

# Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren für Längsebenheitsmesssysteme nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)

FA 4.213

Forschungsstelle: FKFS Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren, Stuttgart

Bearbeiter: Neubeck, J. / Wiesebrock, A.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juni 2013

## 1 Aufgabenstellung

Die messtechnische Erfassung der Längsebenheit ist Bestandteil der Zustandserfassung und -bewertung von Fahrbahnoberflächen der Bundesfernstraßen (ZEB). Die messtechnische Erfassung des Fahrbahnlängsprofils erfolgt mittels Mehrfachabtastung von berührungslos messenden Laserabstossensoren (Bild 1). Hierbei sind mehrere Lasersonden auf einem starren Balken angebracht, um durch trigonometrische Methoden die Fahrzeugaufbaubewegung zu kompensieren und das Straßenlängsprofil zu erfassen. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung von theoretischen, messtechnischen und algorithmischen Rahmenbedingungen zur Vereinheitlichung der Generierung des Höhenlängsprofils. Aufgabe ist daher auch die Entwicklung eines einheitlichen Auswertalgorithmus in Form von C-Code zur Bestimmung des Höhenlängsprofils aus Lasermessungen.



Bild 1: Messfahrzeug [1]

## 2 Untersuchungsmethodik

Das High Speed Road Monitoring (HRM)-Messverfahren basiert auf dem Prinzip der Mehrfachabtastung. Sei das Höhenlängsprofil bis zu einer Stelle  $x-\delta$  bekannt, so kann anhand von drei Lasermessungen auf einem starren Balken die Höhe der Straße an der noch unbekannt Stelle  $x$  bestimmt werden (Bild 2 und 3, [2]). Die Fortbewegung des Laserbalkens um den Weg  $\delta$  ermöglicht so die Erfassung des gesamten Höhenlängsprofils. Zur Steigerung der Genauigkeit wird das Prinzip der Mehrfachabtastung mit einer asymmetrischen und einer symmetrischen Laseranordnung angewandt. Die beiden berechne-

ten Höhenlängsprofile werden anschließend in einem Wiederherstellungsprozess mittels Steigungs- und Versatzkorrektur zusammengeführt.

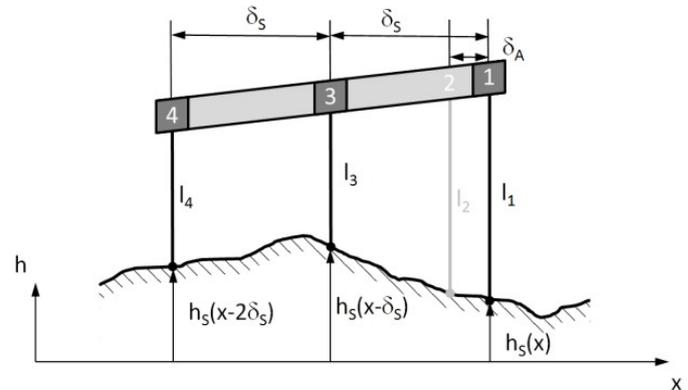


Bild 2: Mehrfachabtastung langer Wellenlängen (symmetrisches Profil)

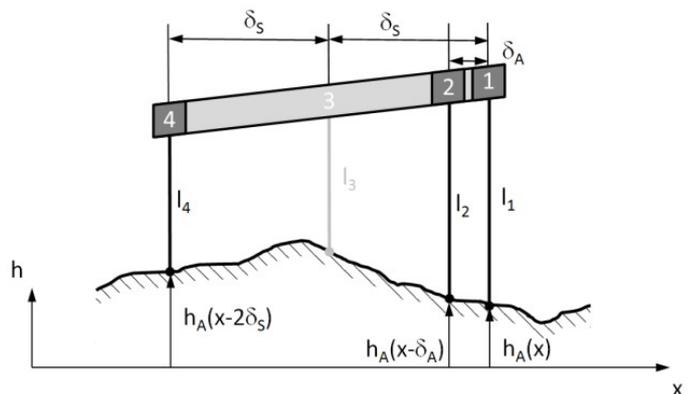


Bild 3: Mehrfachabtastung kurzer Wellenlängen (asymmetrisches Profil)

Das Verfahren zur Ermittlung des Höhenlängsprofils wurde ausgehend vom High Speed Profilometer nach LR 922 [2] des TRL für unterschiedliche Messbalkengeometrien (Parameter  $\delta_s$  und  $\delta_A$ ) innerhalb dieses Forschungsprojekts angepasst. Eine weitere Erweiterung des Verfahrens ermöglicht die vollständige Nutzung der Lasermesswerte, sodass die zurückgelegte Messstrecke exakt dem Weg des berechneten Höhenlängsprofils entspricht. Im Anschluss an den Wiederherstellungsprozess erfolgt eine Trendbereinigung mittels eines bidirektionalen 150 m-Butterworth-Hochpassfilters 2. Ordnung. Das Verfahren wurde abschließend in Form eines einheitlichen Algorithmus in C-Code umgesetzt und dokumentiert.

Bedingt durch Modellierungs-, Mess- und Kalibrierungsfehler kann das exakte Höhenlängsprofil mit diesem Verfahren allerdings nicht erfasst werden. Die wesentlichen Fehlerquellen sind im Folgenden aufgeführt:

- Zu Beginn der Messung ist das Höhenlängsprofil der hinteren Laserpositionen nicht bekannt und wird als ideal eben (Höhe null) angenommen. Diese Fehlinitialisierung führt aufgrund von Fehlerfortpflanzung zu einem Trend im Höhenlängsprofil.
- Die Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des Höhenmesspunkts linearisiert den Balkennickwinkel.
- Die Sollspur kann nicht exakt eingehalten werden.
- Wegmessung und Laserabstandsmessung unterliegen Mess- und Kalibrierungsfehlern.

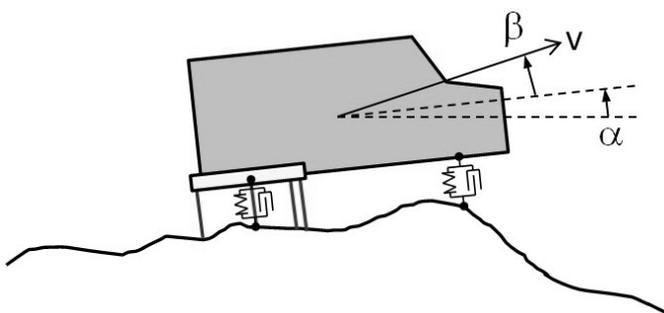
Durch geeignete Wahl einer Mittelung der Laserrohdaten sowie der Durchführung einer Trendbereinigung kann die Auswirkung dieser Fehlerquellen reduziert werden. Weiteren Einfluss auf die Qualität des Messverfahrens hat ebenfalls die Balkenlänge.

Innerhalb des Projekts wurden daher die oben aufgeführten Fehlerquellen im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf das Höhenlängsprofil und die Längsebenheitskennwerte mittels numerischer Sensitivitätsanalyse untersucht.

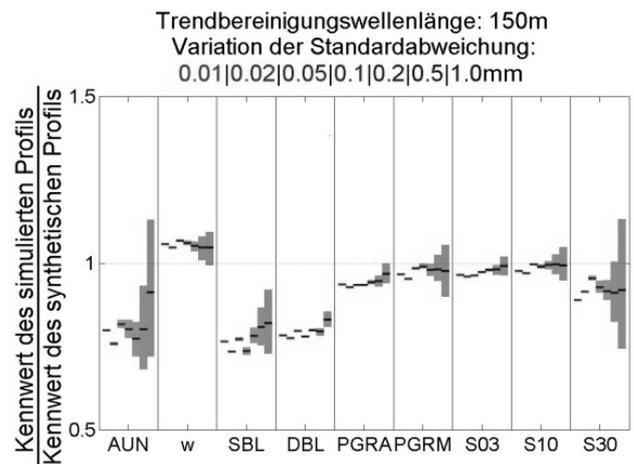
Hierzu wurden für die jeweils untersuchte Variante

- synthetische Straßenprofile nach [3], [4] und [5] anhand einer gewählten Unebenheit  $\phi_h$  und einer Welligkeit  $w$  erzeugt (Referenzprofil),
- ein virtuelles Messfahrzeug simuliert (zweidimensionales Fahrzeugmodell, Bild 4), das über das Referenzprofil fährt und eine fehlerfreie Lasermessung durchführt,
- messtechnische Einflussfaktoren (z. B. Einzelfehler) auf die ideale Lasermessung aufgebracht,
- das weiterentwickelte HRM-Verfahren angewandt (es resultiert hieraus das simulierte Profil)
- sowie das Referenzprofil mit dem simulierten Profil verglichen.

Bild 5 zeigt exemplarisch die Auswirkung von Messfehlern (fehlerhafte Laserabtastung) auf einzelne Längsebenheitskennwerte.



**Bild 4: 2-Achs-Fahrzeugmodell zur virtuellen Höhenlängsprofil-erzeugung und Sensitivitätsanalyse**



**Bild 5: Einfluss von Messfehlern auf Längsebenheitskennwerte, normiert auf den Referenzkennwert des idealen Profils**

Das Fahrzeugmodell überfährt die synthetisch generierte (oder real gemessene) Fahrbahn. Die Laserabstandsmessung wird zunächst ideal berechnet. Diesem Abstandswert wird ein normalverteilter Zufallsfehler überlagert, der im Wesentlichen durch folgende zwei Effekte erklärt wird:

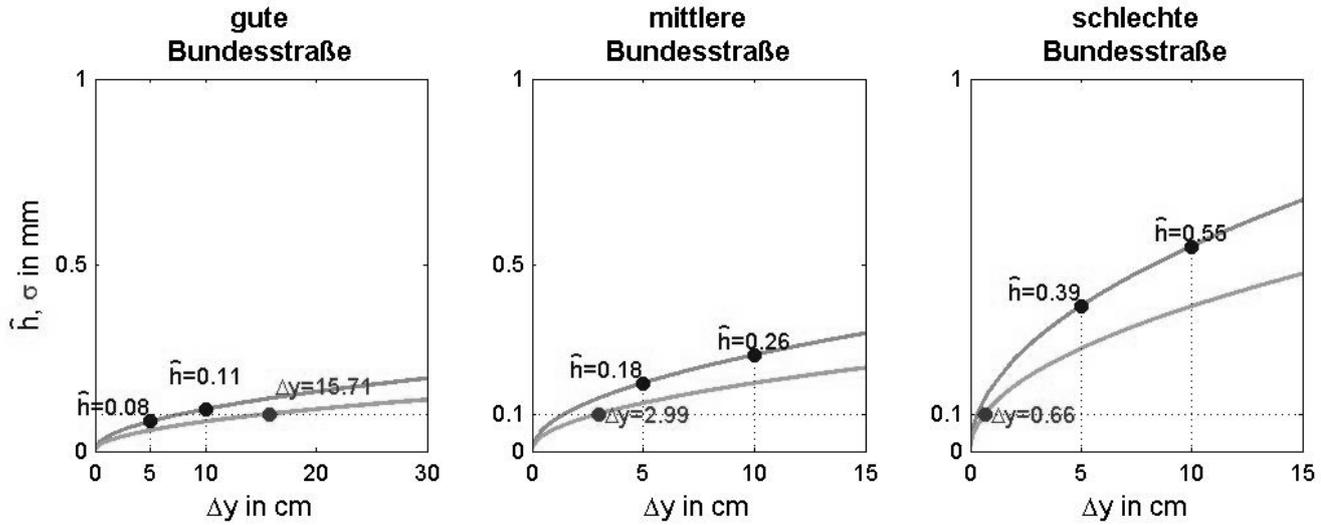
- Einzelfehler der Lasermessung, z. B. aufgrund von Messgenauigkeit, Sensorrauschen oder Linearitätsfehler
- Fehlerhafte Laserpositionierung, z. B. aufgrund von Querversatz oder Toleranz der Wegmessung

Die Messgenauigkeit und der Linearitätsfehler aktueller Messsysteme betragen etwa 0,1 mm. Die Auswirkungen eines Querversatzes auf diesen Zufallsfehler können anhand der Spektralen Leistungsdichte abgeschätzt werden. Bei einem definierten Querversatz  $\Delta y$  sind die Unebenheiten der Wellenlängen mit  $\lambda < \Delta y$  nahezu unkorreliert (Kohärenz der Längsprofile strebt gegen Null). Die gemittelten Amplituden  $\hat{h}$  (blau) (bzw. Standardabweichungen  $\sigma$  (rot)) dieser Unebenheiten sind in Bild 6 für verschiedene Straßengüten dargestellt. Beispielsweise beträgt auf einer mittleren Bundesstraße ab einer Querabweichung von 3 cm die Standardabweichung bereits 0,1 mm und entspricht somit der Messgenauigkeit bzw. dem Linearitätsfehler aktueller Messsysteme.

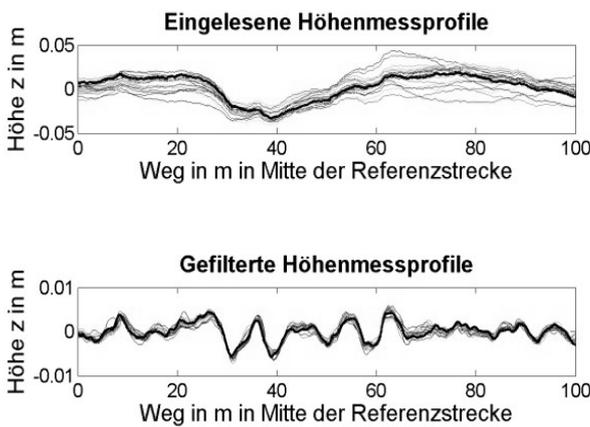
Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Spurtreue einen großen Einfluss auf das Messergebnis hat und somit mittels geeigneter Assistenzsysteme die Qualität der Messung gesteigert werden kann.

Einen weiteren Aspekt bei der Entwicklung eines einheitlichen Auswertalgorithmus und bei der Erarbeitung von Mindestanforderungen stellte der Vergleich existierender Messgeräte dar. Eine innerhalb des Projekts durchgeführte Umfrage konnte aufgrund der wenigen Antworten nur bedingt zur Lösung dieser Aufgabe dienen. Es wurde daher der Schwerpunkt auf die Auswertung existierender Höhenlängsprofile gelegt, die von unterschiedlichen Messsystemen ermittelt wurden. In diesem Zusammenhang konnte erfolgreich eine Methode umgesetzt werden, die anhand einer Kompensation unterschiedlicher Startpositionen der Höhenlängsprofile eine vergleichende

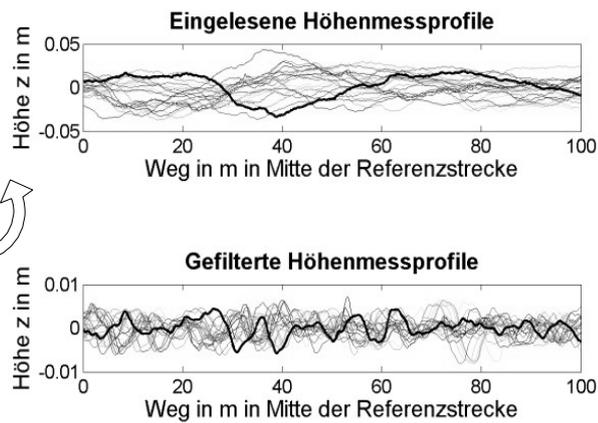
Darstellung der Profile, eine einheitliche Auswertung der Kennwerte sowie eine Beurteilung der Wegerfassung ermöglicht (Bild 7 und 8).



**Bild 6:** Aus einem Querversatz  $\Delta y$  resultierende Fehler für unterschiedliche Sträßengüten



**Bild 7:** Exemplarischer 100 m-Bereich von Höhenlängsprofilen der B 507 aus 25 verschiedenen Messfahrten mit 6 verschiedenen Messfahrzeugen, unten bandpassgefiltert, das Referenzprofil ist schwarz und fett hervorgehoben



**Bild 8:** Exemplarischer 100 m-Bereich von Höhenlängsprofilen der B 507 aus 25 verschiedenen Messfahrten mit 6 verschiedenen Messfahrzeugen nach Streckenpositionszuordnung, unten bandpassgefiltert, das Referenzprofil ist schwarz und fett hervorgehoben

Diese Methode eliminiert zunächst die im Höhenlängsprofil enthaltenen messsystemspezifischen Unebenheiten (Wellenlängen, die stark vom jeweils verwendeten Trendbereinigungsfilter oder vom Mittelungsverfahren abhängen) mittels Bandpassfilter im Bereich von 1 m bis 10 m und isoliert hierdurch die Grundcharakteristik der Messstrecke (Bild 7 oben nach Bild 7 unten), die dann auch bei unterschiedlichen Messsystemen eine sehr starke Ähnlichkeit aufweist. Ein Minimierungsverfahren ermöglicht im Anschluss an die Bandpassfilterung eine Offsetbestimmung der Wegstrecke (Bild 7 unten nach Bild 8 unten). Die vergleichende Darstellung anhand von Längsebenheitskennwerten berücksichtigt dann nur noch den Einfluss von Zufallsfehlern sowie des jeweilig umge-

setzten HRM-Verfahrens. So konnten grundlegende Eigenschaften der jeweiligen Trendbereinigung sowie Fehler in der Wegerfassung von bis zu 0,81 % zwischen den Messfahrzeugen identifiziert werden. Die Auswirkungen der fehlerhaften Wegerfassung sind für den eigentlichen HRM-Prozess vernachlässigbar klein. Die Berechnung der Kennwerte sowie die Zuordnung zum Netzknotensystem erfordert jedoch eine höhere Genauigkeit der Wegerfassung als zur Berechnung des Höhenlängsprofils notwendig ist (insbesondere bei Messstrecken mit einer Länge größer als 1 km). Es ist daher ausreichend, die Toleranz der Wegmessung mit drehendem Rad auf 1 % festzulegen. Aufgrund der höheren Anforderungen zur Kennwertmittlung und Netzknotenzuweisung wird weiterhin empfo-

len, die Genauigkeit der Wegmessung des mitdrehenden Rads durch Kombination mit einem GPS-System zu stützen.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung sind zum einen ein einheitlicher Auswertalgorithmus (C-Programmcode) zur Ermittlung des Höhenlängsprofils aus gemittelten Laserabstandswerten sowie zum anderen Empfehlungen an die Anforderungen an die Messsysteme, die im Folgenden aufgeführt sind:

- Die Laserabstandswerte dürfen einen Einzelfehler von 0,2 mm nicht übersteigen.
- Die Abtastfrequenz der Lasermessung ist so zu wählen, dass im Normalfall 10 Messwerte zur Mittelung über 10 cm zur Verfügung stehen. Liegen in einem 10 cm-Intervall ungültige Messwerte (Invalids) vor, sind diese bei der Mittelung nicht zu berücksichtigen.
- Sollten bei der Überführung/Mittelung ins 10 cm-Raster für einzelne 10 cm-Intervalle keine gültigen Laserwerte zur Mittelung zur Verfügung stehen, so sollte anstelle des Mittelwerts ein linearer interpolierter Wert aus den Mittelwerten der gültigen Nachbarintervalle bestimmt werden.
- Der zulässige Messbereich sollte 100 mm (besser 200 mm) betragen, wobei der erforderliche Messbereich maßgeblich vom Federungsverhalten des Messfahrzeugs beeinflusst wird.
- Damit die Anforderungen der Wegmessung an die Kennwertberechnung und die Netzknottenzuordnung erfüllt werden können, sollte die integrale Wegmessung anhand von GPS-Daten gestützt werden. Die integrale Wegmessung soll einen Fehler von 1 % nicht übersteigen.
- Die Einhaltung der Spur hat neben dem Einzelfehler der Lasermessung einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Messung, daher sollten geeignete Messeinrichtungen und Anzeigeinstrumente den Fahrer bei der Aufgabe der Spurhaltung unterstützen.

Der Auswertalgorithmus konnte erfolgreich für unterschiedliche Balkenlängen auf das 10 cm-Raster übertragen werden und ist somit auf allen für die ZTV ZEB-StB [6] relevanten Messsystemen einsetzbar. Weitere Anpassungen (z. B. Extrapolation der Steigungskorrektur zur Gewährleistung derselben Länge von Messfahrt und ermitteltem Höhenlängsprofil) erleichtern die Handhabung des HRM-Verfahrens. Der Algorithmus beinhaltet einen bidirektionalen 150 m-Butterworth-Hochpassfilter 2. Ordnung zur Trendbereinigung. Der (einzig) in der Berechnungsvorschrift des AUN-Kennwerts vorgeschriebene Vorfilter (der ebenfalls ein Trendbereinigungsfilter ist) sollte daher aus dieser Vorschrift entfernt werden, da die doppelte Anwendung eines Trendbereinigungsfilters den Kennwert zu stark verfälscht.

### 4 Folgerungen für die Praxis

Unterschiede im Höhenlängsprofil ergaben sich bei verschiedenen Messsystemen unter anderem aufgrund der freien Wahl des Trendbereinigungsfilters und dessen Grenzwellenlänge. Die Anwendung eines einheitlichen Algorithmus sollte demnach die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messsysteme steigern. Den Beleg hierfür können letztendlich nur Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Messsystemen liefern. Da ebenfalls die Startposition des Höhenlängsprofils wesentlichen Einfluss auf die Kennwertberechnung besitzt, sollten im Rahmen der "Zeitbefristeten Betriebszulassung" die ermittelten Höhenlängsprofile anhand eines Referenzprofils längs der Fahrtrichtung ausgerichtet werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten die Auswirkungen längs- und querdynamischer Fahrmanöver lediglich identifiziert werden. Eine versuchstechnische oder simulative Untersuchung dynamischer Fahrmanöver auf das Messverfahren sowie auf Messbereichsüberschreitungen der Lasersignale sollten in einem Folgeprojekt gesondert betrachtet werden. Ebenso ließen sich innerhalb des Forschungsprojekts noch keine eindeutigen Aussagen darüber treffen, wie lange ein Lasersignal ausfallen kann, ohne dass die Auswirkungen auf die ermittelten Kennwerte zu groß werden. Die Auswirkungen (Amplitude und Frequenzbereich) eines ungültigen Signals hängen unter anderem davon ab, welcher Laser ausgefallen ist, und betreffen dann auch unterschiedliche Längsebene-kennwerte. Zur Festlegung der maximalen Anzahl an ungültigen Lasersignalen ist es weiterhin erforderlich, den zulässigen Fehler des Höhenlängsprofils bzw. der einzelnen Kennwerte zu definieren. Es ist weiterhin zu überlegen, ob das HRM-Verfahren dahingehend erweitert werden kann, dass bei Ausfall eines Lasers aus den verbleibenden drei Lasersignalen ein gültiges Höhenlängsprofil ermittelt werden kann. Derartige Untersuchungen sollten ebenfalls in einem Folgeprojekt durchgeführt werden.

### 5 Literatur

- [1] Lehmann + Partner, <http://www.lehmann-partner.de/technologie/system-stier>
- [2] Still, Jordan: TRRL Laboratory Report 922, Evaluation of the TRRL High-Speed Profilometer, ISSN 0305-1293, 1980
- [3] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, zweite Auflage, Band B, Schwingungen, Springer Verlag, 1984
- [4] Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, vierte Auflage, Springer-Verlag, 2004
- [5] Song Jian, Jin Ruichen: Generation of Virtual Road Surfaces and Simulation of Nonlinear Vibration of Vehicles
- [6] ZTV ZEB-StB: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen, FGSV Verlag, Köln – FGSV 489, 2006