bewertet.

2.1 Möglichkeiten zur Erfassung der Ebenheit in 3-D

Die Erfassung der Ebenheit erfolgt in Deutschland mithilfe standardisierter Aufnahmesysteme. Aus diesem Grund wurde in einem ersten Schritt untersucht, ob und wie sich die bereits vorhandene Erfassungstechnologie in den 3-D-Raum überführen lässt. Im Rahmen der Erfassung der Längsebenheit wird ein "wahres Höhenlängsprofil" aufgenommen. Dieses Profil ist trendbereinigt und gefiltert (in der Regel Wellenlängen zwischen 0,3 und 160 m). Ein Laser des Querprofils ist dabei immer mit dem Längsebenheitsmesssystem synchronisiert (Bild 1).

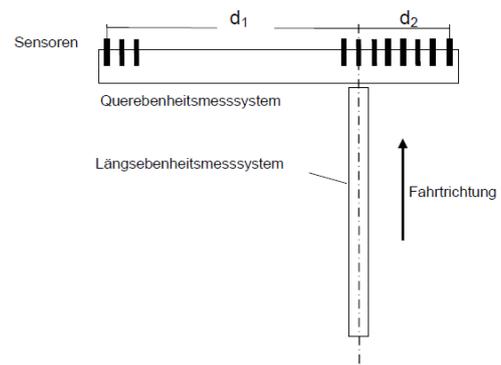


Bild 1: Synchronisierung des Höhenlängsprofils mit dem Querprofil [TP Eben – Berührungslose Messungen, 2009]

Unter gewissen Annahmen lassen sich beide Systeme zu einem räumlichen Modell zusammenfassen. Dieses Verfahren wurde im Rahmen dieser Arbeit als "quasi 3-D" bezeichnet. Eine Weiterentwicklung zur Bewertung der Fahrbahn stellt die Erfassung einer dreidimensionalen Oberfläche durch eine neuartige Erfassungsmethode mittels Rotationslaser dar. Bis vor wenigen Jahren waren solche Aufnahmen nur durch statische Systeme möglich. Mithilfe des kinematischen Messsystems S.T.I.E.R ist es möglich, Oberflächen auch durch eine Kombination aus Rotationslaser und hochpräzisem Positionierungs- und Orientierungssystem (POS) zu erzeugen. Diese Methode wurde als "3-D-Erfassung" bezeichnet.

2.2 Bewertung der Ebenheit in 3-D

Die Bewertungsgrößen unterscheiden sich generell in geometrische Größen und Wirkgrößen. Eine dreidimensionale Betrachtung ändert an diesen Grundlagen nichts. Entsprechend erfolgte eine analoge Betrachtung.

2.3 Geometrische Kenngrößen

Im zweidimensionalen Bereich erfolgt die Bewertung immer durch den Vergleich der Abweichung von Profilen unter einer Sollebene – 4-m-Lattensimulation bei der Längsebenheit beziehungsweise 2-m-Lattensimulation bei der Querebenheit. Im dreidimensionalen Bereich muss dann konsequenterweise diese Bezugsgerade durch eine Bezugsebene ersetzt werden. Dementsprechend muss der Abstand jedes einzelnen Punktes zu einer vorgegebenen Sollebene untersucht werden. Hierbei ist die Lage und Größe dieser Ebene zu untersuchen.

2.4 Wirkgrößen

Es müssen die Auswirkungen auf den Fahrer, das Ladegut und die Straße betrachtet werden. Als Indikatoren eignen sich die Beschleunigungen (am Fahrer und Ladegut) beziehungsweise die Schwankung der Radlast (dynamischer Anteil). Um diese Größen berechnen zu können, wurden neue dreidimensionale Modelle für den Pkw und den Lkw erarbeitet. Zur Bewertung der Schwingungsauswirkungen wurde im Rahmen dieses Pro-

jekts ein räumliches Schwingungsmodell eines Pkw erstellt, mit dessen Hilfe zum Beispiel die Fahrsicherheit (über die auftretenden Radlastschwankungen) und der Fahrkomfort der Straße (über die Schwingbeanspruchung des Fahrers auf dem Sitz) bewertet werden können (siehe Bild 2). Das Schwingungsmodell besteht aus sechs Massen (vier Radmassen, eine Aufbau- und eine Masse, die den Fahrer auf dem Sitz abbildet), die über Federn und Dämpfer miteinander verbunden sind.

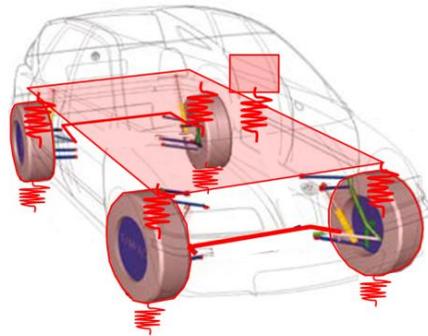


Bild 2: 3-D-Modell eines Pkw mit Fahrer

Ferner befindet sich zwischen den linken und rechten Rädern jeweils ein Stabilisator, der die Wankbewegungen begrenzt. Das Modell ist zunächst nur für die Abbildung der Vertikaldynamik ausgelegt. Es kann also alle Hubbewegungen, sowohl der Räder als auch des Fahrzeugaufbaus und des Fahrers auf dem Sitz, nachbilden. Ferner können Nick- und Wankbewegungen vollzogen werden.

Bild 3 zeigt das räumliche Schwingungsersatzsystem zur Beurteilung der Schwingungen eines Sattelauflegers inklusive der Antriebsachse der Zugmaschine. Von der Zugmaschine ist nur das hintere Teilsystem modelliert. Es besteht aus hinterer Rahmenhälfte, die über eine Torsionsfeder an den (gedachten) Vorderwagen angeschlossen ist und sowohl Wank- als auch Hubbewegungen ausführen kann, und einer zwillingsbereiften 11,5-Tonnen-Achse, die über Federn und Dämpfer sowie über einen Stabilisator mit dem Rahmen der Zugmaschine verbunden ist. Die Massen, Trägheitsmomente, Feder- und Dämpfer-spurweiten sowie geometrischen und schwingungstechnischen Daten entsprechen der Auslegung aktueller Nutzfahrzeuge (Mercedes Actros) und sind Herstellerangaben sowie [Bachmann et al. 2008] entnommen.

Der Sattelaufleger besitzt drei einzelbereifte Achsen, die über Federn und Dämpfer sowie jeweils einen Stabilisator an den Aufbau angeschlossen sind. Der Aufbau stützt sich am Zugfahrzeug-Rahmen über ein Kugelgelenk (Sattelkupplung) ab, das Rotationsbewegungen in allen drei Freiheitsgraden erlaubt und Kräfte in Hub-, Quer- und Längsrichtung übertragen kann. Beim Auflieger handelt es sich um einen Standardauflieger mit einem Achsabstand von 1,31 m, einem Radstand von 6,39 m und einer Gesamtlänge von 13,62 m. Die geometrischen und schwingungstechnischen Daten sind Herstellerangaben (BAW Bergische Achsen, Kögel) sowie [Bachmann et al. 2008] entnommen.

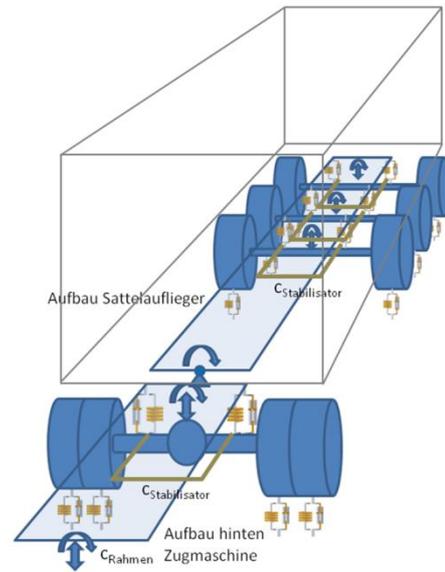


Bild 3: 3-D-Teilmodell eines Sattelzuges

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Geometrischer Vergleich der Höhenlängsprofile

Anhand von 13 Referenzstrecken (je 200 m Länge) erfolgte ein Vergleich zwischen einer mittels terrestrischen Laserscannern aufgenommenen Referenzmessung und einer schnellfahrenden 3-D-Erfassung mittels des Messfahrzeugs S.T.I.E.R mithilfe von Höhenlängsprofilen. Bei den Referenzdaten wurden Unstetigkeiten im Bereich der Zusammenführung von zwei Punktfolgen beobachtet. Diese beeinflussen das Ergebnis. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass die Höhenlängsprofile aus beiden Aufnahmeverfahren sehr gut miteinander vergleichbar sind. Es wurde eine Genauigkeit von besser als 1 cm ermittelt. Der Vorteil dieses Vergleichs liegt in der Beurteilung des Höhenlängsprofils über alle Wellenlängenbereiche. Es wurden Wellenlängen zwischen 2 cm und unendlich beurteilt. Um die Genauigkeit noch etwas besser abschätzen zu können, wurde ein Prüfkörper (Abmessungen bekannt) ebenfalls aufgenommen. Die Genauigkeit an diesem konnte mit 2 mm ermittelt werden.

Ein geometrischer Vergleich zwischen quasi-3-D-Daten und den Daten der Referenzmessung beziehungsweise quasi-3-D-Daten zu 3-D-Daten konnte nicht erfolgen, da die Referenzdaten beziehungsweise die 3-D-Daten dazu zu filtern gewesen wären, wodurch die zur Verfügung stehende Streckenlänge auf ein zu kurzes Maß gekürzt worden wäre. Anhand von drei längeren Strecken wurde ein Profilvergleich zwischen den aus dem klassischen HRM-Verfahren und den aus dem 3-D-Modell ermittelten Daten für einen Wellenlängenbereich zwischen 0,3 und 160 m durchgeführt. Bei diesem Vergleich wurde eine mittlere Abweichung von 1 mm ermittelt. Im Gesamtergebnis wird festgestellt, dass die ermittelten Höhenlängsprofile über alle Wellenlängenbereiche eine Höhengenaugkeit von besser als 1 cm besitzen. Für den zu bewertenden Bereich der Längsebene (0,3 bis 160 m) ist zwischen beiden Verfahren quasi kein Unterschied vorhanden.

3.2 Vergleich der Kennwerte der Längsebenheit

Neben der reinen geometrischen Form wurden die Kennwerte der Längsebenheit zum Vergleich berechnet. Aufgrund der Probleme bei der Aufnahme der Referenzmessung konnte der Vergleich nur zwischen quasi 3-D (HRM) und 3-D erfolgen. Dazu wurde das Höhenlängsprofil in der Lage des HRM-Balkens verwendet. Auch beim Vergleich der Kennwerte wurde eine sehr gute Übereinstimmung festgestellt.

3.3 Geometrischer Vergleich der Querprofile

Bei dem geometrischen Vergleich der Querprofile konnte festgestellt werden, dass die Profile aus der 3-D-Messung generell tiefere Spurrinntiefen aufweisen als die der quasi 3-D-Messung (ZEB). Die Ursache dabei liegt in der detaillierteren Abbildung der Straße durch den geringeren Punktabstand im Querprofil. Anhand der Referenzmessung mit dem stationären Laserscanner konnte diese Beobachtung bestätigt werden.

3.4 Vergleich der Kennwerte der Querprofile

Die Beobachtung des geometrischen Vergleichs der Querprofile konnte verifiziert werden. Es wurden die Spurrinntiefen rechts und links für alle Strecken berechnet. Dabei konnte festgestellt werden, dass das 3-D-Verfahren gegenüber der quasi-3-D-Messung generell tiefere Spurrinnen misst. Die im Rahmen der ZEB festgelegten Grenzwerte für die Zulassungsprüfung beziehungsweise Kontrollprüfung sind dennoch im Mittel eingehalten.

3.5 Vergleich der Wirkgrößen

Die entwickelten räumlichen Bewertungsmodelle wurden auf den verfügbaren Messstrecken angewendet. Als Fazit aus der modellhaften Anwendung der innerhalb des Projekts entwickelten räumlichen Bewertungsmodelle (Pkw und Lkw) auf den verfügbaren Messstrecken kann festgehalten werden, dass das 3-D-Straßenmodell und das quasi-3-D-Straßenmodell bei den Radlastschwankungen des 3-D-Fahrzeugmodells zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Unterschiede gibt es bei der Ladegut- und Sitzbeschleunigung. Das quasi-3-D-Straßenmodell liefert hier 30 % höhere Beschleunigungen als das 3-D-Straßenmodell. Die Unterschiede können durch die fehlerhafte Abbildung der Querneigung im quasi-3-D-Modell erklärt werden, die hier anscheinend einer höheren Variationsbreite unterliegt als real vorhanden. Dadurch werden zusätzliche Wank- und Nickbewegungen ausgelöst, die zu etwa 30 % höheren Beschleunigungen als real gegeben führen.

Was den Unterschied zwischen dem 3-D-Fahrzeugmodell und dem Einspurmodell (LWI) betrifft, ergeben beide Modelle bei den Kriterien Radlastschwankung und Ladegutbeschleunigung vergleichbare Ergebnisse. Bei dem Komfortkriterium (bewertete Sitzbeschleunigung) jedoch ermittelt das 3-D-Pkw-Modell nur etwa halb so hohe Auswirkungen wie der LWI. Grund dafür ist, dass beim LWI der Fahrer direkt über der Achse und beim 3-D-Pkw-Modell zwischen den Achsen und Radspuren sitzt. Dadurch erfährt er beim LWI die Anregung direkt, beim 3-D-Pkw-Modell aber nur anteilig entsprechend seiner Sitzposition

zwischen den Radspuren und Achsen (Basis: 3-D-Straßenmodell). Insgesamt kann aus den Untersuchungen festgehalten werden, dass die räumlichen Fahrzeugmodelle die Schwingungsauswirkungen auf Straße, Ladegut und Fahrer in realistischer und plausibler Weise wiedergeben und dass ein erster Vorschlag für die Bewertung von 3-D-Unebenheiten (Allgemeinunebenheit) erstellt worden ist.

4 Folgerungen für die Praxis

Es wurde auf den theoretischen Grundlagen der kinematischen Vermessungen (mobile mapping) ein System entwickelt, welches die Aufnahme der Oberfläche dreidimensional erlaubt (digitales Geländemodell). Anhand von Referenzmessungen konnte nachgewiesen werden, dass diese Aufnahme eine Genauigkeit im Millimeterbereich besitzt. Auf Basis dieser dreidimensionalen Oberflächenmodelle wurden die klassischen Kennwerte der Zustandserfassung in Längs- und Querrichtung ermittelt. Die im Rahmen der ZEB festgelegten Grenzwerte für die Zeitbefristete Betriebszulassungsprüfung beziehungsweise Kontrollprüfung wurden hierbei im Mittel eingehalten. Neben der klassischen Erfassung sind folgende Vorteile zu nennen:

- Höhenlängsprofile zur Bewertung können an beliebigen Stellen im Querschnitt erzeugt werden.
- Es können Wellenlängen auch weit oberhalb der 160 m sicher erfasst werden.
- Das Aufnahmeverfahren kann auch in engen Kurven eingesetzt werden.
- Die Anzahl der Punkte in Querrichtung ist deutlich höher, was eine stabilere Ermittlung der Spurrinntiefe ermöglicht.
- Es sind Erfassungsbreiten von 4,00 m möglich, ohne eine Fahrzeugbreite von 2,50 m zu überschreiten.
- Es können mehrere Höhenlängsprofile als Eingangsgrößen für ein 3-D-Fahrzeugmodell ermittelt werden.

Bei der direkten Aufnahme in 3-D sind jedoch folgende Nachteile vorhanden:

- An die Kalibrierung des Systems sind sehr hohe Anforderungen zu stellen. Diese müssen über eine gesamte Messperiode konstant sein und überwacht werden.
- Der Aufwand im Postprocessing (Verarbeitung der Daten im Büro nach der Aufnahme) ist bedeutend höher gegenüber der klassischen Aufnahme.
- An die Qualitätskontrolle vor Ort sind bedingt durch den Postprocessingaufwand hohe Anforderungen zu stellen.
- Ein standardisiertes Qualitätssicherungsverfahren muss noch erarbeitet werden.

Es konnte sowohl die Gleichwertigkeit bezüglich der geometrischen Abbildung als auch bezüglich der klassischen Kennwerte nachgewiesen werden. Es wurde für die Bewertung ein räumliches Pkw- und ein räumliches Lkw-Modell entwickelt und umgesetzt. Beide Modelle liefern plausible Ergebnisse und können

eingesetzt werden. Die entwickelten räumlichen Modelle wurden auf den Referenzstrecken angewendet. Es zeigte sich, dass vergleichbare Werte zu den klassischen Verfahren ermittelt wurden.

Die dreidimensionale Aufnahme und Auswertung bietet eine bedeutend bessere Abbildung der Realität. Der Aufwand bei der Erfassung und Auswertung ist jedoch höher. Insbesondere die Erfassung des Höhenlängsprofils in beliebiger Lage des Querschnitts bietet große Vorteile.

Um eine netzweite Erfassung in 3-D abzusichern, sollten in einem nächsten Schritt anhand eines repräsentativen Netzes die Auswirkungen der Bewertung auf Grundlage einer 3-D-Erfassung und einer klassischen Erfassung nach ZEB überprüft werden. Außerdem sind Prüfverfahren für die Qualitätssicherung derartiger 3-D-Erfassungen abzuleiten.

In der Zukunft sollten außerdem weitere räumliche Modelle zur Bewertung entwickelt werden. Zu nennen sind hier zum Beispiel Busse und Motorräder. Vor allem in Bussen sind die Beschleunigungen auf die Fahrgäste ein wesentliches Komfortkriterium. Bei Motorrädern stellt hingegen das Überfahren einer Spurrinne in der Kurve ein sicherheitsrelevantes Ereignis dar.

5 Literatur

- [TP Eben – Berührungslose Messungen, 2009] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen. Köln: FGSV Verlag, 2009
- [Bachmann et al., 2008] Bachmann, C., Gies, S., Wöhrmann, M., Schrüllkamp, T.: Realistische Lastannahmen für die Bemessung des Straßenoberbaues, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 998, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr