



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY

## **DIPLOMARBEIT**

MASTER'S THESIS

# **Aufnahmeverfahren und Bewertungsmethoden der Längsebenheit von Straßen**

**Methods for measuring and assessing road roughness data**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
am Institut für

**Straßenbau und Straßenerhaltung - E 233**

unter der Leitung von

**o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Johann LITZKA**

**Dipl.-Ing. Dr. techn. Alfred WENINGER-VYCUDIL**

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Bauingenieurwesen**

von

**Barbara KUNISCH**

E610 / 9826381

1230 Wien, Engelshofengasse 9

---

**Datum**

---

**Unterschrift**

## Vorwort

„Der liebe Gott bereitet seine Werke lange früher vor. Er geht dabei bedächtig, aber stets sicher vor.“

Hl. Pfarrer v. Ars

In diesem Sinne freue ich mich diese Arbeit als Abschluss meines Studiums fertig gestellt zu haben.

Ermöglicht haben mir dies Herr Professor Dr. Litzka und Herr Univ. Assistent Dr. Weninger-Vycudil von Seiten des Instituts für Straßenbau, sowie von der Arbeitsgruppe ARI, Frau DI Fruhmann und Herr DI Spielhofer.

Mein Dank gilt im Besonderen aber auch meinen Studienkollegen, die gemeinsamen Diskussionen und das Brüten über Rechenaufgaben sind für einen Erfolg unablässig.

# **Aufnahmeverfahren und Bewertungsmethoden der Längsebenheit von Straßen**

## **Kurzfassung**

Die Längsebenheit ist hinsichtlich einer sicherheitstechnischen und komfortbezogenen Beurteilung des Straßenzustands eine der wichtigsten Einflussgrößen. Unebenheiten werden einerseits direkt vom Nutzer als unangenehme Schwingungen wahrgenommen, können aber auch eine Verminderung des Kraftschlusses zwischen Fahrbahn und Reifen bewirken und somit die Lenkbarkeit des Fahrzeuges beeinträchtigen. Nicht explizit erkennbar sind die zusätzlichen Belastungen durch dynamische Lasten, die einerseits das Ladegut und andererseits die Straße an sich belasten.

In der vorliegenden Diplomarbeit werden auf der Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche verschiedene Möglichkeiten der Aufnahme der Ebenheit, als absolute Höhenkoten, geometrische Abweichung des Profils von einer idealen Vorgabe oder auch verknüpft mit der Wirkung auf Fahrer, Fahrzeug und Straße, angeführt.

In einem weiteren Schritt werden aufgenommene Daten auch bewertet, um ein Urteil über den Zustand der Straße abgeben zu können. Auch hier bieten sich eine Reihe von Möglichkeiten, wobei der Schwerpunkt der Betrachtung auf den in Österreich und im europäischen Umland verwendeten Methoden, sowie neueren Forschungsarbeiten in diesem Bereich liegt.

Den rechtlichen Rahmen im Bereich des Straßenbaus bilden Richtlinien und Normen, daher werden auch hier die für diesen Fachbereich zutreffenden Regelungen angegeben und die darin angeführten Methoden aufgelistet.

## **Methods for measuring and assessing road roughness**

### **Abstract**

Concerning safety and comfort issues on roads longitudinal evenness is one of the main focal points. Unevenness is noticed as discomfort by the user and can also cause a reduction of the force between tire and pavement, which has strong influence on the maneuverability. Additional forces on the loading and on the road, which cannot easily be detected by driving over appear and are related to the arising of additional dynamic loads.

This master's thesis presents various methods for measuring road roughness, based on a comprehensive literature research. On the one hand there is the possibility to measure the absolute height of specific points of the profile, or determine the relative deviation to an ideal profile. On the other hand the effects of the unevenness on the driver, the car and the road are assessed.

It is then necessary to interpret the roughness data, so to form an assessment about the condition of the road. To do that there are different methods, which are listed and explained in the following text. It has its focus on the techniques used in Austria, Germany, Switzerland and the USA and comprises also recent research works.

The legal settings for this topic are built by technical guidelines and standards, they are therefore especially mentioned for each specific method for which they are valid and listed in general at the ending.

**Inhaltsverzeichnis:**

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>METHODEN DER LÄNGSEBENHEITSMESSUNG</b>	<b>9</b>
2.1	Profilaufnahme anhand von geometrischen Zusammenhängen	9
2.1.1	Geodätisches Einmessen / Nivellement	9
2.1.2	Abweichung von einer Bezugsebene	10
2.1.3	Profildarstellung durch Aufnahme von Neigungsänderungen	13
2.2	Profilermittlung durch Wirkung der Straße auf das Messgerät	16
2.2.1	Aufnahme der Vertikalbewegungen	16
2.3	Ermittlung des wahren Profils	19
2.3.1	Beschleunigungsmessung	19
2.3.2	Kombinierte Beschleunigungs-Distanz-Messung	19
2.3.3	Höhenbestimmung über Lasersysteme (Mehrfachabtastung)	22
2.3.4	Richtlattensimulation	26
2.4	Klassifizierung der Aufnahmegeräte	26
<b>3</b>	<b>AKTUELLE BEWERTUNGSVERFAHREN</b>	<b>28</b>
3.1	Physikalische Grundlagen aus der Schwingungslehre	28
3.2	Anwendungsbereiche	30
3.3	Statistische Auswertung	31
3.3.1	Varianz und Standardabweichung der Unebenheitshöhen	31
3.3.2	Auswertung von Neigungsdaten	33
3.3.3	Spektrale Dichte der Unebenheiten (Power Spectral Density / PSD)	35
3.3.4	Allgemeines Unebenheitsmaß (AUN)	41
3.3.5	Wave Band Analysis (Wellenbandanalyse)	42
3.3.6	Wavelet Transformation	44
3.3.7	Das bewertete Längsprofil	46
3.4	Beurteilung der Wirkung	50
3.4.1	Wahrnehmungsstärke (Komfortziffer)	51
3.4.2	International Roughness Index (IRI)	53
3.4.3	Ride Number (RN)	59
3.4.4	Profil Index (PI)	60
3.4.5	Der Längsebenheitswirkindex (LWI)	61
<b>4</b>	<b>REGELWERKE UND NORMEN</b>	<b>65</b>
4.1	Österreich	65
4.2	Schweiz	66

4.3	Deutschland	67
4.4	USA	68
4.5	Internationale Normen	69
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG</b>	<b>81</b>

# 1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Die Längsebenheit findet in vielfältiger Weise im Bereich des Straßenbaus und der Straßenerhaltung Beachtung. Sie stellt eine relevante Einflussgröße im Bezug auf sicherheitstechnische und komfortbezogene Betrachtungen der Straße dar, hat aber auch Auswirkungen auf die Lebensdauer und Fragestellungen der Erhaltung.

Voranstellen möchte ich einen kurzen Überblick über unterschiedliche Definitionen von Ebenheit oder auch Unebenheit, wobei schon hier der Verweis auf die Bedeutung der Bewertung anklingt.

*Die Ebenheit ist eine volkswirtschaftlich und sicherheitsrelevante Eigenschaft der Straße, die ihre vollständige Bewertung allein vor dem Hintergrund ihrer Wirkung auf Fahrer, Fahrzeug und Fahrbahn erfahren kann [33].*

*The deviations of a pavement surface from a true planar surface with characteristic dimensions that affect vehicle dynamics, ride quality, dynamic loads, and drainage, for example, longitudinal profile, transverse profile, and cross slope [53].*

*Als Unebenheiten im Längsprofil sind Abweichungen der Ist-Oberfläche von der Form der projektierten oder aus Bestandsdaten definierten Soll-Oberfläche einer Schicht zu bezeichnen [7].*

*Roughness is the summary of variation in surface profile that induces vibrations to the traversing vehicles and is defined over a length of the road [1].*

Genauso wie diese Aussagen über die Längsebenheit divergieren, kann man auch die Erfassung und Beurteilung von verschiedenen Seiten angehen: Einerseits ist dies möglich durch die Betrachtung der geometrischen Beziehungen der vorhandenen Situation, andererseits durch die Verknüpfung mit der Wirkung auf das darüber fahrende Fahrzeug.

Ziel der Arbeit ist es, mit Hilfe einer Literaturrecherche einen umfassenden Überblick über die zur Zeit verwendeten Methoden, sowie die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Längsebenheitsmessung und Bewertung zu gewinnen, wobei der Stand der Technik in Österreich, Deutschland, Schweiz und den USA besondere Beachtung findet. Im Weiteren sollen die hier gewonnenen Erkenntnisse den Ausgangspunkt für die Erarbeitung eines spezifisch österreichischen Kennwertes zur Beurteilung der Längsebenheit bilden. Hierfür ist es notwendig, die Wirkungsmechanismen und Anwendungsgrenzen von Vorhandenem zu kennen, um eine etwaige Kombination und Erweiterung zu ermöglichen.

Die hierfür verwendete Literatur wird im Anhang übersichtlich dargestellt.

Längsunebenheiten sind jedem Autofahrer ein Begriff, sie verursachen Schwingungen (durch Wellen, Stufen,...), die zumeist als unangenehm empfunden werden und bei dauerhafter, starker Belastung sogar zu gesundheitlichen Schäden führen können.

Nicht so leicht zu erkennen ist ihr Einfluss auf die Fahrsicherheit. Durch die Unebenheiten wird das Fahrzeug zu Schwingungen angeregt und es entstehen zusätzliche dynamische Radlasten. Diese können im ungünstigen Fall negativ entgegen der statischen Radlast wirken. Es muss daher vermieden werden, dass es zu einer vollkommenen Aufhebung der statischen Radlast kommen kann, da dies einem Verlust des Kraftschlusses gleichkommt und in diesem Falle keine Führungskräfte vom Rad auf die Straße mehr übertragen werden können.

Für den Straßenbauer und den Straßenerhalter ist die zusätzliche Straßenbeanspruchung von besonderem Interesse, welche auch auf die zuvor erwähnten zusätzlichen dynamischen Radlasten zurückzuführen ist. Sie muss vom Straßenaufbau aufgenommen werden und hat somit Einfluss auf die Lebensdauer der Oberbaukonstruktion.

Im Weiteren ist die zusätzliche Ladegutbeanspruchung durch Unebenheit nicht zu vernachlässigen, welche durch Vertikalbeschleunigungen auf der Ladefläche entsteht.

Im Folgenden werden vorwiegend Methoden beleuchtet, die sich auch in der Anwendung durchgesetzt und daher zumeist auch schon Eingang in das Normenwerk gefunden haben.

## **2 METHODEN DER LÄNGSEBENHEITSMESSUNG**

Die Straßenoberfläche ist mit ihrer Längsausdehnung, der Breite und den verschiedenen Höhenkoten ein dreidimensionales Objekt. Zum Zeitpunkt der Herstellung ergibt sich durch ebenmäßiges Verbinden von Längs- und Querschnitten eindeutig das geforderte Profil, das sich jedoch in Folge von Nutzung und Witterungseinflüssen verändert. Diese Veränderungen gilt es aufzunehmen.

Die im Folgenden näher erläuterten Messgeräte greifen dieses Prinzip auf und messen entlang eines Schnittes (dieser ist beispielsweise in Deutschland als Mitte der rechten Rollspur festgelegt [2]). Dies wirft natürlich die Frage auf, ob hierdurch alle Schädigungen erfasst werden können, beziehungsweise wie groß der Nutzen einer flächendeckenden dreidimensionalen Erfassung wäre.

Die Aufnahme einer nicht genau festlegbaren Radspur zieht auch Probleme der Wiederholbarkeit nach sich, wobei diese durch die Routine der Messgerätenker reduzierbar sind. Für eine Betrachtung der Fahrzeugreaktion in Querrichtung ist es möglich, 2 parallele Messprofile (2 Reifenspuren) aufzunehmen.

Bei der Aufnahme der vorhandenen Situation können prinzipiell zwei Vorgangsweisen unterschieden werden. Einerseits mit der Zielsetzung, das Profil möglichst wirklichkeitsgetreu in seiner Höhe und Längserstreckung einzumessen, andererseits werden Messgeräte auf das Verhalten von Fahrzeugen auf der Straße abgestimmt und ausschließlich die Wirkungen der Straße auf das Gerät erfasst.

Methoden, die gänzlich von Testpersonen abhängig sind, wie z.B. eine visuelle Beurteilung oder auch eine Bewertung der Strecke auf der Basis von Testfahrten einer größeren Versuchspersonengruppe (sensitive Beurteilung, panel rating), werden in der vorliegenden Arbeit grundsätzlich nicht besprochen. Die Inhalte beziehen sich in erster Linie auf die messtechnische Erfassung der Längsebenheit.

### **2.1 Profilaufnahme anhand von geometrischen Zusammenhängen**

#### **2.1.1 Geodätisches Einmessen / Nivellement**

Ausgehend von einem Fixpunkt wird durch Feststellen des Höhenunterschiedes von einem zum nächsten Messpunkt mittels Nivelliergerät und geodätisches Anhängen die Strecke punktweise aufgenommen [3]. Die absolute Höhe des Nivelliergerätes ist für das Längsprofil nicht maßgebend, solange alle Punkte nacheinander eingemessen werden [4].

Durch den hohen Personalaufwand und die geringe Aufnahmegeschwindigkeit ist dieses Verfahren aber für den Einsatz auf langen oder unter Verkehr stehenden Strecken nicht

geeignet. Es hat jedoch im Zusammenhang mit der Messung von Referenzstrecken und der Überprüfung anderer Geräte eine wesentliche Bedeutung.

Dieses Verfahren ist beispielsweise in der amerikanischen Norm ASTM standard E1364 [53] festgelegt.

## 2.1.2 Abweichung von einer Bezugsebene

### 2.1.2.1 Richtlatte / Latte und Keil

Gemessen wird bei diesem Verfahren die maximale Muldentiefe (meist unter Zuhilfenahme eines Keils oder Zollstocks) unter einer frei aufgelegten Latte (2, 3 oder 4 m), dargestellt in Abbildung 2-1, wobei sowohl in der österreichischen Richtlinie (RVS 8S.04.11 für Asphaltstraßen und RVS 8S.06.32 für Betonstraßen [5]), als auch in der deutschen Prüfvorschrift [2] die 4 m Latte für die Messung vorgesehen ist. Die österreichischen Grenzwerte sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Asphaltdecken		Grenzwerte
	Tragdeckschicht	$\leq 6 \text{ mm} / 4 \text{ m}$
	Deckschicht	$\leq 4 \text{ mm} / 4 \text{ m}$
Betondecken		
	ohne Fertigereinsatz	$\leq 6 \text{ mm} / 4 \text{ m}$
	mit Fertigereinsatz	$\leq 4 \text{ mm} / 4 \text{ m}$

Tabelle 2-1: Abnahmegrenzwerte in der RVS [5].

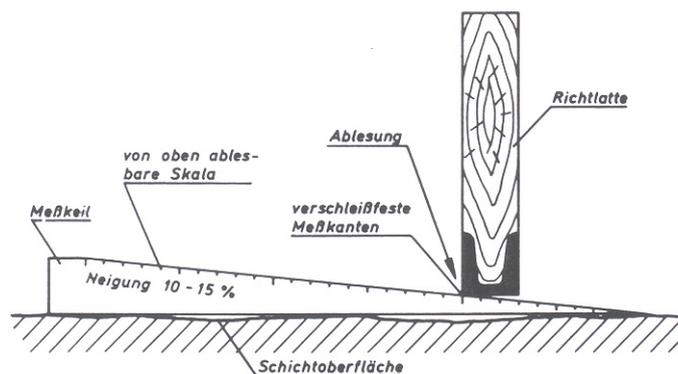


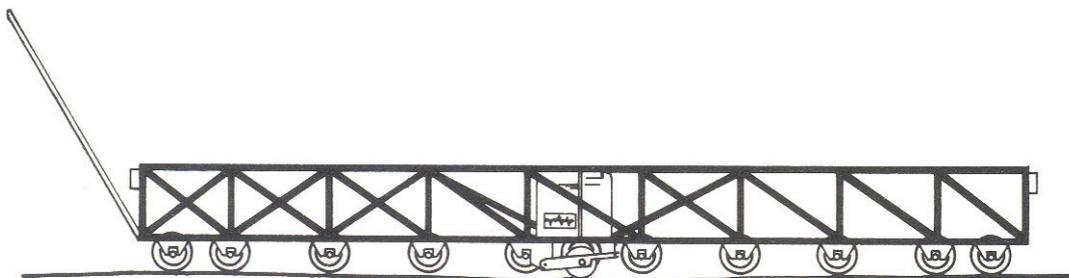
Abbildung 2-1: Messung mit Latte und Keil [6].

Die Vorteile dieser Methode liegen in ihrer Einfachheit und leichten Verständlichkeit. Dem gegenüber stehen aber der große Aufwand und der langsame Arbeitsfortschritt.

Beschränkungen für die maximal messbare Wellenlänge bestehen durch die Länge der Latte. Bei ungünstiger Kombination aus geringer Längs- und Querneigung sowie einer Muldentiefe innerhalb der Abnahmegrenzen kann es dennoch zu sicherheitsrelevanten Wassertiefen mit einem entsprechenden Aquaplaningpotential kommen [7].

#### 2.1.2.2 Planograf

Das Messgerät ist angelehnt an die Ebenheitsbestimmung mit Latte und Keil, jedoch wird hierbei die Latte (4 m) auf zehn Rädern befestigt und markiert dadurch die horizontale Ebene. In der Lattenmitte ist zusätzlich ein Messrad angebracht, siehe Abbildung 2-2. Auf dem Auswertungsschrieb werden die Ebene der Latte, relevante Toleranzebenen, sowie die Abweichungen des Messrades von dieser Ebene verzeichnet. (Längenmaßstab 1:100 oder 1:400, Höhenmaßstab 1:1).



**Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Planografen [8].**

Abnahmemessfahrten sind in Österreich, um Eigenschwingungen zu vermeiden, bei Geschwindigkeiten bis maximal 6 km/h durchzuführen. Die Auswertung erfolgt in der Regel manuell.

Probleme können sich durch kurzweilige periodische Unebenheiten ergeben, gerade wenn diese innerhalb der Toleranzgrenzen bleiben, deren Wirkung jedoch als wesentlich einzustufen ist. Wellenlängen über 4 m werden nur mit abgeschwächter Amplitude aufgenommen, diese sind aber bei der Herstellung durchaus mögliche Unebenheiten, die gerade bei höheren Geschwindigkeiten stärker zu Tage treten [6]. Bei engen Kurven kann es zu Abweichungen im Millimeterbereich kommen, daher müssen diese Bereiche (Grensradien abhängig von Querneigung) in Österreich aus der zu bewertenden Messung genommen werden [5].

Auch im amerikanischen Raum wird diese Art von Messgeräten häufig eingesetzt, jedoch decken diese durch ihre Aufstandsräder zumeist nicht eine Gerade, sondern eine Fläche ab. Es ist zu beachten, dass diese oftmals unter dem Überbegriff „Profilograf“ angeführt werden.

Ein Stellvertreter dieser Gruppe ist der California Profilograf, dargestellt in Abbildung 2-3.



Abbildung 2-3: California Profilograf [17].

### 2.1.2.3 Braunschweiger Profilograf

Der Braunschweiger Profilograf stellt eine Kombination aus Nivellement und der Abstandsmessung von einer Bezugsebene dar. In einem ersten Schritt werden alle 5 m Punktbestimmungen mit einem Nivelliergerät durchgeführt. Das Höhenprofil in den dazwischen liegenden Bereichen wird mit dem Braunschweiger Profilografen gemessen. Dieser besteht aus einer horizontalen Schiene, von welcher aus die Vertikal- und Horizontalbewegungen des Messrades ermittelt und gespeichert werden. Zur besseren Vorstellbarkeit dient die schematische Darstellung in Abbildung 2-4. Anschließend an die Messung müssen die Teilstücke höhen- und neigungsmäßig richtig aneinander gereiht und die Durchbiegung der Bezugsschiene herausgerechnet werden.

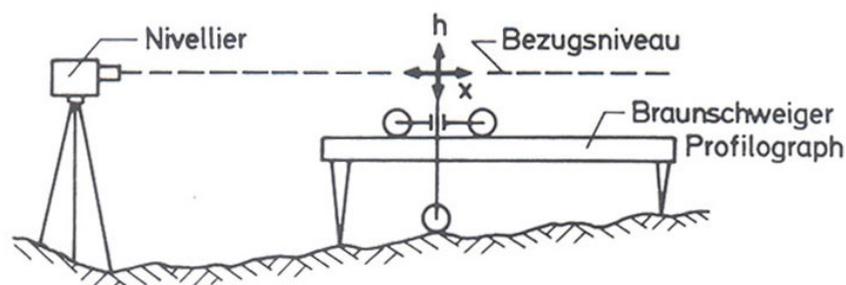


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des Braunschweiger Profilografen [9].

Nach dem gleichen Prinzip funktioniert auch der **TRRL Beam**, der aus einem Balken von drei Metern Länge besteht an welchem das Messrad entlang rollt und den Höhenverlauf aufzeichnet.

#### 2.1.2.4 Primal

Dieses Gerät stellt eine modernere Variante des Braunschweiger Profilografen dar. Hierbei wird die Horizontale durch einen Laserstrahl festgelegt und alle 20 bis 40 mm der Abstand des Messrades (Element des Trolleys, welches das wahre Profil abfährt) zu diesem festgestellt und an den Computer gesandt. Die Abbildung 2-5 bietet nochmals eine Übersicht über dieses Verfahren.

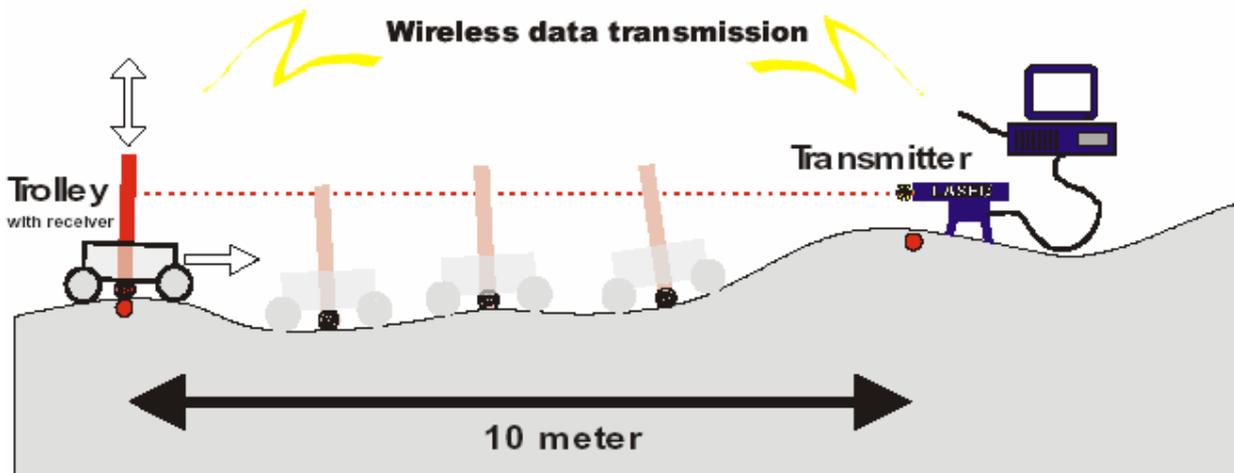


Abbildung 2-5: Uebenhheitsaufnahme mit dem Primal [10].

Das Verfahren ist recht langsam, dafür erreicht man jedoch hohe Genauigkeiten. Es wird vor allem in Schweden durch das VTI (väg-och transportforskningsinstitut) als Referenzmessgerät zur Überwachung von Hochgeschwindigkeitsgeräten eingesetzt.

### 2.1.3 Profildarstellung durch Aufnahme von Neigungsänderungen

#### 2.1.3.1 Winkelmesser (Slopemeter)

Das Gerät besteht aus drei Messrädern, wobei jeweils zwei benachbarte durch eine Gerade verbunden werden. Der Winkel zwischen diesen stellt die aufzunehmende Messgröße dar (siehe Abbildung 2-6). Sie kann als zweite Ableitung (Krümmung) des vorhandenen Profils angesehen werden und wird über den Weg registriert. Das System bietet eine große Bandbreite an Messgeschwindigkeiten, sie beginnt bei Varianten, welche von Hand geschoben werden (4-6 km/h) und steigert sich auf Geschwindigkeiten bis zu 60 km/h [8].

Diese Messmethode fand vor allem in der Schweiz Anwendung und ist dort auch heute noch im Normenwerk verankert [25].

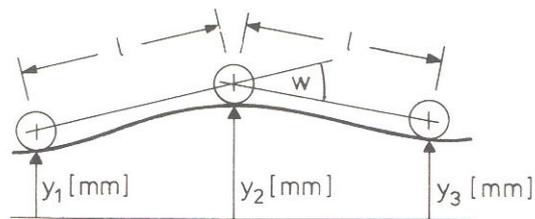


Abbildung 2-6: Funktionsprinzip eines Winkelmessers [8].

Ein Anwendungsbeispiel dieses Messprinzips stellt der Winkelmesser ISETH dar. Die Tasträder sind hierbei vertikal verschieblich in einem horizontalen Abstand von 1 m angeordnet und ihre Position wird durch induktive Wegaufnehmer registriert. Der Winkelwert errechnet sich über die geometrischen Zusammenhänge als

$$W_2 = \frac{(y_1 - 2y_2 + y_3)}{2l}$$

Gleichung 1 aus [11]

Es hat sein Funktionsoptimum bei Geschwindigkeiten von 10-25 km/h.

#### 2.1.3.2 Dipstick

Dieses Gerät misst mit Hilfe eines Inclinometers die Neigung der Verbindung der Aufstandspunkte (Abstand beträgt meist 305 mm), wobei für die Folgemessung ein Punkt gleich bleibt und der andere den Profilschnitt entlang wandert [4]. Eine schematische Darstellung und ein Anwendungsbeispiel finden sich in Abbildung 2-7 und Abbildung 2-8.

Diese finden vor allem Anwendung als Referenzgeräte zur Festlegung des wahren Profils sowie für die Überprüfung und Überwachung der Messgenauigkeit von anderen Messinstrumenten.

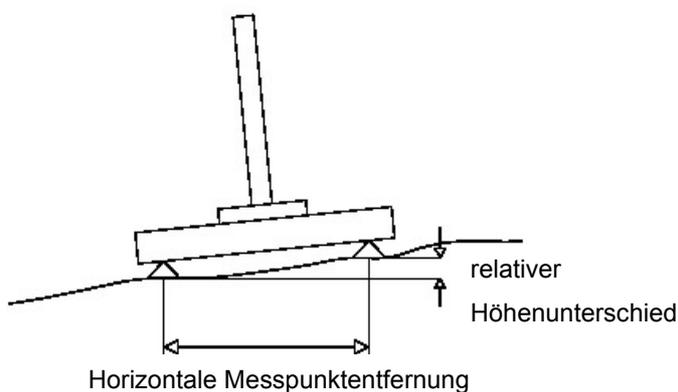


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung Dipstick



Abbildung 2-8: Dipstick [4].

### 2.1.3.3 Walking Profiler

Das australische Messsystem ARRB Walking Profiler nimmt mittels Inklinometer den relativen Höhenunterschied aufeinander folgender Punkte im Abstand von 241 mm auf und ist in einer möglichen Ausführung in Abbildung 2-9 dargestellt. Es ist darauf ausgelegt von Hand über die Messstrecke geschoben zu werden, daher ergibt sich als Messgeschwindigkeit die Schrittgeschwindigkeit.

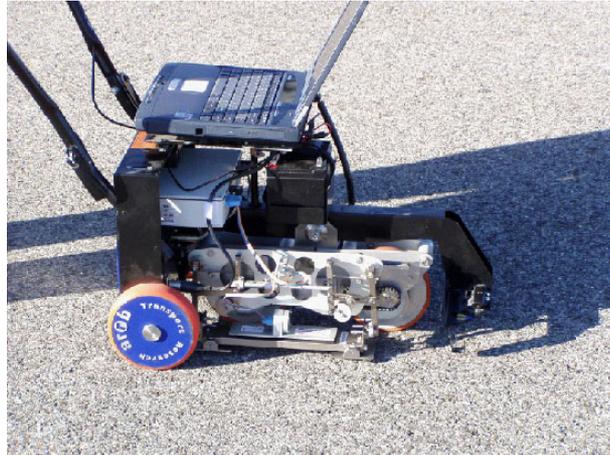


Abbildung 2-9: ARRB Walking Profiler [12].

### 2.1.3.4 Profilometer

Hierbei werden die Neigungsdaten in beiden Fahrspuren mittels Messradwippen (2 Messräder, die in der Mitte gehalten werden, siehe Abbildung 2-10) aufgenommen, die durch einen Querträger fixiert, parallel in den Spuren laufen.

Als Messwert gilt der Winkel hin zur Deichsel, gemessen durch Wegaufnehmer. Die Abweichungen der Deichsel von der Horizontalen werden als vernachlässigbar klein eingestuft. Zu beachten ist die vorgeschriebene konstante Geschwindigkeit von 12 km/h.

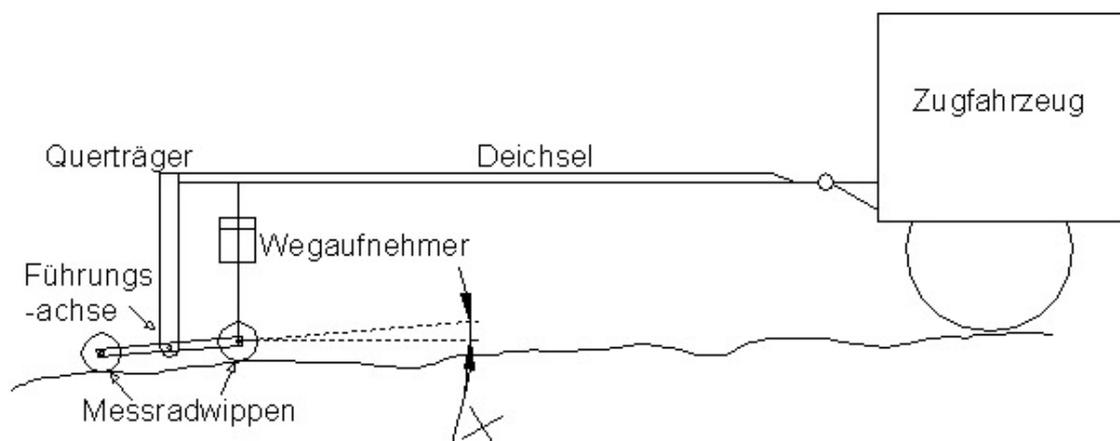


Abbildung 2-10: Profilneigungsmessgerät der Bast [11].

Vorwiegend im amerikanischen und australischen Raum werden Neigungsmessgeräte, wie Dipstick oder Walking Profiler, als Referenzgeräte zur Festlegung des wahren Profils sowie für die Überprüfung und Überwachung der Messgenauigkeit von anderen Messinstrumenten verwendet.

## **2.2 Profilermittlung durch Wirkung der Straße auf das Messgerät**

Den folgenden Messgeräten ist gemein, dass sie die vertikale Schwingreaktion eines Messrades aufgrund der Anregung durch die Straße aufnehmen. Diese Vertikalbewegung wird über einen bestimmten Zeitraum aufsummiert und dann durch die zurückgelegte Strecke dividiert. Teilweise kann es durch diese Schwingbewegung zu einer Absorption von Einzelhindernisse kommen und dies kann je nach Abschnittsgröße zu überproportional guten Werten führen. Darüber hinaus ist es nicht möglich, die Lokalität des Hindernisses zu rekonstruieren.

Weiters ist bei allen Methoden eine starke Abhängigkeit des Ergebnisses vom verwendeten Aufnahmegerät zu verzeichnen, wodurch die Übertragbarkeit der Daten stark eingeschränkt wird.

Die Aufnahmeeinheiten werden meist auf eigens für die Messung entwickelten Geräten befestigt, jedoch kann auch ein konventionelles Mittelklassefahrzeug als Schwingkörper eingesetzt werden, dessen Relativbewegungen zwischen Achse und Wagenmasse registriert werden.

### **2.2.1 Aufnahme der Vertikalbewegungen**

In den USA ist diese Gruppe von Messgeräten unter der Abkürzung RTRRMS (response type road roughness measuring system) bekannt. Beispiele hierfür sind das BPR Roughometer, das PCA Meter sowie das Mays Ride Meter. In der Folge werden die in Europa verwendeten Geräte beschrieben, wobei darauf hinzuweisen ist, dass diese Geräte heute weitgehend durch Lasergeräte zur Messung des wahren Profils ersetzt wurden.

#### **2.2.1.1 Bump Integrator**

Das Messgerät summiert mittels Wegaufnehmer die Relativbewegungen des Rahmens gegenüber dem Messrad auf und muss dabei mit einer konstanten Geschwindigkeit von 32 km/h gezogen werden (eine schematische Darstellung findet sich in Abbildung 2-11). Über die Anzahl der Umdrehungen des Rades kann die zurückgelegte Strecke berechnet werden. Der Kennwert definiert sich als Summe der Relativbewegungen dividiert durch die Länge der

Strecke [cm/km], wobei die Ergebnisse durchwegs abschnittsweise angegeben werden (Abschnittslänge je nach Vorgabe 30 – 1000 m).

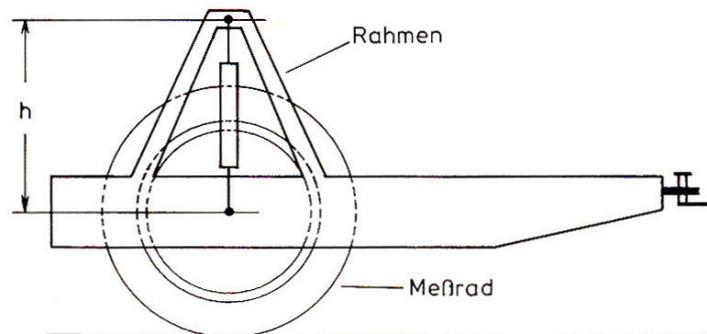


Abbildung 2-11: System Bump Integrator [8].

Es ist möglich, Rückschlüsse von den Messergebnissen auf den Fahrkomfort zu ziehen, jedoch nicht auf Auswirkungen der Unebenheiten auf andere Fahrzeugtypen. Eine Rekonstruktion des wahren Profils aus den ermittelten Daten ist ebenfalls nicht möglich.

Lokale Hindernisse können, wenn sie bestimmte Grenzen überschreiten, separat mit Höhe der Überschreitung und der Örtlichkeit angegeben werden. Auch Geschwindigkeitsschwankungen können rechnerisch ausgeglichen und an das vorgegebene Ziel von 32 km/h angepasst werden [11]. Dieses Gerät wurde bis in die späten 90er Jahre auch in Österreich eingesetzt.

Zur Bewertung der aufgenommenen Daten gab es in Großbritannien zahlreiche Studien, die eine Korrelation zwischen den Ergebniswerten des Bump Integrators und der Varianz der Unebenheitshöhen herstellen (siehe hierzu [13]).

In einem weiteren Schritt wurden auch Geräte entwickelt, die in einem konventionellen Pkw eingebaut werden können (entweder in der Mittelachse oder auch seitlich davon, siehe Abbildung 2-12). Hierbei wird dann die Relativbewegung der Dämpfung zur Bodenplatte gemessen. Vorteile dieses relativ kleinen Gerätes sind die leichte Handhabung und die dadurch erreichte Flexibilität im Einsatz.



Abbildung 2-12: Mobiler Bump Integrator [14].

### 2.2.1.2 Analyse de profil en long (APL)

Das Messprinzip wurde ursprünglich vom französischen Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) für den Einsatz bei Abnahmeprüfungen entwickelt und basiert auf der induktiven Messung des vertikalen Weges des Rades gegenüber einem trägen Pendel, das die Bezugsgerade bildet (siehe Abbildung 2-14). Dieses Feder-Dämpfungs-System wurde im Laufe der Zeit so optimiert, dass dadurch der systembedingte Anteil der Reaktion auf die Unebenheiten eliminiert wird und die ermittelten Wege weitestgehend den Unebenheitsverläufen entsprechen [7].

Die Messung ist mit einer Geschwindigkeit von 21,6 km/h oder 72 km/h durchzuführen, wobei maximal eine Amplitude von 75 mm in einem Wellenlängenbereich von 0,5-20 m wahrgenommen werden kann. Sie wird meist in einer Radspur durchgeführt, es können aber auch 2 Geräte parallel gezogen werden, wie auch die Abbildung 2-13 zeigt. Die ermittelten Daten können analog auf Papier graphisch wiedergegeben werden, wobei aber die digitale Speicherung der Höhen in einem Abstand von maximal 0,25 m üblich ist.



Abbildung 2-13: Messungen mit APL in beiden Radspuren [10].

Konventionell wird der Messwert als  $CAPL25$  ( $v=21,6$  km/h) über eine Segmentlänge von 25 m mit einer Messwertanzahl  $N$  und den gemessenen Höhen  $A$  angegeben:

$$CAPL25 = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_i A_i \quad \text{Gleichung 2 aus [10]}$$

Unter der Annahme, dass die Werte des Messgerätes dem wahren Profil entsprechen, können aus diesen Profilen weitere Kennwerte (wie beispielsweise die Standardabweichung der Winkelwerte) ermittelt werden. Beispielsweise werden die Daten der Messungen bei einer Geschwindigkeit von 72 km/h mit Hilfe der Wellenbandanalyse (siehe Kapitel 3.3.5) ausgewertet.

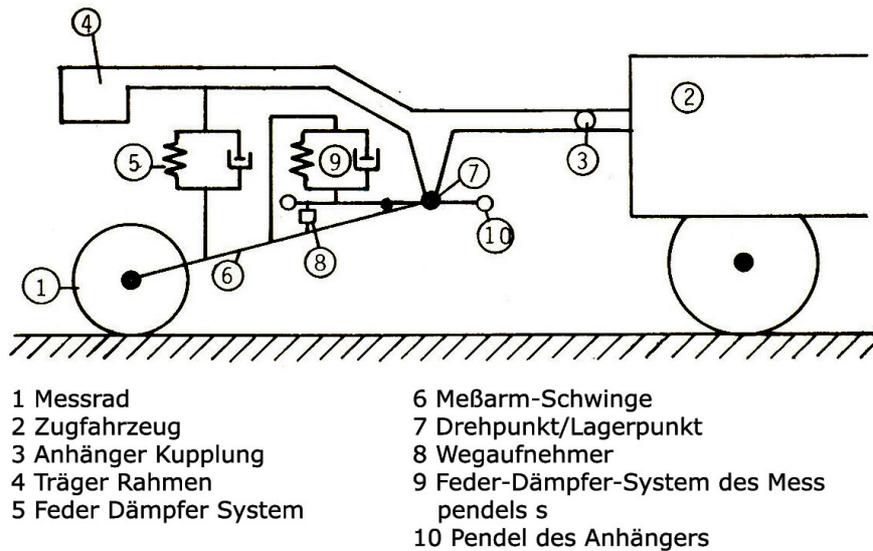


Abbildung 2-14: Funktionsprinzip APL [11].

## 2.3 Ermittlung des wahren Profils

Die Aufnahme bzw. Ermittlung des wahren (Längs-)Profils erfolgt vorwiegend durch Hochgeschwindigkeitsgeräte, die im Gegensatz zu den bisher genannten Geräten nicht für die Abnahmeprüfung, sondern vorwiegend für die kontinuierliche Überwachung der unter Verkehr stehenden Straßen herangezogen werden (Zustandserfassung). Die Messgeschwindigkeit sollte so ausgelegt sein, dass grundsätzlich Messungen im Fließverkehr möglich sind (Mindestgeschwindigkeit 60 km/h).

### 2.3.1 Beschleunigungsmessung

Im Rahmen der Beschleunigungsmessung werden an zumindest zwei Stellen des Prüffahrzeuges die Beschleunigungen aufgenommen (beispielsweise Wagenboden und starre Hinterachse). Anhand dieser Informationen sowie den Fahrzeugeigenschaften kann auf dem Profilverlauf rückgerechnet werden. Ein Beispiel für dieses Verfahren ist das aus der Tschechei stammende Messgerät DYNVIA, das beim PIARC-EVEN Experiment eingesetzt wurde [15].

### 2.3.2 Kombinierte Beschleunigungs-Distanz-Messung

#### 2.3.2.1 Prinzip der berührungslosen Distanzmessung

Hierfür werden häufig kostengünstige Ultraschallsensoren verwendet, jedoch bringen diese auch funktionell einige Einschränkungen mit sich. So bedingt dieses System einen „Messfleck“ von einigen Zentimetern, die Auflösung ist wesentlich geringer als die eines Lasersensors und der Fahrtwind kann Ablenkungen des Messsignals und dadurch Ungenauigkeiten verursachen. Die heutzutage gebräuchlichere Variante ist die Abstandbestimmung mittels Laserdiode.

Das Funktionsprinzip ist in der nachfolgenden Abbildung 2-15 dargestellt. Eine Veränderung des Abstands zwischen Fahrbahn und der Sensoreinheit bewirkt ein unterschiedliches Auftreffen des Lichtes auf den Photodioden, wodurch nach Eichung des Gerätes die tatsächliche Entfernung bestimmt werden kann.

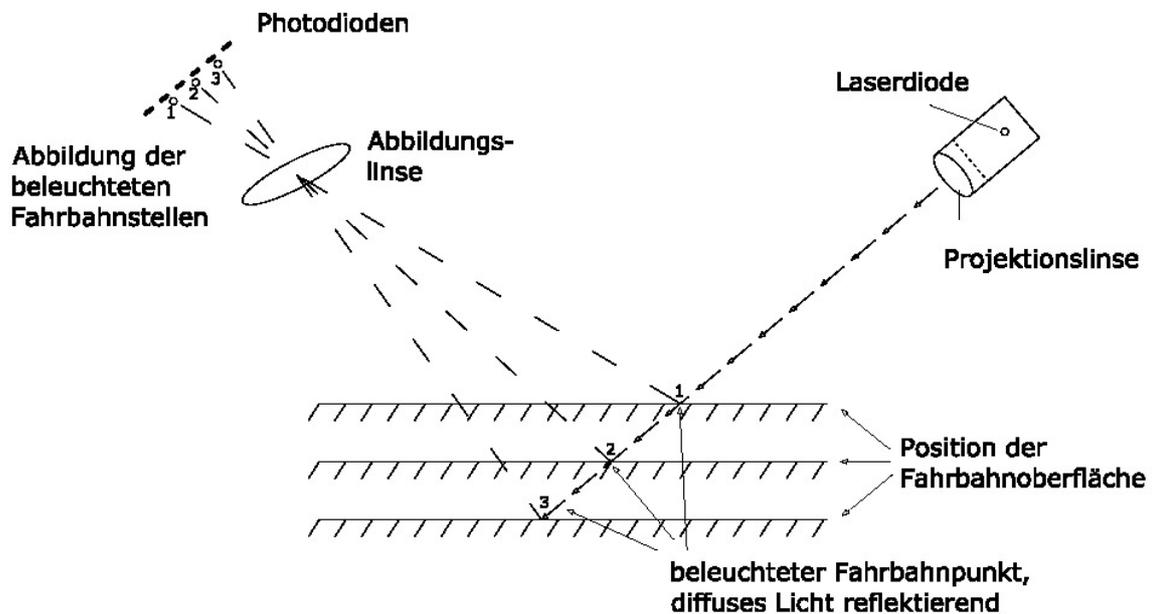


Abbildung 2-15: Die heutzutage gebräuchlichere Variante ist die Abstandbestimmung mittels Laserdiode, die mit dem hier dargestellten Triangulationsprinzip arbeitet [11].

### 2.3.2.2 Berechnung des wahren Profils mittels Beschleunigungs-Distanz-Messung

Mit Hilfe des oben erläuterten Verfahrens erhält man den jeweiligen Abstand des Messinstrumentes von der Fahrbahn ( $H(x)$ ). Als zweite Variable wird die Bewegung des Messfahrzeuges über die Vertikal-Beschleunigung des Gerätes gemessen ( $A(s)$ ), aus diesen Komponenten und der Geschwindigkeit ( $v$ ) kann die jeweilige Profilhöhe ermittelt werden.

$$Z(x) = H(x) + \iint \frac{A(s)}{v^2} ds ds \quad \text{Gleichung 3 aus [17]}$$

### 2.3.2.3 Abstandsbestimmung mittels Laser

Für die Bestimmung der Längsebenheit werden in jeder Fahrspur mit einem Laser-Distanzmesser die entsprechenden Abstände zur Fahrbahnoberfläche gemessen. Im Zuge der weiteren Auswertung werden diese Werte gemittelt, um näherungsweise den Verlauf in der Mitte der Fahrspur darzustellen. Der Beschleunigungsaufnehmer ist in der vorderen Stoßstange angebracht.

Die Wegstrecke wird über einen Impulsgeber am Vorderrad abgenommen. Es können Geschwindigkeiten bis zu 90 km/h erreicht werden, jedoch muss diese während der Messung (durch die zeitabhängigen Integrationsvorgänge) konstant gehalten werden [11].

Weitere Anwendungen dieses Systems finden sich in folgenden Multifunktionsgeräten (siehe Abbildung 2-16 bis Abbildung 2-18) [10]:

ALFRED (Norwegen)

ARAN (Kanada)

LRST – Laser Road Surface Tester (Schweden)

FRMS – Finnish Road Monitoring System (Finnland)

ORCA – Optical Road Condition Assessment Vehicle (England)



Wegstreckenmesser

**Abbildung 2-16: ALFRED [10].**



Distanzmesser

**Abbildung 2-17: ARAN [10].**



Beschleunigungsmesser

**Abbildung 2-18: LRST [16].**

#### 2.3.2.4 Inertial Profiler

Unter dieser Bezeichnung kommt das vorhergehend erläuterte System im amerikanischen Raum zum Einsatz, wobei die große Zahl an unterschiedlichen Ausführungen zu erwähnen ist. Beispiele sind der Dynatest Road Surface Profiler (RSP) oder der K.J. LAW Profiler (teilweise mit Infrarotsensor für Abstandsmessung ausgerüstet) [10, 17].

#### 2.3.2.5 Lightweight profiler

Auch diese Entwicklung kommt aus dem amerikanischen Raum und dient vorrangig der Abnahmeprüfung. Die Elemente eines konventionellen Inertial Profilers werden kompakt auf einem kleinen Fahrzeug installiert (siehe nebenstehende Abbildung 2-19). Diese Geräte sind für Geschwindigkeiten unter 30 km/h ausgelegt und haben ein Gewicht von ca. 350 kg.



**Abbildung 2-19: Dual Track Profiler ICC [17].**

Jedoch wurden bei diesen Geräten Probleme bei der geforderten Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Messungen festgestellt, nachzulesen in [17].

#### 2.3.2.6 ZAG-VP

Bei diesem in Slowenien entwickelten System wird der vertikale Beschleunigungsmesser direkt auf die Federmasse eines Standard-Mittelklassewagens befestigt und die Distanzmessung zwischen Aufnehmer und Fahrbahnoberfläche erfolgt über die Abnahme des Winkels zwischen Rahmen des Fahrzeugs und der Hinterradachse durch einen winkelvariablen Differentialumwandler (angular-variable differential transformer), gut zu erkennen in Abbildung 2-20. Weitere Informationen zu diesem System finden sich in [18].



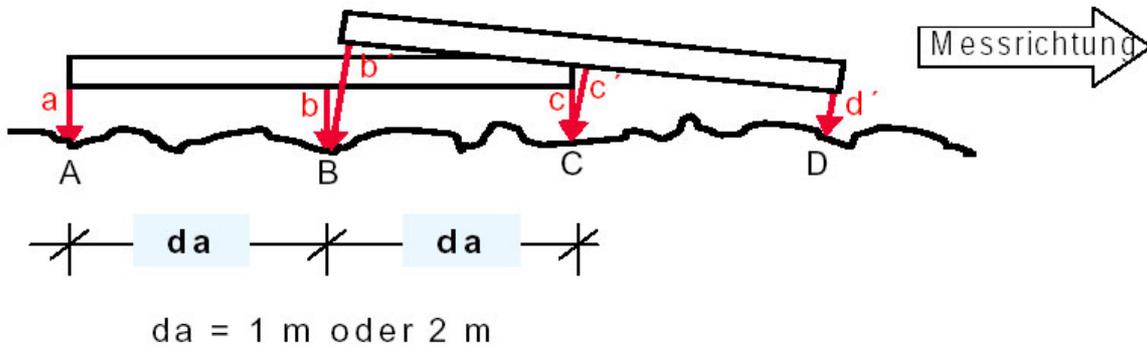
Abbildung 2-20: Befestigung des Differentialumwandlers am Fahrzeug [10].

#### 2.3.3 Höhenbestimmung über Lasersysteme (Mehrfachabtastung)

Diese Methode ist recht weit verbreitet und basiert auf folgendem Prinzip. Mittels 4 (teilweise auch 5, für Berechnungen mit unterschiedlichen Basislängen) Lasersensoren wird der Abstand der Messeinheit von der Straßenoberfläche gemessen. Diese Elemente sind starr auf einem Balken befestigt, der schwingungsgedämpft aufgehängt ist. Zusätzlich zu den Höhen der Punkte muss auch die dazugehörige Wegstrecke aufgenommen werden, dies kann mit Hilfe eines Abnehmers an den Rädern erfolgen.

Die Auswertung erfolgt auf Grundlage von geometrischen Zusammenhängen, daher auch geschwindigkeitsunabhängig, über die symmetrische (für Wellenlängen größer 10 m) und asymmetrische (für Wellen von 0,3 bis 20 m) Betrachtung der Daten, dargestellt in Abbildung 2-21.

$$1. \text{ symmetrisches System: } C = -(a - 2b + c) \\ D = 2C - B - (b' - 2c' + d')$$



$$2. \text{ asymmetrisches System: } C = 2da/dc \cdot B - 1/dc \cdot A - (c - 2da/dc \cdot b + 1/dc \cdot a) \\ D = 2da/dc \cdot C - 1/dc \cdot A' - (d' - 2da/dc \cdot c' + 1/dc \cdot a')$$

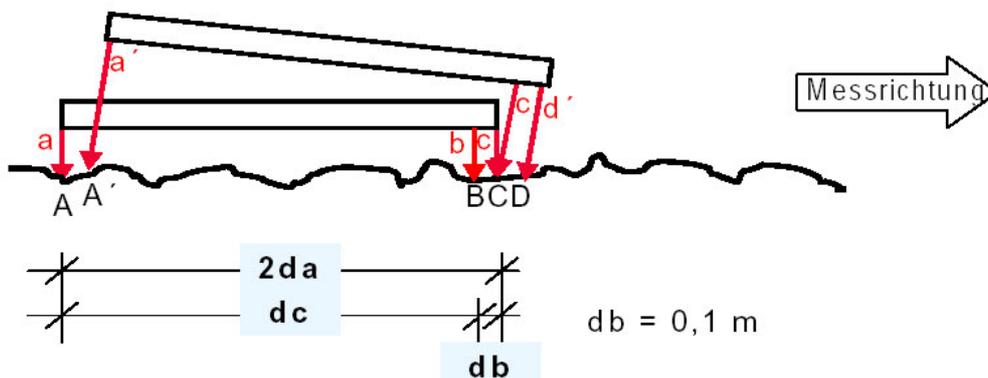


Abbildung 2-21: Auswertung der Messdaten [19].

Durch Überlagerung der beiden Systeme können Wellenlängen von 0,2 m bis 400 m aufgenommen werden, wobei der parabolische Trend der Rohdaten (durch Fehler bei der Aufnahme) durch eine entsprechende Datenverarbeitung größtenteils eliminiert wird. Jedoch kann es bei größeren Messstreckenlängen zu einem überproportionalen Anwachsen des Messfehlers kommen [9].

Untersuchungen zur Genauigkeit dieses Messsystem durch das Institut der TU Braunschweig [20] ergaben, dass diese im Bereich von großen Wellenlängen vorwiegend durch die Makrorauheit beeinflusst wird, im Bereich von kleinen Wellenlängen ist die Mittelung der asymmetrischen Daten ausschlaggebend für Abweichungen. Der Zusammenhang mit dem Referenzprofil ist in Abbildung 2-22 dargestellt.

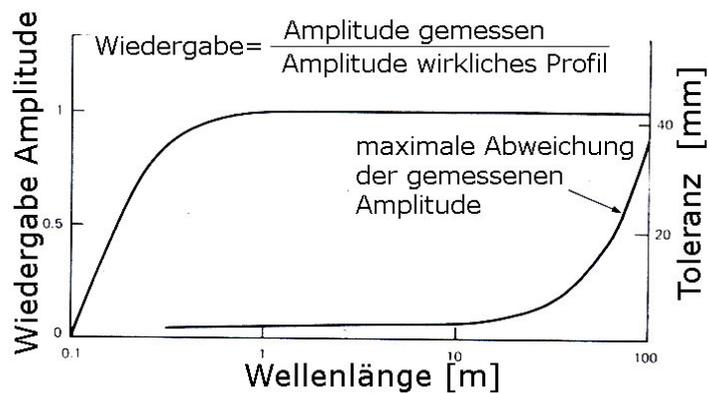


Abbildung 2-22: Amplitudenübertragung [20].

Multifunktionsgeräte, die dieses Messsystem verwenden, unterscheiden sich voneinander meist in Geschwindigkeit und Länge des Messbalkens, Messpunktstand/Auflösung bzw. Befestigung der Messelemente. Die bekanntesten Vertreter sind hier kurz vorgestellt:

### 2.3.3.1 RoadSTAR – Österreich

(siehe Abbildung 2-23 und Abbildung 2-24)

- Messgeschwindigkeit 40-120 km/h (Standard 60 km/h)
- Balkenlänge 2 m
- Mittelung der Messdaten auf eine Schrittweite von 0,05 m
- Betrachtung von Wellen der Länge 0,5-50 m



Abbildung 2-23: RoadSTAR bei Messeinsatz [21].



Abbildung 2-24: Messvorrichtung des RoadSTAR [21].

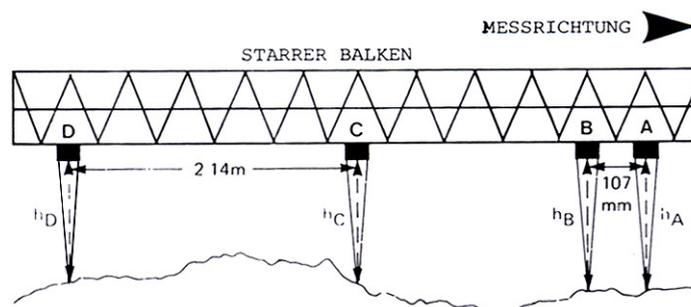
### 2.3.3.2 High Speed Road Monitor (HRM) / TRRL-High-Speed-Profilometer (HSP) – GB

(siehe Abbildung 2-25)

- Messgeschwindigkeit: 5 – 80 km/h (0-120 km/h) laut [10]
- Balkenlänge 4 m bzw. 4,5 m (Anordnung der Sensoren siehe Abbildung 2-26)
- Mittelung der Messdaten auf eine Schrittweite von 0,107 m
- Messspur in der Längsmittellinie des Anhängers (bei engen Kurven kann es bei diesem Messsystem zu unzulässigen Messergebnissen kommen, da die Sensoren nicht mehr die gleiche Messspur abtasten können)



Abbildung 2-25: HRM [10].



SYM-SYSTEM BESTEHEND AUS DEN SENSOREN A, C, D

ASY-SYSTEM BESTEHEND AUS DEN SENSOREN A, B, D

Abbildung 2-26: Sensoranordnung auf starrem Balken [20].

### 2.3.3.3 ARGUS Profil Messanhänger - Deutschland

Einsatzbereiche sind die Abnahmeprüfung und kontinuierliche Messungen. Die Anordnung des Messelements ist in Abbildung 2-27 ersichtlich.

- Messgeschwindigkeit 5-100 km/h
- Balkenlänge 2 m
- Messpunktabstand 0,005 m
- Betrachtung von Wellenlängen 0,5-100 m



Abbildung 2-27: ARGUS [10].

### 2.3.4 Richtlattensimulation

In der deutschen Richtlinie ist grundsätzlich ein Rückrechnen vom tatsächlichen Profil auf eine gleitende Richtlatte vorgesehen. Es werden hierfür Auflagerpunkte im Abstand von 4 m angenommen und in Lattenmitte der Abstand senkrecht zur Fahrbahn ermittelt, wobei zu überprüfen ist, ob die Latte auch tatsächlich aufliegt. Sie wird dann von einem Messpunkt zum nächsten verschoben und es ergibt sich dadurch ein neues Profil (Details siehe hierzu [2]).

## 2.4 Klassifizierung der Aufnahmegeräte

Im Zuge der Entwicklung des Internationalen Roughness Index wurde auch für die Messgeräte im Hinblick auf ihre Genauigkeit eine Einteilung getroffen. Hintergrund war die Vermeidung von Abweichungen schon bei der Datengewinnung, die sich dann bei Berechnung eines Kennwertes nochmals auswirken.

Die Klassen wurden im Jahre 1968 wie folgt definiert [3]:

- Klasse 1: präzise Profilermittlung  
Die Aufnahme der Messwerte muss in kurzem Abstand (max. 250 mm) in einer Fahrspur erfolgen. Der Fehler in der Höhe darf maximal 0,5 mm betragen. Weiters müssen Wellenlängenbereiche von mindestens 0,5 – 20,0 m aufgenommen werden, diese Daten können dann direkt für die Berechnung des IRI verwendet werden.
- Klasse 2: Profilaufnahmegeräte die wahres Profil aufzeichnen  
Aus den Daten dieser Geräte kann das wahre Profil ermittelt werden kann, sie erfüllen jedoch nicht die Anforderungen eines Klasse 1 Gerätes (z.B. der APL).
- Klasse 3: IRI nicht direkt ermittelbar  
Der Messwert dieser Geräte lässt sich nur über Korrelationsbeziehungen in den Internationalen Roughness Index umrechnen. Diese Beziehungen müssen im Vorfeld an Referenzstrecken erstellt werden.
- Klasse 4: subjektive Beurteilungen  
Aus den Ergebnissen dieser Beurteilungen kann nur mehr ein ungefährer Kennwert abgeschätzt werden.

In ähnlicher Weise erfolgt auch die Klassifizierung der Messgeräte nach pre EN 13036-6 [23], wobei nur drei Klassen definiert werden. Die Grenzwerte sind im Detail in Tabelle 2-2 ersichtlich.

	<b>Klasse 1</b>	<b>Klasse 2</b>	<b>Klasse 3</b>
Vertikale Auflösung	$\leq 0,2 \text{ mm}$	$0,2 < x \leq 0,5 \text{ mm}$	$0,5 < x \leq 1,5 \text{ mm}$
Aufgenommenes „Sampling Interval“	$\leq 50 \text{ mm}$	$50 < x \leq 125 \text{ mm}$	$125 < x \leq 250 \text{ mm}$
Bearbeitbares „Sampling Interval“	$\leq 100 \text{ mm}$	$100 < x \leq 250 \text{ mm}$	$250 < x \leq 500 \text{ mm}$
Max. erfassbare Wellenlänge	$\geq 200 \text{ m}$	-	-

Tabelle 2-2: Klassifizierung der Messgeräte [23]

### **3 AKTUELLE BEWERTUNGSVERFAHREN**

Im vorangegangenen Kapitel wurden verschiedene Methoden der Längsebenheitsaufnahme dargestellt, das so erhobene Datenmaterial gewinnt jedoch erst an Aussagekraft, sobald die Verknüpfung mit der daraus resultierenden Wirkung auf den Fahrer, das Fahrzeug und in Folge dessen auch auf die Straße erfolgt ist.

Die erfassten Abweichungen von der ideal ebenen Fahrbahnoberfläche erzielen die Wirkung einer Wellenfahrbahn, die wiederum die darüber fahrenden Fahrzeuge in Schwingung versetzt. Zum besseren Verständnis der angeführten Bewertungsverfahren wird in der Folge eine Übersicht über die Beschreibung von Schwingungen gegeben.

Prinzipiell haben sich zur Bewertung der Unebenheiten zwei unterschiedliche Ansätze entwickelt.

Einerseits erfolgt die Betrachtung der Fahrbahn durch die Auswertung ihrer Geometrie, siehe Kapitel 3.3 Statistische Auswertung. Einfachere Verfahren bieten hierbei beispielsweise durch die Bildung der Varianz und der Standardabweichung eine Zusammenfassung der Daten. Komplexere Verfahren ermitteln die verschiedenen Wellenlängen, welche in dem vorliegenden Straßenprofil enthalten sind und ziehen daraus Rückschlüsse auf den Straßenzustand.

Andererseits wird die aus den Unebenheiten resultierende Wirkung auf die Fahrzeuge und die darin sitzenden Personen oder auch das transportierte Ladegut ermittelt, beispielsweise durch die Bildung von Ersatzsystemen. Das heißt das erhobene Datenmaterial dient in diesem Falle nur als Eingangsgröße, bewertet wird die Schwingantwort des Fahrzeuges.

Für beide Methoden werden verschiedene Anwendungen sowie deren Berechnung dargestellt. Zur besseren Nachvollziehbarkeit befinden sich zu den Kapiteln Spektrale Dichte, Allgemeines Unebenheitsmaß und Internationaler Roughness Index jeweils ein Berechnungsbeispiel im Anhang.

#### **3.1 Physikalische Grundlagen aus der Schwingungslehre**

Anhand einer einfachen harmonischen Schwingung werden kurz die üblichen Kenngrößen und Beziehungen dargestellt.

In der folgenden Abbildung 3-1 sind die Einheiten schon in den für die Straßenbautechnik relevanten Größen dargestellt. Die vorhandenen Unebenheiten werden als Schwingfunktion betrachtet. Die Größe  $h$  ist hierbei die gemessene Abweichung des Profils von der Horizontalen und  $x$  stellt die Längsausdehnung des Schnittes dar.

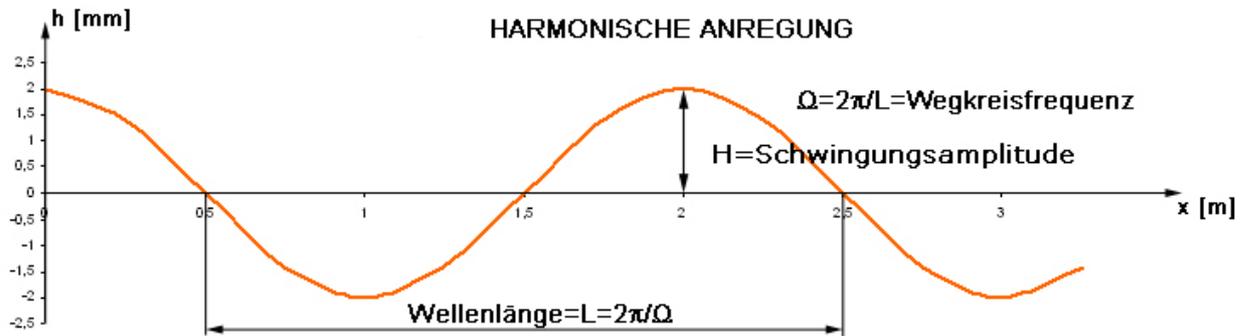


Abbildung 3-1: Unebenheiten als Funktion des Weges

Ein wesentlicher Kennwert zur Beschreibung von Schwingungen ist die Periodendauer, das heißt jene Zeit bis sich die Schwingung wiederholt, diese ist in unserem Fall äquivalent mit der Wellenlänge  $L$  [m]. Die Wellenzahl  $n$  gibt an wie viele Wellen auf einen Meter passen ( $n=1/L$ ). Multipliziert man diese mit dem Umfang des Einheitskreises ( $2\pi$ ) erhält man die Wegkreisfrequenz  $\Omega$ . Es besteht die oben schon dargestellt Beziehung:

$$\Omega = 2\pi / L \text{ [rad / m]}$$

Gleichung 4

Die Wellenlänge ergibt sich somit als Kehrwert der Wellenzahl.

Über die Geschwindigkeit (mit welcher die Strecke überfahren wird) kann ein Zusammenhang zur Frequenz  $f$  (Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, die auf das darüber fahrende Fahrzeug einwirken), hergestellt werden.

$$f = v / L \text{ [1 / s]}$$

Gleichung 5

Weiters ist die Schwingung definiert über ihre Amplitude ( $H$ ), das heißt den Höchstwert einer halben Schwingung. Der maximale „Spitze-Spitze“ Wert, in unserem Fall der doppelte Wert von  $H$ , wird Spannweite genannt.

Die Amplituden der einzelnen Schwingungen, die beispielsweise in einem Längsprofil enthalten sind, können in dem Amplitudenspektrum dargestellt werden (Auftragen der Amplituden mit den dazugehörigen Wegkreisfrequenzen).

### 3.1.1.1 Darstellungsformen von harmonischen Schwingungen:

in allgemeiner Form:

$$h(x) = H \cdot \sin(\Omega x + \varepsilon)$$

Gleichung 6

$\varepsilon$  Phasenwinkel

in komplexer Form:

$$h(x) = \underline{H} \cdot e^{j\Omega x}$$

Gleichung 7

$\underline{H}$  komplexe Amplitude ( $\underline{H} = H e^{j\varepsilon}$ )

In anderer Form kann die komplexe Zahl auch als  $Z = R + j \cdot X$  ( $R = \text{Realteil}$ ,  $X = \text{Imaginärteil}$ ) dargestellt werden, wobei die Amplitude  $H$  dem Betrag der komplexen Zahl entspricht ( $H = |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ ). Weiters kann daraus auch die Phaseninformation gewonnen werden ( $\tan \varepsilon = X/R$ ).

Zur besseren Übersicht sind die oben beschriebenen Kennwerte nochmals in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Kennwert	Einheit	Beschreibung	Formel
$L$	m	Wellenlänge	
$n$	1/m	Wellenzahl	$n=1/L$
$\Omega$	rad/m	Wegkreisfrequenz	$\Omega=2\pi/L$
$f$	1/s=Hz	Frequenz	$f=v/L$
$\omega$	rad/s	Kreisfrequenz	$\omega=2\pi f$
$H$	m	Amplitude	

Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Schwingungskennwerte

### 3.2 Anwendungsbereiche

Prinzipiell lassen sich Fahrbahnanregungen in die folgenden Gruppen bzw. Kategorien unterteilen:

- regellose, stochastische Unebenheiten
- periodische Unebenheiten
- transiente Unebenheiten (durch Einzelhindernisse hervorgerufen)

Von Einzelhindernissen spricht man, wenn zum Zeitpunkt des Überfahrens eines gleichartigen Hindernisses die Schwingantwort auf das direkt zuvor situierte Hindernis schon zur Gänze abgeklungen ist (Definition laut [50]).

Jedoch nur Unebenheiten bestimmter Wellenlängen versetzen darüber fahrende Fahrzeuge in Schwingung. Einerseits werden Hindernisse im Bereich bis etwa 100 mm durch den Reifenlatsch selbst geschluckt, wodurch es zu keiner Hebung oder Senkung der Fahrzeugachse bzw. Schwingungsanregung kommt [22]. Dies sei durch die nachstehende Skizze (Abbildung 3-2) verdeutlicht. Akustisch machen sich jedoch auch diese Unebenheiten bemerkbar.

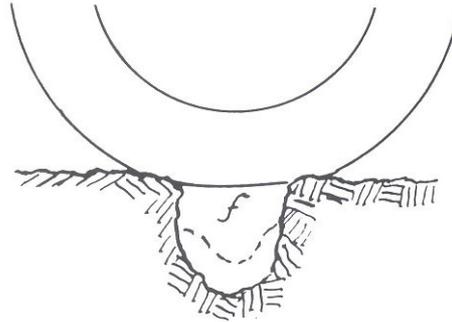


Abbildung 3-2: Reifenlatsch [22].

Andererseits kommt es ab einer Wellenlänge von 100 m aufgrund der niedrigen Eigenfrequenzen zu keiner schwingungsrelevanten Anregung mehr.

Eigenfrequenz:  $f_{min}=0,5-0,8$  Hz

Frequenz:  $f=v/L$

max. berücksichtigte Geschwindigkeit:  $v_{max} = 150-180$  km/h = 41,6-50 m/s

Wellenlänge:  $L=v/f$   $L_{max} = 100$  m

Daher werden Wellenlängen außerhalb dieses Bereichs zumeist gar nicht betrachtet und fließen in keiner der nachstehenden Methoden in die Kennwertbildung ein. Für eine internationale Einheitlichkeit sorgt die pr-EN 13036-5 [23]. Diese beschränkt die zu betrachtenden Wellenlängen auf 0,781 m bis 50,0 m. Um diesen Bereich einzuhalten, kann eine Filterung des vorhandenen Datenmaterials notwendig sein.

Wie schon im Kapitel der Längsebenheitsmessung erwähnt, werden auch hier Methoden betrachtet, die sich auf Profildaten aus einer Messspur beziehen. In Folge dessen fehlt auch bei Anregung der Simulationsfahrzeuge die dritte Dimension.

### 3.3 Statistische Auswertung

#### 3.3.1 Varianz und Standardabweichung der Unebenheitshöhen

Mit dieser Methode ist es möglich, sich relativ einfach einen Überblick über die Größe der Unebenheiten zu verschaffen. Zur Glättung des Gesamtprofils und zum Ausgleich von Einzelzacken dient meist die Bildung des Mittelwerts, wobei am effektivsten die Anwendung des gleitenden Mittelwertes ist. Es ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse stark durch die Mittelungslänge beeinflusst werden. Sie sollte mit der längsten maßgebenden Wellenlänge angesetzt werden, wobei auch größere Wellen auf das Ergebnis Einfluss nehmen, jedoch

exponentiell abgeschwächt sind. Es wird zu jedem Datenpunkt der Mittelwert über  $n$  vorangehende und  $n$  nachfolgende Messwerte gebildet. Dadurch ergibt sich eine Glättung des Gesamtprofils, da Einzelzacken ausgeglichen werden. Mathematisch stellt er sich für die Stelle  $i$  wie folgt dar:

$$\bar{h}_i = \frac{1}{2n+1} \sum_{j=-n}^n h_j \quad \text{Gleichung 8}$$

$h_j$             Messwert / Höhenkote an der Stelle  $j$   
 $n$               Anzahl der Messdaten vor bzw. nach dem Punkt der Mittelwertbildung, die Mittelungslänge  $l$  enthält  $2n+1$  Messwerte

Das Randwertproblem wird in den folgenden Anwendungen unterschiedlich gelöst. In der deutschen Richtlinie ist im Zuge der Berechnung der Spektralen Dichte (PSD) ein Vor- und Nachlauf vorgeschrieben, hingegen beinhaltet der IRI Algorithmus einen asymmetrischen Einlaufbereich.

Durch Quadrieren der Höhenkoten entsteht der quadratische Mittelwert, ermittelbar sowohl gleitend als auch über einen fixen Abschnittsbereich:

$$\bar{h}^2 = \frac{1}{L} \sum_1^N h_i^2 \quad \text{Gleichung 9}$$

$N$               Anzahl der Messwerte in Abschnittslänge, über die der Kennwert gebildet wird.

Als eine für die Ebenheit charakteristische Größe wird häufig die Varianz des gleitenden Mittelwertes angegeben (die Abweichungen des Einzelwertes vom Mittelwert), sie reagiert vor allem stark auf Einzelspitzen:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_1^N (h_i - \bar{h}_i)^2 \quad \text{Gleichung 10}$$

Daraus ergibt sich die Standardabweichung mit:

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma^2} \quad \text{Gleichung 11}$$

Abschnitts- sowie Basislängen für die Mittelwertbildung sind in den nationalen Normen und Richtlinien festgelegt, sowie im Zusammenhang mit der Bildung der folgenden Kennwerte auch im internationalen Normenwerk.

In Frankreich ist der Wert für Abschnittslängen von 100 m, bei unterschiedlicher Basislänge für die Mittelwertbildung, als Coefficient de Planéité definiert [10]. In der Schweizer Norm [25] sind Abschnittslängen von 250 m vorgeschrieben. In Deutschland [24] ist die Bildung der Standardabweichung mit Basis gleitender Mittelwert bei 1 m, 3 m, 10 m und 30 m vorgesehen.

Aus eben diesen Kennwerten und dem subjektiven Empfindungen von Versuchspersonen wurde im Zuge von umfassenden Untersuchungen des britischen Transport and Road Research Laboratory (TRRL) ein Beurteilungshintergrund erstellt, der eine schnelle Klassifizierung des gemessenen Straßenabschnitts ermöglicht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-3 dargestellt.

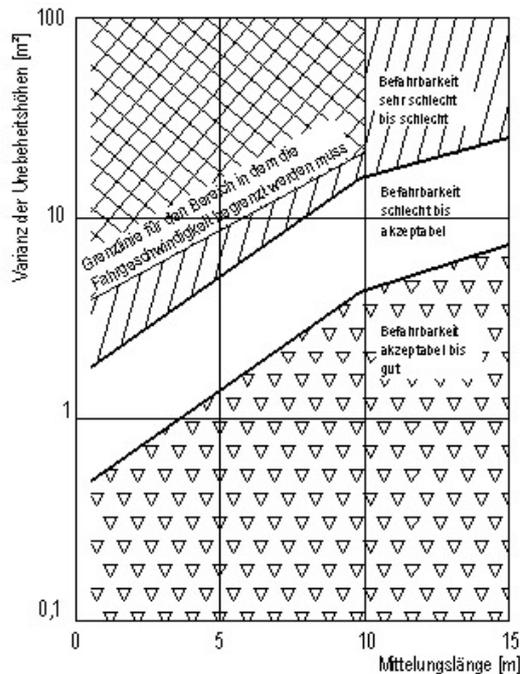


Abbildung 3-3: Klassifizierung nach Varianz der Unebenheitshöhen und subjektivem Empfinden [11].

### 3.3.2 Auswertung von Neigungsdaten

#### 3.3.2.1 Standardabweichung der Winkelwerte (Slope Variance)

Als Kenngröße der Ebenheit kann abschnittsweise die Standardabweichung der Winkelwerte (Definition siehe Abschnitt 2.1.3) ermittelt werden:

$$s_w = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[ \sum_{i=1}^N (W_i)^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N W_i \right)^2 \right]}$$

Gleichung 12

$N$  Anzahl der Messwerte

Diese Auswertungsmethode findet sich auch in der Schweizer Norm [25] wieder, wobei die Abschnitte mit einer konstanten Länge von 250 m festgelegt sind. In einem weiteren Schritt werden diese Ergebnisse in Abhängigkeit vom zu beurteilenden Straßentyp bestimmten vorgegebenen Klassen zugeordnet (1 = gut bis 5 = schlecht).

### 3.3.2.2 Present Serviceability Index (PSI)

Die Entwicklung dieser Kennzahl erfolgte im Zuge der Befahrbarkeitsuntersuchungen des AASHO-Tests im Jahre 1979. Hierfür wurden insgesamt 123 verschiedene Streckenabschnitte von Testpersonen abgefahren, die die jeweilige Strecke im Bezug auf ihre Befahrbarkeit beurteilten. Diese Werte brachte man mit den Zustandsgrößen der Straße in Zusammenhang und unterzog sie einer statistischen Auswertung. Dabei ergaben sich nach [8] folgende Beziehungen:

Flexible Bauweisen

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log(1 + \overline{SV}) - 0,01 \sqrt{C + P} - 1,38 \overline{RD}^2$$

Gleichung 13

Starre Bauweisen (Betondecken)

$$PSI = 5,41 - 1,81 \log(1 + \overline{SV}) - 0,09 \sqrt{C + P}$$

Gleichung 14

$\overline{SV}$  Mittelwert der dimensionslosen Neigungsvarianz

$C$  Rissbeiwert in (Fuß/1000 Quadratfuß) bei einfachen Rissen oder in (Quadratfuß /1000 Quadratfuß) bei Netzzissen

$P$  Flickstellen in (Quadratfuß/1000 Quadratfuß)

$\overline{RD}$  mittlere Spurtiefe in (Zoll), bezogen auf eine Basis von 1,22 m

Grundsätzlich werden Grenzwerte für die Befahrbarkeit von Hochleistungsstraßen von  $PSI = 2,5$  und im niederrangigen Netz von  $PSI = 2,0$  vorgeschlagen. Vereinfacht kann unter Vernachlässigung von Fahrbahnrisen, Flickstellen und Spurrinnen ein **Befahrbarkeitsindex** nach [11] ermittelt werden:

Flexible Bauweisen

$$P^* = 5,03 - 1,91 \log(1 + SV)$$

Gleichung 15

Starre Bauweisen

$$P^* = 5,41 - 1,80 \log(1 + SV)$$

Gleichung 16

Die Neigungsvarianz ist in diesem Zusammenhang definiert als:

$$SV = \frac{1}{1-n} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]$$

Gleichung 17

$n$  Zahl der gemessenen Neigungswerte

$x_i$  i-te Neigungsermittlung [%o]

$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  Mittelwert aus n Neigungsmessungen [%o]

Hieraus lässt sich ein Zusammenhang zur Spektralen Dichte (vgl. Kapitel 3.3.3) herstellen:

$$SV = \sigma_w^2 = \int_0^\infty \Phi_w(\Omega) \cdot d\Omega = \int_0^\infty |H_w(\Omega)|^2 \cdot \Phi_h(\Omega) \cdot d\Omega \quad \text{Gleichung 18 aus [26]}$$

$H_w(\Omega)$  Übertragungsfunktion des Winkel-, Neigungsmessgerätes

Stellt man dieses nun in Abhängigkeit von der Wellenlänge dar ( $\Omega=2\pi/L$ ), ergibt sich die Neigungsvarianz zu:

$$SV = \Phi_h(\Omega_0) \cdot \Omega_0^w \cdot (2\pi)^{i-w} \underbrace{\int_0^L |H_w(L)|^2 L^{w-2} dL}_{\text{gleiches } w = \text{Konstante}} \quad \text{Gleichung 19}$$

So betrachtet ergeben sich für relativ unterschiedliche Kombinationen von  $w$  und  $\Phi_h(\Omega_0)$  die gleichen Neigungsvarianzen. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob diese Zusammenfassung der Informationen gerechtfertigt ist, oder ob dies nicht die Aussagekraft des Kennwertes deutlich schmälert.

### 3.3.3 Spektrale Dichte der Unebenheiten (Power Spectral Density / PSD)

#### 3.3.3.1 Mathematische Grundlagen

Für die Entwicklung der Spektralen Dichte bedient man sich der Annahme, dass alle Unebenheiten einer Straße durch eine unendlich große Anzahl an Sinusschwingungen beschrieben werden können. Die Unebenheiten werden definitionsgemäß als gleichmäßig und regellos betrachtet. In Abbildung 3-4 wurde beispielsweise ein Profil aus 4 periodischen Schwingungen unterschiedlicher Wellenlänge zusammengesetzt.

Bei einem Fahrbahnlängsprofil mit rein periodischen Anteilen können diese Schwinganteile durch eine Fourierreihenentwicklung exakt ermittelt werden:

$$h(x) = \sum_{i=0}^n \underline{H_i(x)} * e^{j\Omega x} \quad \text{Gleichung 20 aus [45]}$$

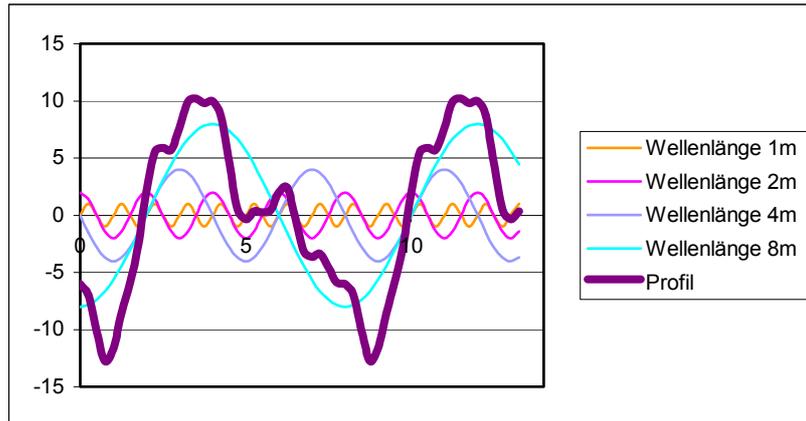


Abbildung 3-4: Zusammengesetztes Profil aus periodischen Schwingungen nach [27].

Da die Straßenoberfläche aber eine völlig unregelmäßige Funktion darstellt, muss dies auch mathematisch durch den Übergang zum Integral abgebildet werden. Dieser Vorgang ist gleichbedeutend mit der Aufsummierung unendlich vieler Schwingungen.

$$h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{H}(\Omega) * e^{j\Omega x} d\Omega \quad \text{Gleichung 21 aus [45]}$$

$h(x)$  Höhenprofil

$\underline{H}(\Omega)$  Amplitudenspektrum (komplex)

$\Omega = \frac{2\pi}{L}$  Wegkreisfrequenz

$L$  Wellenlänge

Bei konstanter Geschwindigkeit, da  $\omega = v \cdot \Omega = 2\pi \frac{v}{L}$  und  $\underline{H}(\omega) = (1/v) * \underline{H}(\Omega)$ , ergibt sich:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{H}(\omega) * e^{j\omega t} d\omega \quad \text{Gleichung 22}$$

Man erhält über die Fouriertransformation, diese ermöglicht die Betrachtung der Daten in Abhängigkeit von der Wegkreisfrequenz beziehungsweise auch der Wellenlänge, das Amplitudenspektrum:

$$\underline{H}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) * e^{-j\Omega x} dx \quad \text{Gleichung 23}$$

Mit diesem ergibt sich dann die Spektrale Dichte zu:

$$\Phi_h(\Omega) = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{4\pi}{X} [\underline{H}(\Omega)]^2 \quad \text{Gleichung 24 aus [28]}$$

Diese Beziehung gilt für  $x \rightarrow \infty$ , das heißt nur wenn die Strecke  $x$  sehr groß wird.

In der Literatur wird auch vom quadratischen Mittelwert ausgegangen (lt. Gleichung 9), von diesem erhält man direkt über die Fouriertransformation die Spektrale Dichte:

$$\Phi_h(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{h}^2 e^{-j\Omega x} dx \quad \text{Gleichung 25 aus [29]}$$

Wobei auch hier bei konstanter Geschwindigkeit die Darstellung in Abhängigkeit von der Frequenz möglich ist:

$$\Phi_h(\omega) = \frac{1}{v} \Phi_h(\Omega) \quad \text{Gleichung 26}$$

Zur besseren Verständlichkeit sei zusammenfassend gesagt, dass die Spektrale Dichte die Verteilung der Varianz der Variablen (Höhe, Neigung,..) über die Wellenzahl oder auch die Wellenlänge angibt. Betrachtet man den Graphen, der sich durch das Auftragen der Spektralen Dichte bei der zugehörigen Wegkreisfrequenz ergibt (siehe Abbildung 3-5: Darstellung des Unebenheitsspektrums) so entspricht die Varianz der Fläche unter dem Graphen (immer vorausgesetzt der Mittelwert ist 0), dargestellt auch in folgender Gleichung:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} \Phi_h(\Omega) d\Omega \quad \text{Gleichung 27 aus [30]}$$

Die Spektrale Dichte, wie in der nachfolgenden Graphik (Abbildung 3-5) im doppelt-logarithmischen Maßstab dargestellt, ergibt bei Daten aus Straßenlängsprofilen annähernd eine Gerade. Diese wird auch Unebenheitsspektrum genannt und kann durch die Braunsche Ausgleichsgerade beschrieben werden:

$$\Phi_h(\Omega) = \Phi_h(\Omega_0) \left[ \frac{\Omega}{\Omega_0} \right]^{-w} \quad \text{Gleichung 28}$$

$\Phi_h(\Omega_0)$  Unebenheitsmaß bei einer bestimmten Bezugswegkreisfrequenz  $\Omega_0$

$w$  Welligkeit, gibt die Verteilung in kurz- oder langwellig an

$$w = \frac{\ln \Phi_2 - \ln \Phi_1}{\ln \Omega_1 - \ln \Omega_2}$$

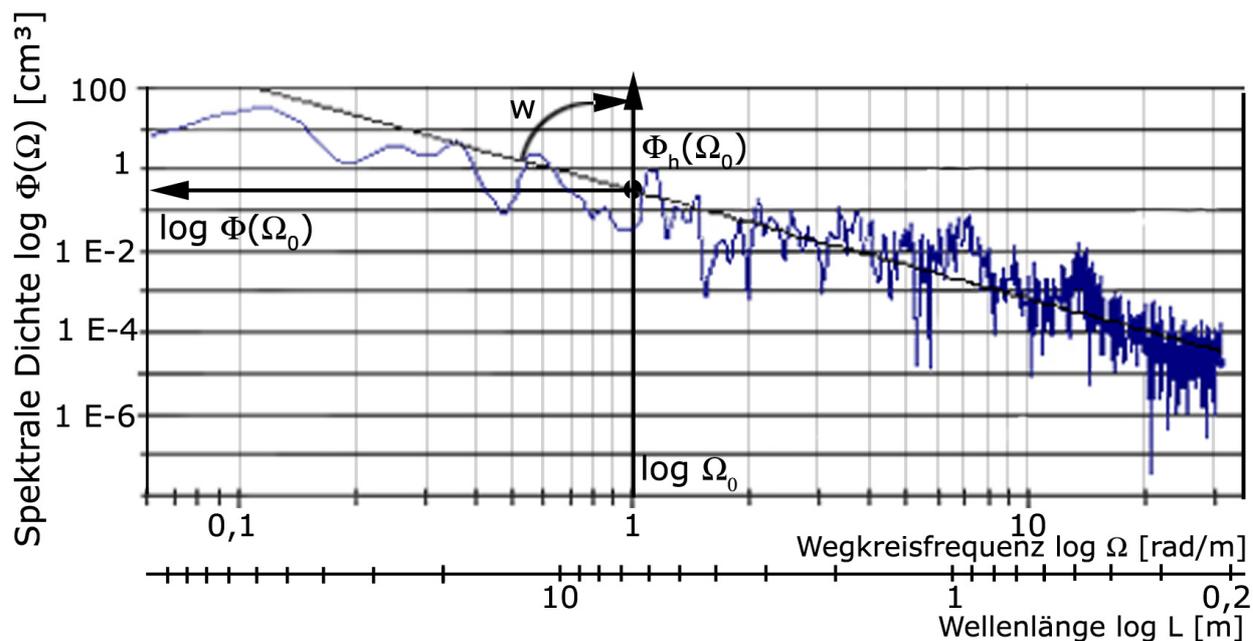


Abbildung 3-5: Darstellung des Unebenheitsspektrums

Die hier dargestellte Gerade gilt grundsätzlich für eine konventionelle Straße. Im Allgemeinen kann daraus geschlossen werden, dass lange Wellen (kleine Wegkreisfrequenzen) mit großen Amplituden hauptsächlich den Fahrkomfort beeinträchtigen und kurze Wellen (große Wegkreisfrequenzen) mit kleinen Amplituden einen Einfluss auf die Fahrsicherheit und die Straßenbeanspruchung besitzen. Die Welligkeit  $w$  beträgt im Bereich der Straßenverkehrstechnik zwischen 1,5 und 3.

Periodizitäten lassen sich anhand des Spektrums gut erkennen, da sich dort die Spektrale Dichte deutlich von der Ausgleichsgeraden abhebt. Sie erscheinen meist mit ihrer Grundschwingung und den dazugehörigen Oberschwingungen ( $n \cdot \Omega_1$ ;  $n = 2, 3, \dots$ ).

Die Spektrale Dichte kann nicht nur vom Unebenheitsprofil sondern in gleicher Weise auch vom Neigungsprofil (erste Ableitung des Unebenheitsprofils) oder vom Krümmungsprofil (zweite Ableitung des Unebenheitsprofils) ermittelt werden.

### 3.3.3.2 Praktischer Berechnungsablauf

Für das Erzielen von sauberen Ergebnissen müssen in einem ersten Schritt die Daten des Gesamtprofils von langwelligen Trends bereinigt werden (Bildung des gleitenden Mittelwerts), wobei sowohl die Schrittweite als auch der Bereich, der für die Mittelung betrachtet wird, großen Einfluss auf das Ergebnis nehmen. Für die weiteren Berechnungen muss der Mittelwert auf 0 gesetzt werden, das heißt in jedem Punkt wird von der gemessenen Höhenkote der errechnete Mittelwert abgezogen (anschaulich ist dies in Anhang A unter „bereinigtes Profil“ dargestellt).

Manche Aufnahmegeräte hinterlassen ihre Spuren (Trends) in den aufgenommenen Daten. Diese müssen, um die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, eliminiert werden. Dies kann durch eine Division mit der Übertragungsfunktion erreicht werden.

Die weitere Betrachtung der Daten erfolgt abschnittsweise, wobei die Abschnittslänge abhängig von der höchsten noch zu berücksichtigenden Wellenlänge ist. Laut [11] sollte der Abschnitt 4mal so lang wie die maximale Wellenlänge sein. In Deutschland werden beispielsweise Datensätze zu je 1024 Daten bearbeitet, dies entspricht einer Abschnittslänge von 102,4 m mit Daten alle 10 cm, beziehungsweise 100 m, da eine Überlappung von 1,2 m am Anfang und am Ende des Abschnitts vorgesehen ist. Das „Sample Interval“ (Abstand der aufgenommenen Daten) ist durch das Nyquist Kriterium festgelegt. Dieses besagt, dass die kleinste feststellbare Wellenlänge dem doppelten „Sample Interval“ entspricht.

Für den Rechenalgorithmus wird das Abschnittsprofil wiederholt hintereinander gestellt, um den dadurch entstehenden Transformationsfehler (Leakage) zu reduzieren und Sprünge bei der Spektralanalyse zu vermeiden. An den Enden des zu betrachtenden Abschnitts müssen die Daten mittels CDTW (Cosinus Digital Tapering Window) auf Null gebracht werden (Details siehe [11], [23]).

Das so vorbereitete Profil kann nun mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT; Bezeichnung des Algorithmus zur schnellen Berechnung der Fourierkoeffizienten) in Amplituden und Phaseninformation der enthaltenen Schwingungen getrennt werden (die Anzahl der Datenpunkte muss eine Potenz von 2 sein). Für die richtige Größe der Amplitude ( $H(\Omega_i)$ ) ist eine Normierung des Betrags der FFT durch die Division der Anzahl der Spektrallinien ( $N/2$ ) vorzunehmen. Weiters ist zu beachten, dass nur Informationen über die zugehörigen Wegkreisfrequenzen  $i \cdot \Delta\Omega$  mit  $i=0,1,\dots,N/2$  gewonnen werden können, da die Lösungen  $i=N/2+1,\dots,N-1$  konjugiert komplex symmetrisch um die mittlere Frequenz liegen [31].

Graphisch stellt sich das Amplitudenspektrum als Amplitude aufgetragen gegenüber der dazugehörigen Wegkreisfrequenz dar. Dessen Grenzen ergeben sich aus der maximal aufgenommenen Wellenlänge  $L_{max}$ , gleichzusetzen mit der Abschnittslänge und dem minimalen Messpunktabstand  $\Delta x (=L_{max}/N)$ .

$$\Omega_{\min} = \frac{2\pi}{L_{\max}} = \Delta\Omega \qquad \Omega_{\max} = \frac{2\pi}{2\Delta x} \qquad \text{Gleichung 29}$$

Die Spektrale Dichte erhält man als Quadrat der Amplitude bezogen auf die doppelte Frequenzauflösung  $\Delta\Omega$ .

$$\Phi_h(\Omega_i) = \frac{(H(\Omega_i)_{norm})^2}{2 \cdot \Delta\Omega} \qquad \text{Gleichung 30}$$

Sie muss noch durch das mittlere Gewicht des CDTW ( $c=8,875$ ) dividiert werden um dessen Einfluss zu eliminieren. Für eine gleichmäßige Unebenheitsdichte kann eine Glättung durchgeführt werden, wobei in einem ersten Schritt jeweils drei Werte nach folgender Gewichtung (HANNING) zusammengefasst werden:

$$\begin{aligned} H'_1 &= 0,5 \cdot H_1 + 0,5 \cdot H_2 \\ H'_k &= 0,25 \cdot H_{k-1} + 0,5 \cdot H_k + 0,25 \cdot H_{k+1} \quad \text{für } k = 2, 3, \dots, N/2-1 \\ H'_{N/2} &= 0,5 \cdot H_{N/2-1} + 0,5 \cdot H_{N/2} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 31}$$

Dann teilt man das Spektrum in Segmente, in welchen jeweils über konstante Bandbreiten eine mittlere Spektrale Dichte bezogen auf die mittlere Frequenz des Bandes bestimmt wird. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in pr EN 13036-5 [23].

Die gesuchte Ausgleichsgerade (siehe Gleichung 28) kann mit Hilfe der Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen eingepasst werden (geometrische Kurvenanpassung).

Ausgehend von dem oben beschriebenen Verfahren wurde von Steinauer und Ueckermann ein **vereinfachtes Verfahren** entwickelt [32].

Es besteht lediglich aus drei Verfahrensschritten:

- Trendbereinigung  
Statt der gleitenden Mittelwertberechnung werden im betrachteten Abschnitt der erste und letzte Punkt miteinander verbunden und die Profilhöhen von dieser Bezugsgerade abgezogen.
- die Berechnung der Spektralen Dichte mittels FFT  
Hierfür werden die gleichen Formeln wie bei dem konventionellen Verfahren angewandt.
- Linearisierung des Spektrums zur Ermittlung von  $\Phi_h(\Omega_o)$  und  $w$   
Nach dem Prinzip der Leistungserhaltung (gleiche Flächen unter den Kurven) wurde das Verhältnis der Leistung des langwelligen Bereichs ( $L = 100 - 10 \text{ m}$ ) zum Gesamtleistungsinhalt als Funktion der Welligkeit umgeformt. Sie kann als Kennlinie aufgefasst werden, in welche der jeweilige Wert

$$\frac{P_{\text{gesamt}}}{P_{\text{langwellig}}} = \frac{\sum_1^{511} \Phi_h(\Omega_i)}{\sum_1^{10} \Phi_h(\Omega_i)} \quad \text{Gleichung 32}$$

eingesetzt die gesuchte Welligkeit ergibt. Das für die Bestimmungsgleichung benötigte Unebenheitsmaß ergibt sich somit zu:

$$\Phi_h(\Omega_0) = \frac{\sum_1^{511} \Phi_h(\Omega_i)}{\sum_1^{511} (\Omega_i^{-w})}$$

Gleichung 33

Vergleichsuntersuchungen zwischen der konventionellen Methode und dem vereinfachten Verfahren ergaben, dass die Fehler beider Verfahren im gleichen Größenbereich liegen, wobei ersteres aufgrund des CDTW Straßen mit geringen Welligkeiten unterbewertet und Straßen mit großen Welligkeiten überbewertet. Hingegen ist beim vereinfachten Verfahren keine eindeutige Tendenz erkennbar.

### 3.3.4 Allgemeines Unebenheitsmaß (AUN)

Beim „Allgemeinen Unebenheitsmaß“ handelt es sich um eine in Deutschland entwickelte Zustandsgröße, die das Leistungsdichtespektrum durch eine Gerade beschreibt. Sie hat als ersten Kennwert (=AUN) die spektrale Unebenheitsdichte bei einer Wegkreisfrequenz  $\Omega_0 = 1/m$  (entspricht einer Wellenlänge von  $L = 2\pi/\Omega_0 = 6,28$  m) und als 2. Kennziffer die dazugehörige Welligkeit ( $w = \tan \alpha =$  Steigung der Braunschen Gerade) [33]. Beides ist aus einem Graphen gemäß Abbildung 3-5 abzulesen.

Die Berechnung der Spektralen Dichte aus dem Straßenprofil erfolgt wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben.

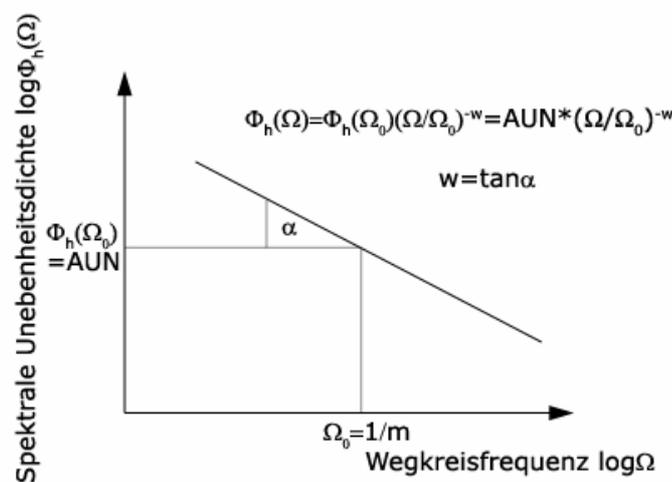


Abbildung 3-6: nach [33]

Es ist nun möglich, für das Unebenheitsmaß fixe Grenzwerte anzugeben, wobei diese über eine Beschränkung der physischen Belastung des Fahrers über ein Schwingersatzsystem und deren Antwort auf die Straßenunebenheit ermittelt werden. Umgekehrt kann auch bei Vorgabe der

maximalen Belastung die dazugehörige spektrale Kenngröße angegeben werden, immer abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und der Einwirkungsdauer.

In Tabelle 3-2 sind mögliche Grenzwerte nochmals mit dem Subjektivurteil für die Ebenheit verknüpft dargestellt. Es ist anzumerken, dass von einer Welligkeit von 2 ausgegangen wird.

Unebenheitsmaß $\Phi_h(\Omega_0)$ bei $\Omega_0=1\text{m}^{-1}$ , $w=2$	Subjektivurteil
0 – 2	sehr gut
2 – 8	gut
8 – 32	mittel
32 – 128	schlecht
128 – 512	Sehr schlecht

Tabelle 3-2: Zusammenspiel von Unebenheitswerten und Subjektivurteilen [28].

In Deutschland liegt der Warnwert für Autobahnen bei  $3\text{ cm}^3$  (Schwellenwert bei  $9\text{ cm}^3$ ) bei einer Welligkeit von 2, wobei nur *AUN*-Werte mit gleicher Welligkeit verglichen werden.

Rechnet man beispielsweise die Varianz hinsichtlich *AUN* und  $w$  zurück, können sich trotz gleichem *AUN* die Ergebnisse bis zu einem Faktor 17 unterscheiden [34]. Es konnte festgestellt werden, dass Schäden im kurzwelligen Bereich durch eine gute Ebenheit im langwelligen Bereich rechnerisch kompensiert werden. Ebenso kann das Ergebnis von verstärkten Unebenheiten im langwelligen Bereich, sowie im kurzwelligen sehr ähnlich ausfallen, wobei die Wirkung eine gänzlich unterschiedliche ist. Da die Berechnung des Kennwertes auf der Bildung von Mittelwerten beruht, können auch Einzelunebenheiten nicht optimal berücksichtigt werden. Dieser Kennwert hat sich für die Beschreibung von regellosen Unebenheiten sehr gut bewährt, jedoch können Einzelhindernisse, wie beispielsweise Plattenversätze von Betonstraßen, nicht ausreichend erfasst werden, da diese die Lage der Ausgleichsgerade nicht entsprechend ihrer Störwirkung verschieben.

### 3.3.5 Wave Band Analysis (Wellenbandanalyse)

Im Rahmen der Wellenbandanalyse wird nicht das Spektrum als Gesamtes betrachtet, sondern es erfolgt eine Aufspaltung in drei Oktaven. Dies geschieht durch Filterung der Daten, wie dem folgenden Beispiel entnommen werden kann [10]:

- Lowpass Filter (lässt lange Wellen durch): 12,5 - 50 m
- Bandpass Filter (für mittlere Wellen): 3,125 - 12,5 m
- Highpass Filter (lässt kurze Wellen durch): 0,78125 - 3,125 m

Dargestellt sind diese Wirkbereiche in Abbildung 3-7.

Jedes Wellenband kann nun einzeln bewertet werden, zumeist über den Energieinhalt (Summe der quadrierten Amplitudenwerte dividiert durch die Abschnittslänge). Es besteht auch die Möglichkeit, eine äquivalente Amplitude zu bestimmen, welche der Amplitude des Sinus der mittleren Wellenlänge des Bandes mit derselben Energie entspricht.

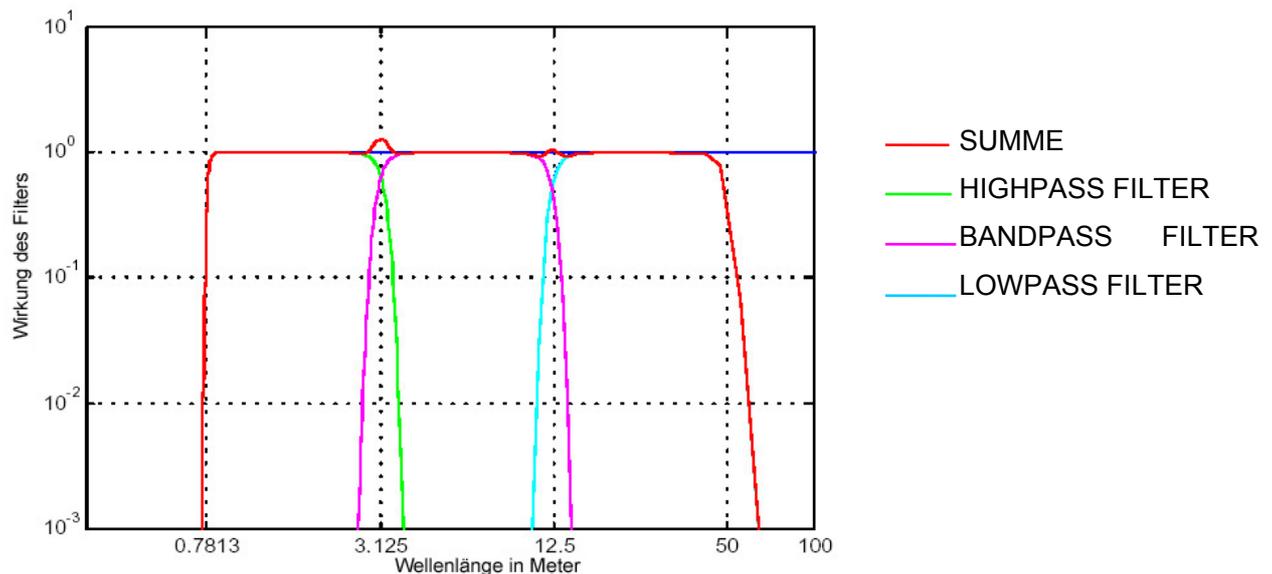


Abbildung 3-7: Wirkbereiche der Filter [10].

Die Summe aller drei Bänder sollte auf jeden Fall das originale Profil ergeben, welches jedoch durch eine schlechte Filtereinstellung verschoben werden kann.

Die Aufspaltung der Wellenlängen korreliert auch mit der später noch genauer erläuterten Wirkung der Wellen auf die Fahrzeuge. So sind kurze Wellen vermehrt für die Lenkbarkeit des Fahrzeugs, den Fahrkomfort (aufgrund von niederfrequenten Vibrationen), die Lärmemissionen und die Schwingungen von angrenzenden Bauwerken verantwortlich. Wellen, die durch den „low-pass“ Filter durchkommen, beeinflussen die Fahrzeugstabilität sowie den Benzinverbrauch [35].

Die Wellenbandanalyse kommt zur Auswertung der Daten des APL zum Einsatz, jedoch sind die Filter in diesem Fall mit anderen Grenzen belegt [3]:

- kurze Wellenlängen: 1,0 - 3,3 m
- mittlere Wellenlängen: 3,3 – 13 m
- lange Wellenlängen: 13 – 40 m

Die Auswertung erfolgt über den Energieinhalt oder über eine 10 Punkte Skala (Note par Bande d'Onde, NBO).

### 3.3.6 Wavelet Transformation

In Kapitel 3.3.3 wurde schon die Fouriertransformation erläutert, deren Ziel es ist, das Unebenheitsprofil durch Überlagerung von Sinusfunktionen darzustellen und dadurch die enthaltenen Frequenzanteile (oder auch Wellenlängen) sichtbar zu machen. Der gleiche Gedanke steht nun auch hinter der Transformation mittels Wavelets, dabei werden jedoch statt den in ihrer Ausdehnung unendlichen Sinus- und Kosinus-Basisfunktionen so genannte „Mother Wavelets“, die nur ein begrenztes Zeit- oder Wegintervall von Null verschieden sind, an den Ebenheitsverlauf angepasst. Dies bietet den Vorteil, dass sie nicht nur im Frequenzbereich, wie die Basisfunktionen der Fouriertransformation, sondern in Frequenz und Zeitbereich (im Falle von Ebenheitsproblemen im Wegbereich) lokalisierbar sind. Das heißt, es ist ermittelbar, welche Frequenzen (oder auch Wellenlängen) in dem zu untersuchenden Profil vorhanden sind und wann bzw. wo diese auftreten. Auch können durch diese Eigenschaft Einzelereignisse besser detektiert werden.

Die oben erwähnten Mother Wavelets können aus einer Vielzahl von verschiedenen Formen gewählt werden, wie beispielsweise das geometrisch einfache Haar-Wavelet oder auch das Sym4-Wavelet, die in Abbildung 3-8 dargestellt sind. Erwähnenswert ist außerdem das Daubechies-Wavelet, welches eine fraktale Struktur aufweist und diese in sich wiederholt [36] und in Abbildung 3-9 dargestellt ist. Mother Wavelets werden durch Streckung, Stauchung und Verschiebung optimal an die Situation angepasst.

Wavelets lassen sich in folgender Weise darstellen:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \psi \cdot \left( \frac{x-b}{a} \right) \quad \text{Gleichung 34}$$

- $a = 2^m$       Skalierungsparameter
- $b = n \cdot 2^m \cdot \tau$       Verschiebungsparameter
- $\tau = 1$       Grundschrift der Verschiebung auf der Wegachse
- $\psi$       Mother Wavelet

Die kontinuierliche Wavelet Transformation ist nun definiert als:

$$W_{\psi}(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) \cdot \psi_{a,b}(x) \cdot dx = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} h(x) \cdot \psi \left( \frac{x-b}{a} \right) \cdot dx \quad \text{Gleichung 35}$$

- $h(x)$       das zu transformierende Signal

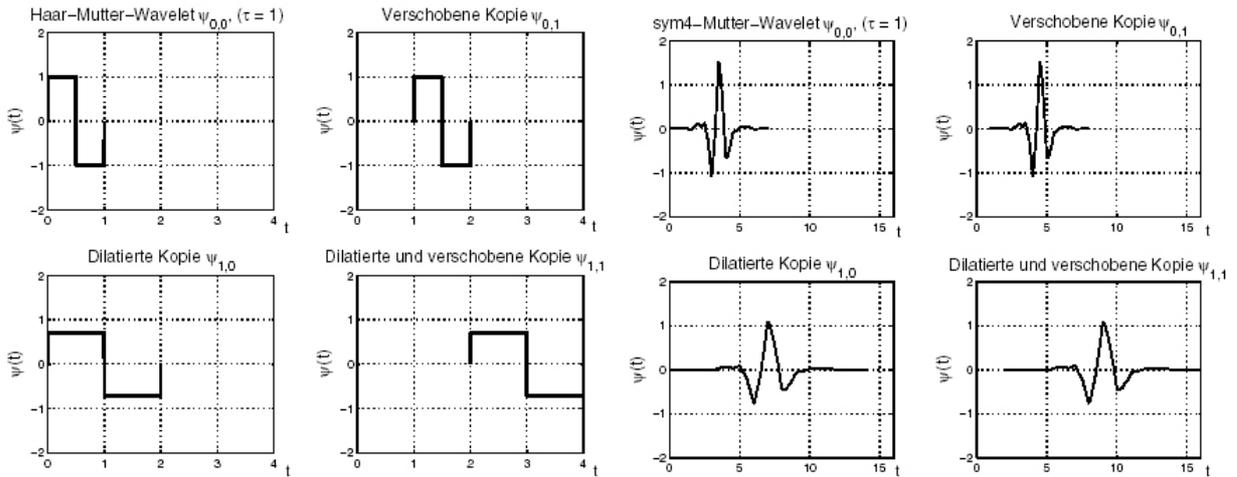


Abbildung 3-8: verschiedene Mother Wavelets [37].

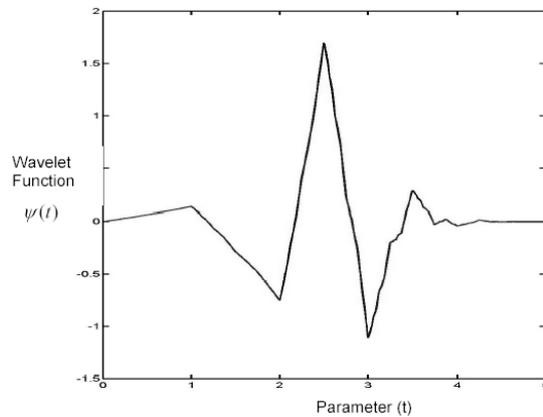


Abbildung 3-9: Daubechies Mother Wavelets [38].

Je nach gewählter Form des Wavelets ist eine bessere Lokalisierung im Weg- oder im Frequenzbereich erzielbar. Es ist gut nachvollziehbar, dass Einzelereignisse besser durch enge Basisfunktionen festgelegt werden können. Eine hohe Genauigkeit im Wegbereich wird durch Mutter Wavelets hoher Frequenzen, Genauigkeit im Frequenzbereich durch Mother Wavelets niedriger Frequenzen erreicht [39]. Festgelegt wird diese durch den Skalierungsparameter  $a$  und die dem gewählten Wavelet zugehörige Konstante  $f_c$ .

$$f = \frac{f_c}{a}$$

Gleichung 36

Ähnlich wie bei der Fouriertransformation wird auch hier für diskret verteilte Signale die Transformation angepasst in eine „Diskrete Wavelet Transformation“ (DWT) überführt, wobei ein gleichmäßiger Abstand der Daten vorausgesetzt wird.

$$W_\psi(i, j) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot 2^{\frac{j}{2}} \cdot \psi(2^j n - i)$$

Gleichung 37

---

$s(n)$	Eingangswerte
$i$	Position
$j$	Level der Auflösung / Detailierungsgrad

Die Berechnung erfolgt über Filteralgorithmen, die jeweils einen bestimmten Frequenzbereich zusammenfassen. Für Betrachtungen von Straßenunebenheiten haben sich folgende Abgrenzungen bewährt [40]: 0-0,11; 0,11-0,21; 0,21-0,41; 0,41-0,82; 0,82-1,64 und 1,64-3,28 Umdrehungen/m. Die entsprechenden Wellenlängen hierzu betragen: größer 9,6 m; 4,9-9,6 m; 2,4-4,8 m; 1,2-2,4 m; 0,6-1,2 m und 0,3-0,6 m.

Einzelhindernisse treten besonders im letzten Frequenzbereich deutlich zum Vorschein.

Ein weiterer Vorteil, der sich durch die Anwendung der Wavelet Transformation ergibt, ist der wesentlich geringere Rechenaufwand durch die Berücksichtigung der Selbstähnlichkeit der Wavelets. Beträgt dieser bei der DWT  $N$ , so sind es bei der FFT schon  $N \cdot \log_2 N$  Schritte.

Im japanischen Raum kommen Wavelets noch für andere Anwendungen zum Einsatz und zwar finden dort keine vorgefertigten Mother Wavelets Verwendung, sondern diese werden mit freien Parametern erweitert und dann auf die straßenspezifischen Daten angepasst [41]. Ziel ist es, mit diesen auf spezielle Merkmale trainierten Basisfunktionen schadhafte Stellen (die dieses Merkmal enthalten) zu detektieren. Die Auswertung erfolgt über die Darstellung der Korrelation zwischen Wavelet und aufgenommenen Straßendaten.

### 3.3.7 Das bewertete Längsprofil

Diese Bewertungsmethode basiert auf der weiter oben schon definierten Spektralen Dichte (Kapitel 3.3.3), dem Längsebenheitswirkindex (LWI – Kapitel 3.4.5) und den in Deutschland festgelegten Ziel-, Warn- und Schwellenwerten (bei 1, 3 und 9  $\text{cm}^3$  für Bundesfernstraßen) und führt diese von einer wellenlängenabhängigen in eine wegabhängige Darstellung über. Das Ziel dieser Methode besteht darin, anhand des Längsprofils ohne Einfluss von Geschwindigkeit, Fahrzeug und ähnlichem eine aussagekräftige Bewertung der Längsebenheit vornehmen zu können, wobei auch die Möglichkeit der Lokalisierbarkeit von Schadstellen einen großen Vorteil bietet.

Die Grenzfunktion, gleichbedeutend mit dem Grenzverhältnis von Hindernishöhe zu Wellenlänge, unter welcher es zu keiner Übertretung des LWI Grenzwertes kommt, wird aus der Definition des LWI (siehe Kapitel 3.4.5) bei  $w=2$  entwickelt. Insofern muss die Unabhängigkeit von Wirk- und Fahrzeugmodellen etwas in Frage gestellt werden, da der LWI solche Modelle beinhaltet.

$$LWI = \frac{q_{\max}^2}{q_{\text{ref}}^2} = \text{const.} = \frac{V_q^2(L) \cdot \hat{h}^2}{3,29^2 \cdot \int V_q^2(L) \cdot \Phi_h(L) dL} \quad \text{Gleichung 38}$$

$\hat{h}$  ist die Anregungs-Amplitude, die  $h(L)=2\hat{h}$   
 $V_q$  Übertragungsfunktion des Filters  $q$

Der Nenner wird über die Grenzen des Oktavbandfilters integriert, und die Leistung kann als gute Näherung für periodische Unebenheiten durch das Produkt aus der Spektralen Dichte des Oktavbandmittelwertes ( $\bar{L}$ ) und der Bandbreite ( $\Delta L$ ) ersetzt werden:

$$\int V_q^2(L) \cdot \Phi_h(L) dL = V_q^2(\bar{L}) \cdot \Phi_h(\bar{L}) \cdot \Delta L = V_q^2(\bar{L}) \cdot \Phi_h(\Omega_0) \cdot \frac{\Omega_0^2 \cdot \Delta L \cdot \bar{L}}{2\pi \cdot \bar{L}}$$

Gleichung 39

Dies eingesetzt in Gleichung 37, mit dem Wissen, dass für Oktaven  $\Delta L/\bar{L}=2/3$  gilt, ergibt sich:

$$h(\bar{L}) = \frac{2 \cdot 3,29}{\sqrt{3\pi}} \cdot \Omega_0 \sqrt{\Phi_h(\Omega_0)} \cdot \sqrt{LWI} \cdot \sqrt{\bar{L}} \quad \text{Gleichung 40}$$

Für eine sehr gute Straße mit periodischen Unebenheiten gilt:

$$\Phi_h(\Omega_0) = AUN = 1\text{cm}^3; \Omega_0=1/\text{m}; LWI=1; \quad h(\bar{L}) = 2,2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\bar{L}} \text{ [m]}$$

Gleichung 41

Besteht die Anregung nur aus Einzelhindernissen, verschiebt sich die Grenzgerade nach oben, das heißt die ausschlaggebenden Werte dürfen um rund 70% höher liegen.

Den zweiten Teil der Bewertungsfunktion stellt die maximal zulässige Referenzamplitude bzw. Hindernishöhe bei einem vorgegebenen AUN (1 cm<sup>3</sup>) dar. Über die Beziehung zur Standardabweichung und der statistischen Abschätzung, dass in den normalverteilten Oktaven 99,9% der Werte in den Bereich  $\pm(3,29 \sigma)$  fallen, kann eine Grenzkurve definiert werden:

$$h_{\text{ref}} = 3,29\sigma_h = 3,29 \cdot \sqrt{\int \Phi_h(\Omega) d\Omega} = 3,29 \sqrt{\int \Phi_h(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w} d\Omega}$$

Gleichung 42 aus [34]

Unter der Annahme  $w=2$  und dargestellt in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $dL/d\Omega = \Omega^2/2\pi$  ergibt sich  $h$  zu:

$$h_{\text{ref}} = 3,29 \cdot \sqrt{AUN} \sqrt{\int \frac{\Omega_0^2}{2\pi} dL} = 3,29 \cdot \sqrt{AUN} \cdot \Omega_0 \cdot \sqrt{\frac{L_{\max} - L_{\min}}{2\pi}}$$

Gleichung 43

Die Bewertungsfunktion, als Verhältnis von Referenzamplitude zu Anregungsamplitude und unter der Annahme  $LWI = 1$ , ergibt sich aus Gleichung 40 und Gleichung 43 zu:

$$\frac{h_{ref}}{\hat{h}}(L) = \sqrt{\frac{3(L_{max} - L_{min})}{2L}} = B \quad \text{Gleichung 44}$$

Setzt man den betrachteten Wellenlängenbereich von  $L_{min} = 0,2$  m und  $L_{max} = 102,4$  m ein, erhält man die Bewertungsfunktion als:

$$B(L) = 12,4 \cdot L^{-0,5} \quad \text{Gleichung 45}$$

Bei einer Betrachtung in Abhängigkeit von der Wegkreisfrequenz stellt sich  $B$  dar als:

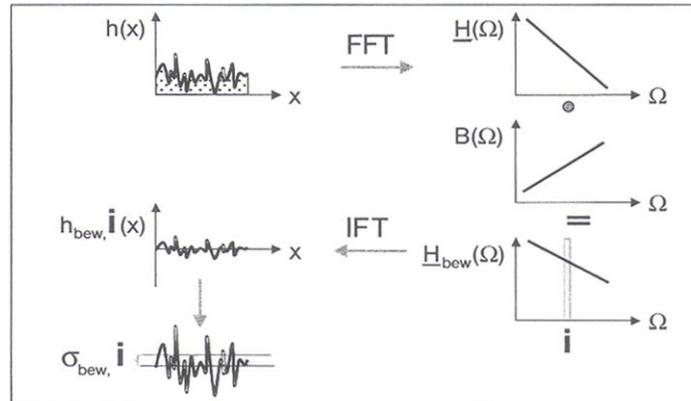
$$B(\Omega) = \frac{12,4}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{L}} = 4,95 \cdot \Omega^{0,5} \quad \text{Gleichung 46}$$

Mit Hilfe dieser Funktion wird das Ebenheitsprofil oktavenweise bewertet und in den Wegbereich rücktransformiert. Das Verfahren zielt darauf ab, Periodizitäten entsprechend ihrer vergleichsweise hohen Leistung (bei schmaler Bandbreite) wirkungsgetreu einfließen zu lassen. Allgemeine Unebenheiten erfahren eine ähnliche Bewertung wie durch den AUN bzw. LWI. Das Ergebnis der Betrachtung bildet die Berechnung der Standardabweichung und der Spannweite des bewerteten, rücktransformierten Profils. Diese Ergebnisse können mit den zugehörigen Ziel, Warn- und Schwellenwerten verglichen werden.

### 3.3.7.1 Praktischer Berechnungsvorgang:

Für die Berechnung ist es unumgänglich, die richtigen formalen Voraussetzungen zu schaffen, da mit der Entwicklung der Bewertungsfunktion schon einige Parameter fixiert wurden (beispielsweise der betrachtete Wellenlängenbereich).

Für eine Festlegung auf diesen Bereich werden alle Daten einer gleitenden Mittelwertberechnung unterzogen (Schrittweite 10 cm, Fenstergröße 102,4 m). Für den weiteren Vorgang wird das Profil in 100 m Abschnitte unterteilt, die jeweils einen Überlappungsbereich von 1,2 m zum vorherigen und nächsten Profilabschnitt dazu erhalten, daher ergibt sich eine Abschnittslänge von 102,4 m. Die weitere Vorgangsweise ist in untenstehender Abbildung 3-10 dargestellt.



**Abbildung 3-10: Ablaufschema der oktavbezogenen Bewertung des Unebenheitsprofils; genauer Rechenhergang [30].**

Die so vorbereitete Datenreihe wird einer Fourier-Transformation unterzogen und mit der Bewertungsfunktion multipliziert. Da bei Rechenprogrammen die negativen Frequenzen an den Teil der positiven angehängt werden, muss dies auch bei der Bewertungsfunktion berücksichtigt werden, sodass sich folgende Berechnungsvorschrift ergibt:

$$B(k) = 12,4 \sqrt{\frac{k}{L_s}} \quad \text{für } k=0,1,2,\dots,N/2 \quad \text{Gleichung 47}$$

$$B(k) = 12,4 \sqrt{\frac{N-k}{L_s}} \quad \text{für } k=N/2+1,N/2+2,\dots,N-1 \quad \text{Gleichung 48}$$

Das Profil wird in 9 Oktaven aufgespalten und in diesen in den Wegbereich rücktransformiert (mittels IFT). Für die Ermittlung der Standardabweichung und der Spannweite muss das Profil auf den 100 m Abschnitt reduziert werden und kann dann folgender Gewichtung unterzogen werden:

$$h_{bew}(x) = \sum_{i=1}^9 \frac{\sigma_i}{\sigma_{ges}} \cdot h_{bew,i}(x) \quad \text{Gleichung 49}$$

Aus dem so ermittelten bewerteten Längsprofil können die Kennwerte ermittelt werden:

$$\text{Standardabweichung } \sigma_{bew} = \sqrt{\frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} h_{bew}^2(i)} \quad \text{Gleichung 50}$$

$$\text{Spannweite } \Delta_{bew} = h_{bew,max} - h_{bew,min} \quad \text{Gleichung 51}$$

Rechnet man die Grenzwerte des AUN in  $\sigma_{bew}$  und  $\Delta_{bew}$  um, ergeben sie sich zu folgendem:

Indikator	Zielwert (AUN=1cm <sup>3</sup> )	Warnwert (AUN=3cm <sup>3</sup> )	Schwellenwert (AUN=9cm <sup>3</sup> )
$\sigma_{bew}$	4,5 mm	7,5 mm	12,5 mm
$\Delta_{bew}$	28 mm	48 mm	82 mm

**Tabelle 3-3: Grenzwerte für das bewertete Längsprofil [34].**

### 3.4 Beurteilung der Wirkung

Unebenheiten in der Fahrbahnoberfläche versetzen die darüber fahrenden Fahrzeuge in Schwingungen. Im Folgenden werden diese in Größe und Wirkung abgeschätzt. Hierbei sei angemerkt, dass natürlich eine Abhängigkeit von gefahrener Geschwindigkeit und spezifischen Fahrzeugeigenschaften besteht.

Am Offensichtlichsten für den Nutzer sind Schwingungen, die der Fahrer oder Beifahrer über den Sitz wahrnimmt, die direkt eine unangenehme subjektive Empfindung hervorrufen und die bei Dauerbelastung sogar bis hin zu gesundheitlichen Schäden führen können.

Es kommt auch zu einer zusätzlichen Belastung der Fahrbahn, da die Fahrzeuge durch Überfahren der Unebenheiten mit einem Teil ihres Gewichtes (im ungünstigsten Fall mit dem gesamten Gewicht) abheben und dann mit diesem wieder aufschlagen. Dadurch kann es bei einer guten Straße zu einer zusätzlichen Schädigung von maximal 7% kommen, bei schlechten Straßen steigt dieser Wert jedoch auf bis zu 200% an [42].

Allgemein kann der Zusammenhang zwischen Beschleunigung des Rades ( $b_R$ ) und Beschleunigung des Fahrersitzes ( $b_{FS}$ ) bzw. des Aufbaus (je nachdem welches Ziel die Berechnung hat) mittels eines Vergrößerungsfaktors dargestellt werden:

$$G(f) = (2\pi f)^2 \frac{b_{FS}}{b_R} \qquad \text{Gleichung 52 aus [8]}$$

Der Vergrößerungsfaktor kann einerseits durch Fahrversuche empirisch ermittelt werden, andererseits aber auch mit Hilfe eines geeigneten Ersatzmodells berechnet werden. Dies stellt die aufzunehmenden Kräfte dar, ist aber nicht gleichbedeutend mit der Intensität der Wahrnehmung.

Dieses Ersatzsystem soll den Rechenaufwand reduzieren, muss jedoch alle relevanten Bewegungsmöglichkeiten des Fahrzeuges zulassen. Je nach geforderter Genauigkeit kann ein System mit unterschiedlicher Detailschärfe verwendet werden, ebenso müssen auch die Unebenheitsdaten in unterschiedlicher Genauigkeit vorliegen. Mögliche Ersatzsystem mit unterschiedlichen Freiheitsgraden sind in Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 dargestellt.

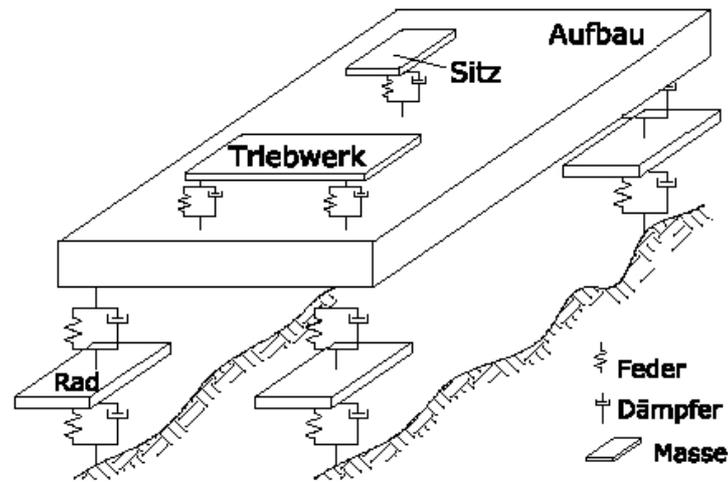


Abbildung 3-11: Beispiel eines räumlichen Zweiachs-Zweispur-Ersatzmodells, dieses ermöglicht die Anregung an vier Punkten [50].

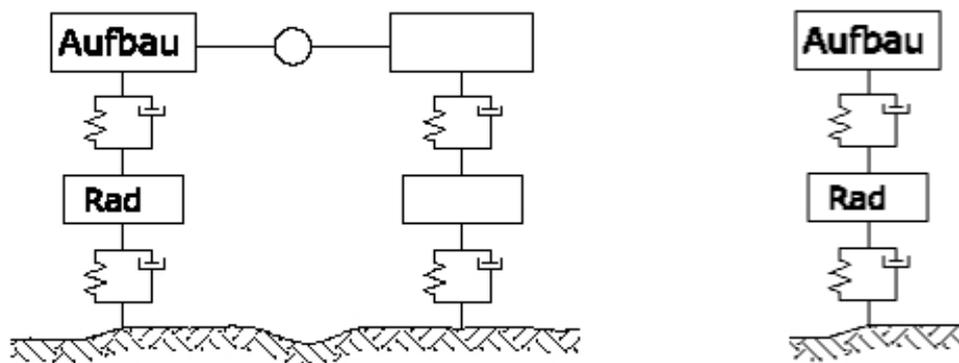


Abbildung 3-12: ebenes Zweiachs-Ersatzmodell (Zweipunktanregung) und Einachs-Ersatzmodell (Einpunktanregung) [50].

Die wesentlichen Reaktionen können schon aus dem einfachen Zwei-Massen-Model (einachsrig) ermittelt werden und kommen in den folgenden Verfahren auch am Häufigsten zum Einsatz. Zur weiteren Vereinfachung kann angenommen werden, dass die Reifendämpfung gegenüber der Aufbaudämpfung vernachlässigbar klein ist.

### 3.4.1 Wahrnehmungsstärke (Komfortziffer)

Für die Beurteilung der Schwingungsanregung in Bezug auf die menschliche Empfindung wurde schon in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts der Begriff der Wahrnehmungsstärke entwickelt. Sie ist abhängig von der Anregungsfrequenz, der Anregungsamplitude sowie der Einleitungsstelle. Zur leichteren Berechnung wird ein Gesamtwert

( $K_{ges} = \sqrt{K_{Sitz}^2 + K_{Fu\beta}^2 + K_{Hand}^2 + K_{\varphi}^2 + K_{\psi}^2}$ ) über alle Einleitungspunkte gebildet. Je höher die Wahrnehmungsstärke desto unangenehmer die Empfindung.

Sie definiert sich als:

$$K = W_i(f) \cdot b_{eff,i} \quad \text{Gleichung 53 aus [8]}$$

$W(f)$  Filtercharakteristik der menschlichen Empfindung nach VDI-Richtlinie 2057 [43]

$$b_{eff}^2 = \frac{1}{L} \int_0^L b_{FS}^2(f, x) dx \quad \text{Mittelwert der einwirkenden Beschleunigungen}$$

Für den Fall, dass die Unebenheit als Spektrale Dichte (in Form von Quadraten der Unebenheitsamplituden) gegeben ist, kann die Wahrnehmungsstärke folgendermaßen dargestellt werden:

$$K_{ges}^2 = \int_0^{\infty} W^2 \cdot V^2 \cdot \Phi_h(\omega) \cdot d\omega \quad \text{Gleichung 54 aus [45]}$$

$$K_{ges}^2 = \Phi_h(\Omega_0) \cdot V^{w-1} \cdot \int_0^{\infty} W^2 \cdot V^2 \cdot \frac{d\omega}{\omega^w} \quad \text{Gleichung 55 aus [44]}$$

$V$  Vergrößerungsfunktion, beinhaltet sämtliche Fahrzeugeigenschaften, angegeben beispielsweise in [45].

Der Integralteil ist bei gleicher Fahrzeugtype nur abhängig von der Welligkeit.

Zur Veranschaulichung ist in der Abbildung 3-13 die Vergrößerungsfunktion der Sitzbeschleunigungen im Pkw dargestellt. Hier kann man deutlich die wesentlichen Frequenzen für diese Anregung zwischen 0,5 und 3 Hz erkennen:

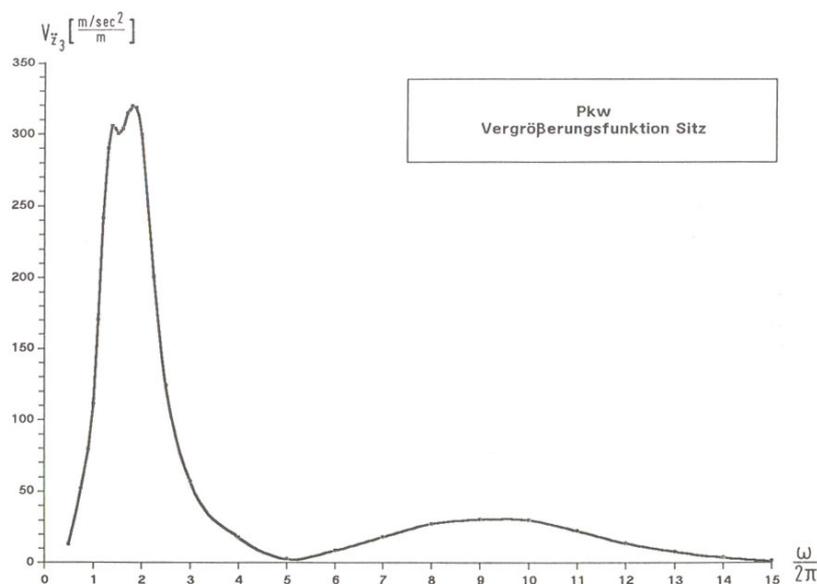


Abbildung 3-13: Vergrößerungsfunktion der Sitzbeschleunigung [45].

Periodische Anregungen werden bei der Ebenheitsbetrachtung mittels  $AUN$  und  $w$  (wie schon in Kapitel 3.3.4 erläutert) nicht wirkungsäquivalent ausgewiesen, man kann aber über die Ermittlung der Amplitude, der vorhandenen Wellenlänge und der Geschwindigkeit eine periodische Wahrnehmungsstärke bestimmen. Diese, addiert zu der zuvor errechneten, bietet die Möglichkeit, ein äquivalentes Unebenheitsmaß zurückzurechnen.

Vorschläge für die festzulegenden Grenzwerte wurden durch eine Definition der zulässigen Wahrnehmungsstärke (Warnwert entspricht der Wohlbefindensgrenze, Schwellenwert entspricht 80% der Leistungsgrenze) unter Zuhilfenahme der der jeweiligen Straßenkategorie zugeordneten Geschwindigkeit und der bekannten durchschnittlichen Fahrzeit in Spektrengrenzwerte ( $\Phi_h(\Omega_0)$ ) zurückgerechnet.

### 3.4.2 International Roughness Index (IRI)

#### 3.4.2.1 Entwicklung des Kennwertes IRI

In den 80er Jahren gab es, ausgehend von den USA, die Bestrebung eine international akzeptierte Kenngröße festzulegen, die folgende Eigenschaften in sich vereint:

- messbar mit verschiedensten Systemen
- konstant über die Zeit, wiederholbar,
- aussagekräftig im Bezug auf Komfort sowie einfach und dienlich.

Im Zuge eines Projektes in Brasilien [3] wurde unter Beteiligung von Teams aus Belgien, Brasilien, England, Frankreich und den USA jener Kennwert gesucht, der die vorher genannten Bedingungen am besten erfüllen konnte. Man kam zu dem Ergebnis, dass der „Average Rectified Slope“ Wert, welcher bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h ( $ARS_{80}$ ) ermittelt wird, den Namen „International Roughness Index“ erhalten sollte.

Er stellt die mathematische Simulation einer Fahrt über die zu messende Strecke mittels eines Aufnahmegerätes für Vertikalbewegungen (siehe Kapitel 2.2) dar. Die Auslenkungen der Feder (in beide Richtungen) werden aufsummiert und durch die überfahrene Strecke dividiert.

Definiertes Ziel des Projekts war, eine maximale Übereinstimmung der Simulation mit bestehenden Messgeräten zu erreichen und umgekehrt auch diesen Wert mit möglichst vielen Geräten messen zu können.

Je nach Art der Profilaufnahme kommt es aber zu einer unterschiedlich guten Korrelation mit der Berechnungsmethode. Ein mit Nivellier genau aufgenommenes Profil lässt auch eine optimale Simulation zu [3].

### 3.4.2.2 Berechnung des Kennwertes IRI

Grundlage der Erregungsberechnung bildet die „Reference Quarter Car Simulation“ [3]. Hierbei wird ein Viertel des Fahrzeuges durch ein einachsiges Feder – Dämpfermodell ersetzt und die Reaktion des Fahrzeuges auf die Anregung durch die Fahrbahn ermittelt.

Das Fahrzeug wird auf ein Zweimassenschwingersystem reduziert (siehe Abbildung 3-14).

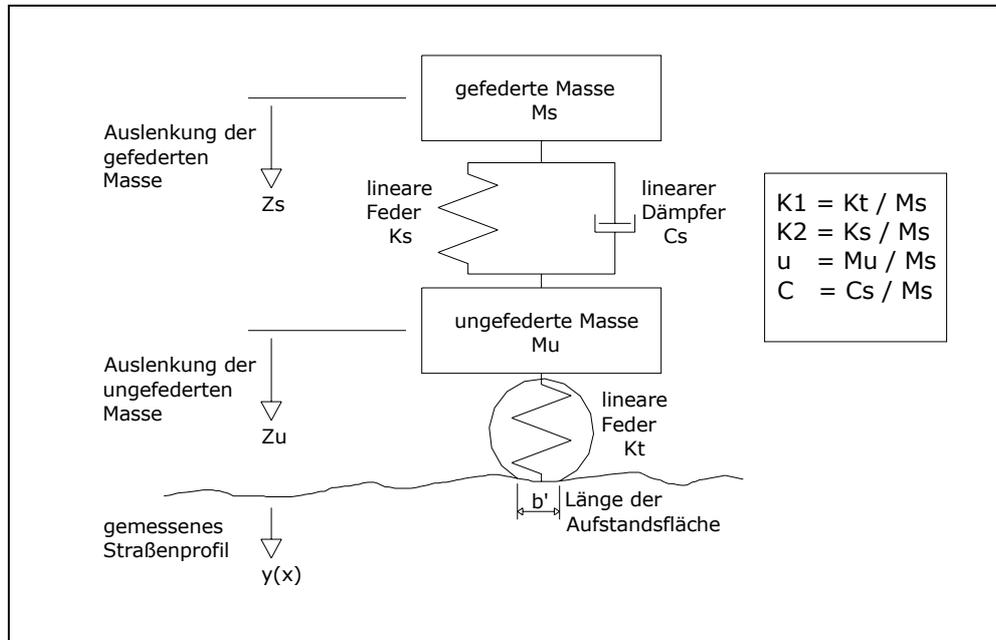


Abbildung 3-14: Fahrzeugersatzsystem [3].

Als Systemparameter ergeben sich:

- Masse des gedeferten Fahrzeugteil ( $M_s$ )
- Masse des ungefederten Fahrzeugteils (Reifen, Masse der Feder, etc.) ( $M_u$ )
- Federkonstante der Dämpferelemente ( $K_s$ )
- Dämpferparameter des Dämpferelemente ( $C_s$ )
- Federkonstante des Reifens ( $K_t$ )
- Basislänge ( $b$ ): diese beträgt ca. das 1,5 fache der Länge der Aufstandsfläche ( $b'$ ), als Parameter für Unebenheiten die zu keiner Anregung führen, da sie durch den Reifen selbst ausgeglichen werden können.

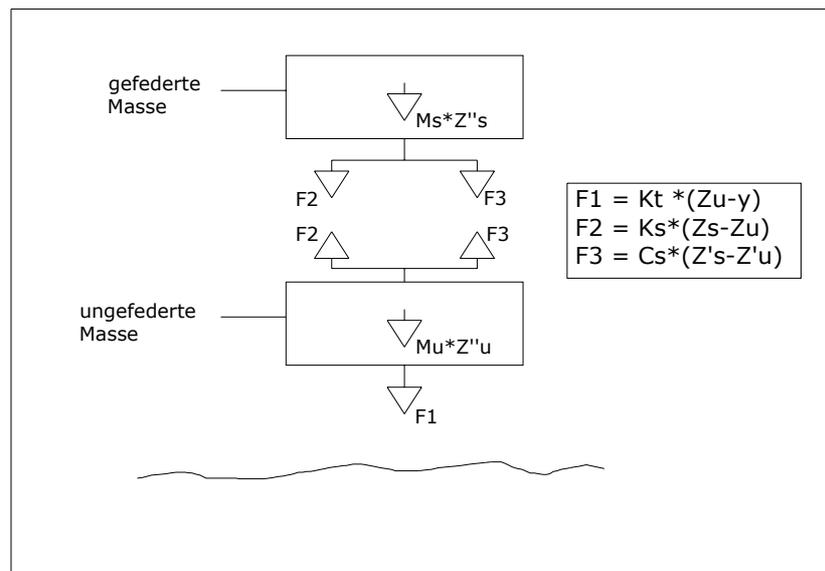
Für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen sind hinsichtlich ihres großen Einflusses besonders die Größe der Aufstandsfläche und der gewählten Geschwindigkeit zu beachten.

### 3.4.2.3 Ablauf der Berechnung:

Als Eingangsgröße wird das wahre Profil herangezogen. Dieses kann als Auflistung der Höhenkoten ( $y_{(x)}$ ) oder auch als Neigungsverlauf ( $\dot{y}_{(x)} = (y_{(x+b)} - y_{(x)})/b$ ) der Berechnung zugeführt werden.

Der Einfluss der Aufstandsfläche des Reifens wird durch eine gleitende Mittelwertbildung (siehe Kapitel 3.3.1) über die Länge  $b$  berücksichtigt. Dadurch werden alle kleinräumigen Erhebungen und Vertiefungen ausgefiltert und man erhält ein geglättetes Profil. Hierzu sei noch erwähnt, dass es für eine zuverlässige IRI Berechnung (mit Basislänge  $b = 250$  mm) notwendig ist, Messdaten in einem Abstand von maximal 167 mm aufzunehmen [17]. Beispielsweise ist in der EN-13036-5 [23] ein Sample Intervall von kleiner 125 mm vorgeschrieben. Hier findet sich auch die Empfehlung eine Abschnittslänge von 100 m zu wählen.

Eine doppelte Filterung muss vermieden werden, da manche Aufnahmegeräte an den Daten schon eine Mittelung durchführen. Falls diese wiederholt wird, wirkt sich dies in zu kleinen IRI-Werten aus.



**Abbildung 3-15: Wirkung der Kräfte im Gleichgewicht**

Die Reaktion des Fahrzeuersatzsystems wird mit Hilfe eines Schwingungsgleichungssystems 2. Ordnung ermittelt, welches sich aus dem Gleichgewicht der Kräfte am Ersatzsystem ergibt (dargestellt in Abbildung 3-15):

Gefederte Masse:

$$\ddot{Z}_s + C * (\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_2 * (Z_s - Z_u) = 0 \quad \text{Gleichung 56}$$

Ungefederte Masse:

$$\ddot{Z}_u * u + C * (\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) + K_2 * (Z_u - Z_s) + K_1 * Z_u = K_1 y \quad \text{Gleichung 57}$$

Die Konstanten definieren sich wie in Abbildung 3-14 dargestellt und sind im „Golden Car“-Modell mit den nachfolgend aufgelisteten Werten festgelegt [3]. Sie geben die spezifischen Kennwerte eines amerikanischen Standardwagens aus den 1980er an. Diese stimmen zwar mit den heutigen europäischen Personenkraftwagen nicht mehr überein, es ist jedoch sinnvoll, hinsichtlich einer besseren Vergleichbarkeit grundsätzlich auf diese Werte zurückzugreifen.

$$K_1 = 653\text{s}^{-2}$$

$$K_2 = 63,3\text{s}^{-2}$$

$$u = 0,150$$

$$C = 6,00\text{s}^{-1}$$

$y$ = das zu beurteilende Profil

Die Lösung des Schwingungsproblems erfolgt über den Ansatz eines komplexen Sinus:

$$y(w, t) = Y_0 * e^{j\omega t} \rightarrow e^{j\omega t} = \cos(\omega x) + j \sin(\omega x) \quad \text{Gleichung 58}$$

Dieser wird abgeleitet und wiederum in die Gleichung 57 eingesetzt (zum genauern Herleitungsvorgang vergleiche [3] oder auch [46]).

Das Ergebnis stellt die Bildung einer Übertragungsmatrix (State Transition Matrix) dar. Mit dieser kann bei bekanntem Höhen- oder Neigungsverlauf der Fahrbahn schrittweise von einem Messpunkt auf den nächsten eine eindeutige Lösung der Fahrzeugreaktion angegeben werden, wobei die Neigung von einem zum nächsten Messpunkt als konstant angenommen wird.

Die Schwingungsgleichung in Matrizenform lautet:

$$\dot{Z}(t) = A * Z(t) + B * y(t) \quad \text{Gleichung 59}$$

$$Z(t) = \begin{bmatrix} Zs \\ \dot{Z}s \\ Zu \\ \dot{Z}u \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -K_2 & -C & K_2 & C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_2}{u} & \frac{C}{u} & \frac{-(K_1 + K_2)}{u} & \frac{-C}{u} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_1}{u} \end{bmatrix}$$

Die Schwingungsantwort erhält man in folgender Form:

$$Z_{(i)} = ST * Z_{(i-1)} + PR * \dot{y}_{(i)} \quad \text{Gleichung 60}$$

$$ST = e^{A * dt} = I + \sum_{i=1}^N \frac{A^i dt^i}{i!} \quad \text{Übertragungsmatrix}$$

Die Übertragungsmatrix wird mit Hilfe der Taylorreihenentwicklung aufgelöst. Sie ist konstant in Abhängigkeit vom Abstand der Messpunkte ( $x$ ) und der Geschwindigkeit  $v$  (aus diesen beiden

Größen ergibt sich  $dt[s] = \frac{dx}{v}$ ) sowie den zuvor genannten spezifischen Fahrzeugkennwerten.

$$PR = A^{-1} * (ST - I) * B \quad \text{Matrix für den partikulären Lösungsteil}$$

Der eigentliche IRI-Kennwert ist ein gemittelter Wert über eine bestimmte Abschnittslänge mit der Messdatenzahl  $n$  und ist bei der Auswertung von Neigungsverläufen definiert als:

$$IRI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_s - Z_u| \quad \text{Gleichung 61 aus [47]}$$

Das Ergebnis wird schrittweise ermittelt, das heißt der vorangegangene Wert  $\pm$  Veränderung ergibt den nächsten. Daraus folgt das Problem der Festlegung des ersten Wertes. Dieser muss geschätzt werden, wobei der dadurch eingeführte Fehler mit zunehmender Messstreckenlänge immer geringer wird.

Schätzwertalgorithmus:

$$Z(1) = \left[ \frac{y(k) - y(1)}{k * dx}, 0, \frac{y(k) - y(1)}{k * dx}, 0 \right] \quad k = INT\left(\frac{0,5}{dx}\right)$$

Dies ist gleichbedeutend mit einem Start auf einer ideal ebenen Strecke mit der Steigung der Messstrecke in den ersten 0,5 Sekunden der Messfahrt. Eine Beispielrechnung kann dem Anhang D entnommen werden.

Für die Berücksichtigung von Wankbewegungen werden die Profilhöhen in beiden Radspuren gemessen und in jedem Messquerschnitt der Mittelwert gebildet. Diese neue Wertereihe ist wiederum der Eingangswert für die Berechnung des IRI. Diese Vorgangsweise ist oft auch unter der Bezeichnung Half Car Index (HCI) zu finden. Es wird jedoch nicht das gleiche Ergebnis erzielt, wenn zuerst der IRI in beiden Fahrspuren ermittelt und dann die Mittelwertbildung durchgeführt wird.

#### 3.4.2.4 Spezifikationen der IRI Analyse

Die Schwingungsberechnung ist prinzipiell dimensionslos, das heißt die Einheit der Eingangsgröße entspricht auch der Einheit des Ergebnisses, so kann der gleiche Berechnungsvorgang einerseits mit den absoluten Profilhöhen, andererseits auch mit den Neigungen von einem zum nächsten Messpunkt durchgeführt werden. Je nachdem werden sich auch die Ergebnisgrößen unterscheiden (Höhen oder Neigungen).

Aus der Definition heraus ergibt sich der IRI einer perfekt ebenen Straße zu 0.

In der nachfolgenden Graphik (Abbildung 3-16) wird die Reaktion des IRI Algorithmus auf die Profilgröße (Höhe oder Neigung) bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h in Abhängigkeit von der Wellenzahl oder auch der Wellenlänge (Kehrwert der Wellenzahl) deutlich. Einfluss haben Wellen im Längenbereich von 0,7 bis 50 m.

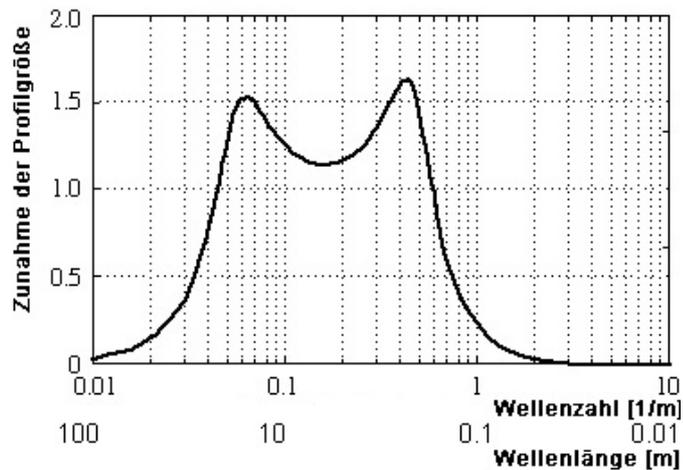


Abbildung 3-16: Filterantwort des IRI-Algorithmus [17].

### 3.4.2.5 Interpretation von IRI Ergebnissen:

Zur besseren Vorstellbarkeit der Rechenergebnisse sind hier einige Straßenzustandsgrößen und Komfortbereiche mit den dazugehörigen IRI-Werten in m/km angeführt. Diese gelten für Asphalt und Betonoberflächen.

Straßenzustand	IRI Wertebereich [m/km]
Gute Befahrbarkeit bei Geschwindigkeiten > 120 km/h keine Schlaglöcher oder Wellen, Vertiefungen bis zu 2 mm / 3 m	1,5 – 2,5
Gute Befahrbarkeit bei Geschwindigkeiten 100 – 120 km/h Ab einer Geschwindigkeit von 80 km/h machen sich großflächige Vertiefungen bemerkbar und es kann zu mäßiger Bewegung des Fahrzeugs kommen. Vertiefungen bis zu 12-15 mm / 3 m, merkliche Welligkeit	4,0 – 5,5
Gute Befahrbarkeit bei Geschwindigkeiten 70 – 90 km/h Oberfläche mit teilweise großen Fehlstellen, Abweichungen von der Messlatte 20-40 mm / 3 m	7 – 8,5
Geschwindigkeit muss unter 50 km/h abgesenkt werden Schwere Oberflächenschäden, Abplatzungen,...	9,5 – 10,5

Abbildung 3-17: Abschätzung des Werte Bereiches der IRI Berechnung [3]

Weitere Kenngrößen für den Fahrkomfort auf Schotter- oder Erdfahrbahnen können auch [3] oder [48] entnommen werden.

Das Niveau der in Österreich gemessenen Werte orientiert sich eher an der unteren Grenze der angeführten Werte. Zum Vergleich ist in Abbildung 3-18 die Summenhäufigkeit der gemessenen IRI Werte auf Bundesstraßen B (bei einer Abschnittslänge von 50m) dargestellt. Hierbei liegt der 90% Fraktilwert knapp unter 4 m/km.

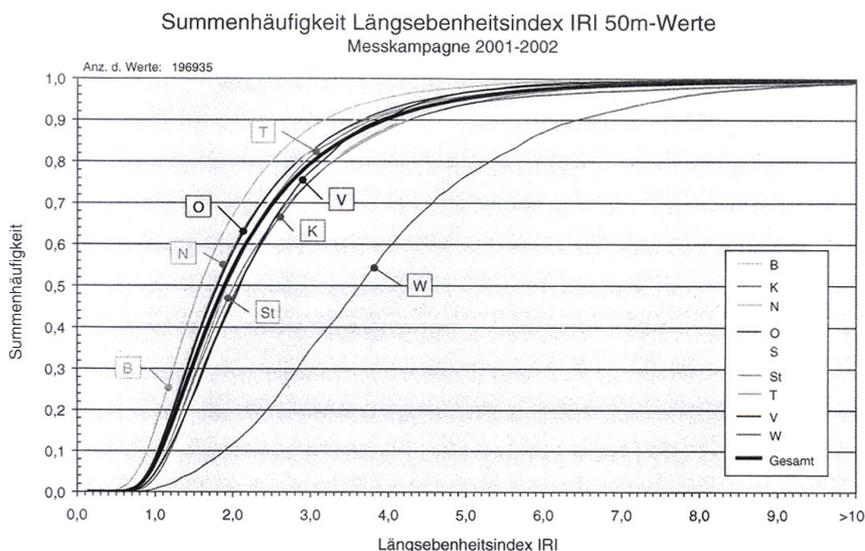


Abbildung 3-18: Verteilung des IRI Wertes auf österreichischen Bundesstraßen [49]

### 3.4.3 Ride Number (RN)

#### 3.4.3.1 Grundlagen

Das Ziel der Entwicklung der Ride Number (RN) bestand darin, das subjektive Empfinden der Befahrbarkeit durch den Nutzer in Zusammenhang mit dem tatsächlichen Straßenprofil mathematisch darzustellen. Der Algorithmus wurde daher mit den Ergebnissen des AASHO Road Tests abgeglichen. Dies erfolgte im Rahmen einer groß angelegten Studie hinsichtlich der Bewertung von Straßen durch Testpersonen (Panel Rating), die in weiterer Folge auch zur Entwicklung des PSI führte.

#### 3.4.3.2 Berechnungsschritte

Aus den Rohdaten werden zunächst durch Bildung des gleitenden Mittelwertes ( $b = 250 \text{ mm}$ ) die kurzwelligen Anteile herausgefiltert. Der im Anschluss verwendete Algorithmus entspricht dem der IRI Berechnung, jedoch mit veränderten Eingangswerten:

$$K_1 = 5120 \text{ s}^{-2}$$

$$K_2 = 390 \text{ s}^{-2}$$

$$c = 17 \text{ s}^{-1}$$

$$u = 0,036$$

$$y = \text{das zu beurteilende Profil}$$

Der quadratische Mittelwert des Ergebnisses entspricht dem Profil Index (siehe Kapitel 3.4.4) und dieser wiederum lässt sich einfach in die RN transformieren:

$$RN = 5 * e^{(-160 * PI)} \quad \text{Gleichung 62 aus [17]}$$

Wenn Messergebnisse in 2 Fahrspuren vorhanden sind, müssen die Profil Indices für jeden Querschnitt zusammengefasst werden:

$$PI = \left[ \frac{PI_L^2 + PI_R^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Gleichung 63 aus [17]}$$

Der Algorithmus reagiert im Unterschied zur IRI-Berechnung in niedrigeren Wellenlängenbereichen stärker, da diese mehr Einfluss auf die menschliche Empfindung haben. Vorwiegend werden Wellenlängen von 0,34 m bis 10,9 m (siehe Abbildung 3-19) bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h berücksichtigt.

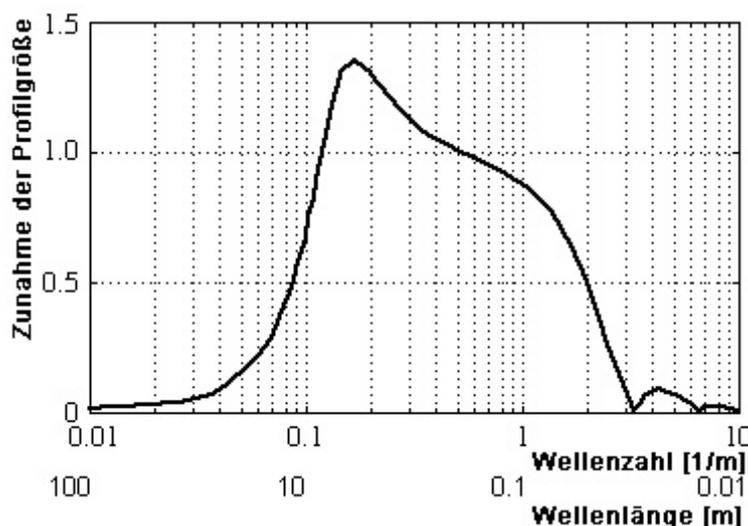


Abbildung 3-19: Filterantwort des RN Algorithmus [17].

### 3.4.4 Profil Index (PI)

Diese Bezeichnung hat grundsätzlich zwei verschiedene Bedeutungen:

- Zwischenschritt zur Ride Number Berechnung  
Für die tatsächliche Berechnung bedarf es noch einiger Festlegungen (Basislänge für gleitenden Mittelwert: 250 mm, Initialisierungslänge: 11,0 m).

Nach Filterung des Profils ergibt sich der Profil Index zu:

$$PI = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_0^{L/V} (\dot{Z}_s - \dot{Z}_u)^2 dt} \quad \text{Gleichung 64 aus [17]}$$

- Kennwert für die Auswertung der amerikanischen Profilografen  
Er ergibt sich durch Summation der Abweichungen des Messprofils von der durch

den Rahmen definierten Ebene. Dabei fließen nur jene Werte ein, die einen definierten Grenzwert (meist 0,2 inches) übersteigen und eine minimale Ausdehnung haben (0,08 inches). Dieser Wert wird abschnittsweise durch die Länge der Messstrecke dividiert und es ergibt sich somit der Profil Index mit einer Dimension von inches/mile bzw. m/km.

### 3.4.5 Der Längsebenheitwirkindex (LWI)

Der Grundgedanke für die Entwicklung des Längsebenheitwirkindex war, sowohl die Beurteilung nach der Geometrie als auch nach der Wirkung in ein einziges Konzept zu integrieren. Die Bewertung findet in 100 m Abschnitten statt, wobei die größte Auswirkung der Unebenheit jeweils maßgebend ist.

Die Reaktion eines Fahrzeuges bei Überfahren von Unebenheiten lässt sich in drei Schwingungserscheinungen einteilen [33]:

- Vertikalen Schwingungseintrag auf den menschlichen Körper  
Die Schwingungen werden direkt über den Fahrzeugaufbau und den Sitz auf den Körper übertragen.  
Vergleichsweise wird dieser in der VDI-Richtlinie mit der bewerteten Schwingstärke ( $K$ ) in Abhängigkeit von der Frequenz und der Schwingstärke angegeben. Es wird ein Gesamtwert aus den Anregungen des Sitzes, der Hände (über das Lenkrad) und der Füße (über die Aufstandsfläche) gebildet  $K_{ges} = \sqrt{K_{sitz}^2 + K_{Hand}^2 + K_{Fuß}^2}$  (vergleiche hierzu Kapitel 3.4.1). Stoßartige Belastungen werden jedoch unterbewertet und sollten durch eine verstärkte Bewertung der Spitzenwerte abgedeckt werden [50], wobei es grundsätzlich beim Menschen zu sehr unterschiedlichem Empfinden und Gewöhnungseffekten kommen kann.
- Radlastschwankungen  
Diese haben Einfluss auf Straßenbeanspruchung und Fahrsicherheit, da positive dynamische Radlasten als zusätzliche Belastung für die Straße aufgenommen werden müssen und negative dynamische Radlasten eine Reduktion des Kraftschlusses zwischen Fahrzeug und Fahrbahn bewirken, die vor allem in Kurven und bei nasser Fahrbahn die Fahrsicherheit beeinträchtigen und bis zum Verlust der Manövrierfähigkeit führen können.
- Vertikalbeschleunigungen auf die Ladefläche (Ladegutbeanspruchung)  
Prinzipiell gilt, dass die Schädigung mit der Höhe der Beschleunigungen und der Lastwechselzahl zunimmt, wobei sich für die Grenzwertbildung die Frage nach dem

Schadigungsgrad stellt (ist alleine schon die Schädigung der Verpackung oder erst des tatsächlichen Ladeguts ausschlaggebend?).

Aus diesen heraus wurden die folgenden 3 Filter entwickelt, mit deren Hilfe das Längsprofil bewertet werden kann:

- Mensch-Filter  
frequenzabhängiges Schwingungsempfinden des Menschen bei Überfahrt mit einem Mittelklassefahrzeug bei 100 km/h [vertikale Beschleunigungen] – Reaktion auf Frequenzen ca. 3 – 8 Hz / Wellenlängen von 3 – 10 m
- Radlast-Filter  
Simulation der Radlastschwankung einer 11,5 t Lkw-Achse bei einer Überfahrt mit 80 km/h [vertikale dynamische Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahn] – Reaktion auf Frequenzen größer 8 Hz / Wellenlängen kleiner als 3 m (als Kriterium für Fahrsicherheit und Straßenbeanspruchung)
- Ladegut-Filter  
vertikale Beschleunigungen eines dreiachsigen Sattelauflegers bei einer Überfahrt mit 80 km/h [vertikale Beschleunigungen] – Reaktion auf Frequenzen von ca. 0,5 – 3 Hz / Wellenlängen größer 10 m

Wellenlängen über 40 m üben praktisch keinen Einfluss aus und werden daher im Rahmen der Bewertung der Längsebenheit nicht berücksichtigt.

Berechnungsschema (Gesamtüberblick siehe Abbildung 3-20):

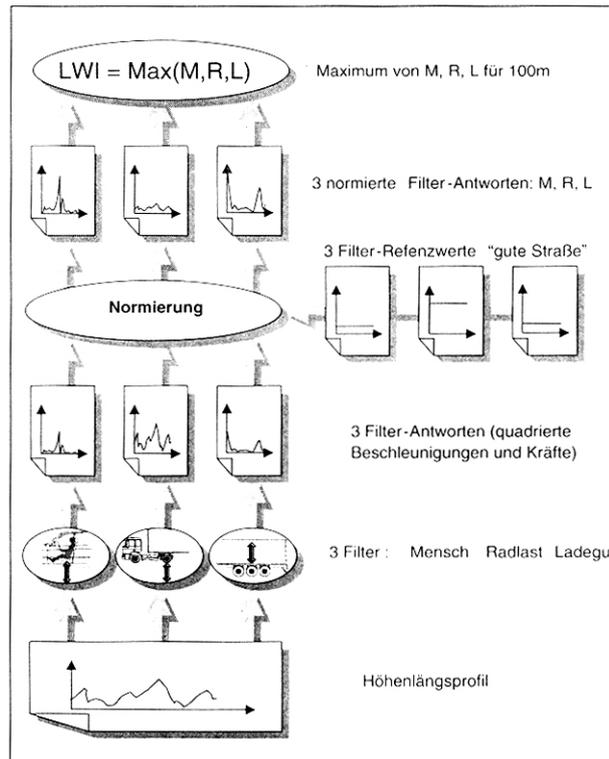


Abbildung 3-20: Berechnungsablauf LWI [33].

Das zu untersuchende Höhenprofil muss in einem ersten Schritt jeden Filter durchlaufen. Daraus ergeben sich drei wegabhängige Filterantworten (dargestellt ist die Filterung im Frequenzbereich):

$$\underline{Q}_R(\Omega_K) = \underline{V}_R(\Omega_K) \cdot \underline{H}(\Omega_K)$$

$$\underline{Q}_M(\Omega_K) = \underline{V}_M(\Omega_K) \cdot \underline{H}(\Omega_K)$$

$$\underline{Q}_L(\Omega_K) = \underline{V}_L(\Omega_K) \cdot \underline{H}(\Omega_K)$$

Gleichung 65

- |     |               |
|-----|---------------|
| $R$ | Radlastfilter |
| $M$ | Menschfilter  |
| $L$ | Ladegutfilter |

Zu dem jeweils betrachteten 100 m Abschnitt werden die davor liegenden 50 m auch in die Beurteilung miteinbezogen, da das darüber fahrende Fahrzeug aus diesem Abschnitt schon eine gewisse Grundschwingung mitnimmt.

In diesem Stadium kann auch die Auswirkung des Reifenlatsches durch Division mit der entsprechenden Vergrößerungsfunktion eliminiert werden.

Liegt die Filterung im Frequenzbereich vor (entsprechende Filter sind [30] zu entnehmen), muss im Anschluss das Ergebnis in den Wegbereich zurücktransformiert werden.

Dieses wird quadriert und mittels Division durch den jeweiligen quadrierten Wert der „guten Straße“ normiert. Der Referenzwert entspricht dem Ergebnis bei einem definierten  $AUN$  von  $1 \text{ cm}^3$ , einer Welligkeit  $w$  von 2, einer Geschwindigkeit  $v$  von 80 km/h bzw. 100 km/h und der statistischen Abschätzung der als normalverteilt angenommenen Antwort  $q_{ref}^2 = 3,29^2 \cdot \sigma_{q,ref}^2$ .

$$q_{ref} = 3,29^2 \cdot AUN_{ref} \cdot \Omega_0^2 \cdot v \cdot \int V_q^2(\omega) \cdot \omega^{-2} d\omega \quad \text{Gleichung 66}$$

Der Maximalwert dieser drei Funktionen ergibt den Längsebenheitswirkindex  $LWI$ . Diese Bewertung wird definitionsgemäß für Abschnitte von 100 m durchgeführt.

Dieses Kriterium bewertet bewusst Einzelhindernisse sehr stark. Liegen diese nicht vor, so sind die Ergebnisse gleich der Bewertung mittels  $AUN$  (bei  $w=2$ , in allen anderen Fällen besteht ein linearer Zusammenhang in Abhängigkeit von der Welligkeit). Der  $LWI$  ist für den Geschwindigkeitsbereich von 80-100 km/h ausgelegt (andere Geschwindigkeitsbereiche können durch Anpassen der Grenzwerte berücksichtigt werden). Gute Straßen erreichen  $LWI$ -Werte von 1 und darunter. Diese Schärfe wird auch bei den Grenzwerten deutlich, da hier die Werte des  $AUN$  übernommen wurden (Warnwert 3; Schwellenwert 9). Die Bewertung erreicht aber aufgrund von einzelnen oder periodischen Unebenheiten zumeist höher Werte.

Für eine Abschätzung der Verteilung der Unebenheiten auf Einzelhindernisse, periodische Anregung und allgemeine Unebenheiten ist ein Vergleich mit den Ergebnissen des  $AUN$  sehr hilfreich.

Rückgerechnet ergeben sich beim Erreichen des Grenzwertes folgende Kräfte:

	Beanspruchung der Straße Fahrsicherheit	Beanspruchung des Ladegutes	Beanspruchung des menschlichen. Körpers
<b>LWI</b>	<b>Max. Radlasterhöhung bzw. Minderung</b> (bezogen auf die stat. Radlast) <b>[%]</b>	<b>Max. vertikale Beschleunigung auf der Ladefläche</b> <b>[m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>Effektivwert der frequenzbewerteten vertikalen Beschleunigung</b> <b>[m/s<sup>2</sup>]</b>
1	17,5	1	0,3
3	30	1,7	0,5
9	52,5	3	0,9

Tabelle 3-4: Belastungen bei Erreichung des Grenzwertes [51].

Auswertungen von vorhandenen Straßendaten in Deutschland, wo jeweils Werte des  $AUN$  und des  $LWI$  ermittelt wurden, ergaben in 1,9% der Abschnitte eine bessere Bewertung durch den  $LWI$ , in 49,9% kam es zu einer gleichen Einstufung, 38,8% wurden um eine Klasse schlechter, 9% um 2 Klassen schlechter und 0,24% um 3 Klassen schlechter bewertet [51].

## 4 REGELWERKE UND NORMEN

Zur einheitlichen Erfassung und Beurteilung von Straßenkennwerten werden Aufnahmeverfahren und Auswertungsmethoden in Normen und Regelwerken festgelegt. Die für die Erfassung der Längsebenheit relevanten Regelwerke und Normen werden im Folgenden aufgelistet. Betrachtete Länder sind hierbei Österreich, Deutschland, die Schweiz, die USA sowie länderübergreifende internationale Standards.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese einer ständigen Erweiterung bzw. Anpassung nach dem Stand der Technik unterliegen.

### 4.1 Österreich

Die relevanten Regelwerke werden in Österreich von der Österreichischen Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr erstellt und in der Reihe der Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) herausgegeben. Sie sind für die Datenerfassung auf Netzebene auf das für die Zustandserfassung verwendete Messgerät RoadSTAR abgestimmt. Bei den für die Längsebenheit relevanten Richtlinien handelt es sich im Detail um [5]:

- **RVS 8S.04.11:** Technische Vertragsbedingungen für Straßenbauten – Asphalt - Anforderungen an Asphaltsschichten, 2004. Sie beinhaltet Grenzwerte für Abnahmeprüfung und Zustandsüberwachung mit der 4 m Latte oder dem Planograf.
- **RVS 8S.06.32:** Technische Vertragsbedingungen für Straßenbauten – Betondecken - Deckenherstellung, 2001. Die Richtlinie beinhaltet Grenzwerte für Abnahmeprüfung und Zustandsüberwachung mit der 4 m Latte oder dem Planograf.
- **RVS 11.066 Teil II:** Feldprüfungen, Teil II – Ebenheitsmessung mit dem Planograf, 1995. Sie beinhaltet eine Beschreibung des Messgerätes, sowie die Durchführung der Messung, wobei Hinweise auf mögliche Ursachen von Datenungenauigkeiten hilfreich sind. Weiters wird auch die Auswertung der aufgenommenen Daten behandelt.
- **RVS 11.066 Teil VIII:** Feldprüfungen, Teil VIII – Längsebenheitsmessung mit dem System RoadSTAR, 2004. Diese Richtlinie enthält die Beschreibung des Messverfahrens, die einzuhaltenden Bedingungen, sowie die erreichbare Messgenauigkeit aufgrund von Wiederholbarkeitsstudien.
- **RVS 13.512 (Entwurf):** Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR, 2005. Für das Autobahnen- und Schnellstraßennetz sind in dieser Richtlinie für verschiedene Zustandsgrößen (für Längsebenheit ist IRI maßgebend) die entsprechenden Zustandsklassen-

einteilungen und deren Grenzwerte angegeben. Die konkreten Zahlenwerte betreffend die Längsebenheit sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

In den österreichischen Richtlinien erfolgt die Beurteilung des Ebenheitszustands und somit die Klassenzuteilung aufgrund des International Roughness Index (IRI). Die genauen Werte aus dem Entwurf der RVS 13.512 sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

Längsebenheit IRI [m/km]				
Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
[0,0-1,0)	[1,0-1,8)	[1,8-3,0)	[3,0-4,5)	=4,5

Tabelle 4-1: Zustandsklasseneinteilung für Autobahnen und Schnellstraßen [5].

## 4.2 Schweiz

Die wichtigsten Informationen für die Messung und Bewertung der Längsebenheit in der Schweiz können dem Richtlinienwerk des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) entnommen werden [25]:

- **SN 640 520a:** Ebenheit – Prüfung der Geometrie, 1977. Diese Richtlinie befasst sich mit der Aufnahme der Längsebenheit mittels Winkelmesser und den daraus ermittelbaren Winkelwerten.
- **SN 640 521c:** Ebenheit – Qualitätsanforderungen, 2003. In dieser Richtlinie sind die Abnahmewerte für das Kriterium der Längsebenheit für verschiedene Oberbauschichten angeführt.
- **SN 640 904:** Erhaltungsmanagement (EM); Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und technischen Ausrüstungen: Substanz- und Gebrauchswerte, inkl. Anhang Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und technischen Ausrüstungen: Bestimmung der Substanz- und Gebrauchswerte, 2003. In die hier angeführte Beurteilung einer Straße fließt auch die Längsebenheit als ein Kriterium ein.
- **SN 640 935b:** Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Zustandserhebung und Indexbewertung, 2003. Diese Richtlinie erleichtert die Beurteilung des Straßenzustandes aufgrund von erhobenen Kennwerten. Sie beinhaltet weiters einen Schadenskatalog zur besseren Erfassung von Oberflächenschäden.

Die Beurteilung des Straßenzustandes im Bezug auf die Längsebenheitskenngröße erfolgt über die Standardabweichung des Winkelwertes  $s_w$ . In der Schweizer Richtlinie SN 640 935b sind

hierfür Graphen für unterschiedliche Straßentypen angeführt. In werden exemplarisch die Grenzwerte für Hochleistungsstraßen (HLS) herausgegriffen.

Standardabweichung des Winkelwertes $s_w$ [‰]	
Straßenzustand GUT	< 1,3
Straßenzustand MITTEL	< 2,3
Straßenzustand AUSREICHEND	< 3,5
Straßenzustand KRITISCH	< 5,5
Straßenzustand SCHLECHT	> 5,5

Tabelle 4-2: Beurteilung des Zustandes von HLS über die Standardabweichung des Winkelwertes [25].

### 4.3 Deutschland

Die deutschen Richtlinien, die sich mit der Längsebenheit von Straßen beschäftigen, wurden in den letzten Jahren grundlegend überarbeitet. Überlegungen, die zu diesen Änderungen führten, aber auch richtungweisende Vorschläge finden sich in [52]. Die Richtlinien und Arbeitspapiere werden von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) erarbeitet und herausgegeben [24].

- **Arbeitspapier Nr. 9/A1 zur ZEB:** FGSV-Arbeitspapier zur Zustandserfassung und –bewertung, 2001. Der Unterabschnitt Zustandsbewertung bei messtechnischer Erfassung enthält Normierungsfunktionen für das Merkmal Längsebenheit für Allgemeine Unebenheiten (Kennwert: AUN), Einzelhindernisse (Kennwert: Wellenlänge und Unebenheitshöhe der Einzelhindernisse) sowie Periodische Unebenheiten (Kennwert: Wellenlänge und Unebenheitshöhe der Periodischen Unebenheiten). Im Weiteren beinhaltet das Arbeitspapier die Bildung von Zustandswerten auf Basis von Gebrauchs- und Substanzwerten.
- **ZTV ZEB-StB (Entwurf!):** Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und –bewertung von Straßen, 2004. In dieser Richtlinie wird die grundsätzliche Datenaufnahme festgelegt (Abschnittslängen, Genauigkeiten,...), aber auch die verwendeten Messsysteme, sowie die Auswertung der ermittelten Daten (Ermittlung der Allgemeinen Unebenheit, Differenz zum gleitenden Mittelwert, gleitende Richtlatte).

In Deutschland beziehen sich die Richtlinien auf das allgemeine Unebenheitsmaß (AUN). Für diesen Kennwert sind festgelegte Warn- und Schwellenwerte zu finden, diese sind dem Arbeitspapier Nr.9/A1 zur ZEB zu entnehmen und in Tabelle 4-3 zusammengefasst.

<b>Unebenheitsmaß AUN</b>			
Funktionsklasse	<b>FK 1</b>	<b>FK 2</b>	<b>FK 3</b>
Warnwert	3 cm <sup>3</sup>	6 cm <sup>3</sup>	12 cm <sup>3</sup>
Schwellenwert	9 cm <sup>3</sup>	18 cm <sup>3</sup>	36 cm <sup>3</sup>

Tabelle 4-3: Warn- und Schwellenwerte für das Unebenheitsmaß [24].

## 4.4 USA

Das Kriterium der Längsebenheit hat einen hohen Stellenwert bei der Beurteilung von Straßen. So wurde auch eine große Gruppe an Aufnahmegeräten entwickelt und diesen dann den jeweiligen Bewertungsverfahren zugeordnet, daher ergibt sich auch die große Anzahl an Normen und Richtlinien. Sie werden von der American Society for Testing and Materials (ASTM) erarbeitet und herausgegeben. Grundsätzlich lassen sie sich in zwei Gruppen unterteilen:

Normen und Richtlinien für die Datenerfassung [53]:

- **E950-98:** Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference, 2004. Diese Richtlinie erläutert die Aufnahme des Längsprofils durch Messfahrzeuge mit Beschleunigungsaufnehmern.
- **E1082-90:** Standard Test Method for Measurement of Vehicular Response to Traveled Surface Roughness, 1995. Diese Richtlinie enthält die Beschreibung der Messgeräte, die die relative Bewegung eines Masse-Feder-Dämpfungssystems (abgestimmt auf die Eigenschaften eines konventionellen Fahrzeugs), welches durch die Straßenunebenheiten angeregt wird, aufnehmen.
- **E1215-93:** Standard Specification for Trailers Used for Measuring Vehicular Response to Road Roughness, 2003. Diese Richtlinie beschreibt an Zugfahrzeuge angehängte Messgeräte zur Aufnahme von Vertikalbewegungen.
- **E1274-03:** Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph, 2003. Die Richtlinie umfasst die Aufnahme der Längsebenheit mit Profilografen, sowie die Grenzwerte für die Klassifizierung der Straße.
- **E1364-95:** Standard Test Method for Measuring Road Roughness by Static Level Method, 2000. Die Richtlinie befasst sich mit der Aufnahme des Längsprofils mit Hilfe einer "statischen Vergleichsebene", darunter fallen geodätisches Einmessen, Dipstick und ähnliche Geräte, wobei diese Methoden aufgrund ihrer geringen Aufnahmegeschwindigkeiten zumeist nur für Vergleichsmessungen zum Einsatz

kommt. Für die aufgenommenen Daten wird auch die Berechnung des International Roughness Index (IRI) angeführt.

- **WK366:** Test Method for Using a Rolling Inclinator to Measure Longitudinal and Transverse Profiles of a Traveled Surface, 2005. Diese Richtlinie beinhaltet die Messung des Längsprofils mittels Inclinometer bei Schrittgeschwindigkeit für Abnahmeprüfung sowie spätere Überprüfungen.

Normen und Richtlinien für die Bewertung der Daten:

- **E1170-97:** Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces, 2001. Diese Richtlinie enthält die mathematische Simulation der Fahrzeugantwort auf das Längsprofil für verschiedene Fahrzeugmodelle.
- **E1489-98:** Standard Practice for Computing Ride Number of Roads from Longitudinal Profile Measurements Made by an Inertial Profile Measuring Device, 2003. Diese Richtlinie beinhaltet das Berechnungsschema zur Ermittlung der Ride Number auf Basis von Daten der Hochgeschwindigkeitsmessgeräte. Für die Herleitung des Rechenalgorithmus wird auf NCHRP Berichte verwiesen.
- **E1926-98:** Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements, 2003. Die Richtlinie beinhaltet die mathematische Grundlage zur Berechnung des Internationalen Roughness Index (IRI) auf Basis des wahren Längsprofils. Für die Herleitung des Rechenalgorithmus wird auf NCHRP Berichte verwiesen.

## 4.5 Internationale Normen

Um auch international einen einheitlichen Standard im Bezug auf Längsebenheitserfassung und Bewertung zu schaffen, wurden zu diesem Themenkomplex auch von der International Organization for Standardization (ISO) [54] und dem Comité Européen de Normalisation (CEN) [23] Normen herausgegeben:

- **ISO 8608:** Mechanical Vibrations-road surface profiles-reporting measured data, 1995. Enthält Vorschriften für die Berichterstattung von Auswertungen, sowie Informationen zur Berechnung der Spektralen Dichte (PSD). Schlägt auch eine Klassifizierung der Straße aufgrund von  $\Phi_h(\Omega_0)$  vor.
- **ISO 13473-3: 2002:** Characterization of pavement texture by the use of surface profiles – Part 3: specification and classification of profilometers, 2002. Diese Norm enthält die Anforderungen an die Messgeräte, um genaue und richtige

Datenaufnahme gewährleisten zu können, beziehungsweise die Datenqualität klassifizieren zu können.

- **pre-EN 13036-5:** Surface Characteristics of road and airfield pavements. Test methods – Determination of Longitudinal Unevenness Indices, 2004. Dieser Vorentwurf der Richtlinie enthält die Berechnungsvorschriften für folgende Kennwerte: IRI, Wave Band Analysis und Power Spectral Density (PSD).
- **pre-EN 13036-6:** Surface Characteristics of road and airfield pavements. Test methods – Measurement of transverse and longitudinal profiles in the unevenness and meagtexture wavelength ranges, 2005. Dieser Vorentwurf enthält Vorschriften für die Klassifizierung von Aufnahmeegeräten, sowie für die Aufnahme des Profils an sich.

Die Klasseneinteilung erfolgt im internationalen Normenwesen auch unter Verwendung der Power Spectral Density (PSD), aufgrund der eine Klassifizierung der Straße in eine der acht Straßenklassen möglich ist. Die hierbei anzuwendenden Grenzwerte sind in der ISO 8608 zu finden und in Tabelle 4-4 aufgelistet.

Power Spectral Density (PSD) bei $\Omega_0=1$ rad/m [ $\text{cm}^3$ ]								
Road Class	A	B	C	D	E	F	G	H
Lower limit	-	2	8	32	128	512	2048	8192
Geometric mean	1	4	16	64	256	1024	4096	16384
Upper limit	2	8	32	128	512	2048	8192	-

Tabelle 4-4: Klasseneinteilung aufgrund PSD [54].

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Längsebenheit einer Straße ist schon seit jeher eine aussagekräftige Kenngröße für Fahrkomfort, Sicherheit und Lebensdauer des Straßenaufbaus. Jedoch die Mittel der Aufnahme und ihre Bewertungsmöglichkeiten verändern sich stets und in diesen liegt auch für die Zukunft noch reichlich Potential.

Die Beurteilung der Längsebenheit einer Straße geht zumeist in zwei Schritten vor sich, auch wenn diese immer öfter direkt aufeinander folgen. Dennoch muss in einem ersten Schritt die Situation der Straße aufgenommen werden und erst danach können diese Daten bewertet und eine Beurteilung über den Straßenzustand abgegeben werden. So ist es dienlich, sich vorweg mit den verschiedenen Aufnahmeverfahren zu befassen und im Anschluss Bewertungsverfahren zu erläutern.

Die aufzunehmende Straße wird in ihrer Ausdehnung auf einen Längsschnitt reduziert, zumeist die rechte Radspur, in welcher dann die Messung durchgeführt wird. In der vorliegenden Arbeit werden die erforderlichen Messsysteme beschrieben. Die Verwendung von Messmethoden, die zwar eine hohe Genauigkeit, jedoch eine geringe Messgeschwindigkeit und hohen Messpersonalbedarf besitzen, wie die Messung mittels Nivellement oder Dipstick, beschränkt sich heutzutage hauptsächlich auf kleinflächige Überprüfungen auf Projektebene, sowie Referenzmessungen. Auch Geräte, die die Wirkung der Straße auf das Messinstrument aufzeichnen, treten immer mehr in den Hintergrund. Sie sind jedoch noch in unterschiedlichen Ausführungen im Einsatz, sowohl als selbstständige Messgeräte, als auch als mobile Systeme, daher erscheint es sinnvoll sie im Überblick darzustellen. Ziel einer modernen Längsebenheitserfassung ist es jedoch, die Situation der Straße möglichst wirklichkeitsgetreu und automatisiert aufzunehmen. Vorwiegend kommen hierfür die Beschleunigungs-Distanz-Messung sowie die Mehrfachabtastung mittels Laser zum Einsatz. Ersteres hat sich im amerikanischen Bereich durch die Entwicklung von kleineren Geräten auch für die Messung auf Projektebene etabliert. Die Vorteile der Mehrfachabtastung liegen in der Geschwindigkeitsunabhängigkeit, da die Auswertung allein auf den geometrischen Zusammenhängen der gemessenen Höhen basiert.

Entwicklungen im Bereich der Automobilindustrie gehen in Richtung einer dreidimensionalen Erfassung der Oberfläche, einerseits über Methoden der Bildanalyse andererseits über eine flächige Erfassung durch Lasersensoren.

Es besteht das Bedürfnis, die aufgenommenen Ebenheiten auch zu bewerten und einzuordnen, hierfür wurden in dieser Arbeit einige Kennwerte vorgestellt. Man kann prinzipiell zwischen zwei

Auswerteverfahren unterscheiden. Einerseits erfolgt die Auswertung über die Betrachtung der Geometrie (statistische Auswertung), das heißt die Abweichungen von der ideal ebenen Fahrbahn werden ermittelt und beurteilt. Andererseits wird die aus den Unebenheiten resultierende Wirkung auf das darüber fahrende Fahrzeug ermittelt und fließt so in die Bewertung ein. Prinzipiell kann hierbei aber eine Einschränkung auf Unebenheiten im Wellenlängenbereich von 0,5 m bis 100 m getroffen werden, da es aufgrund von größeren oder kleineren Wellen zu keiner Wirkung auf das Fahrzeug kommt.

In die erste Gruppe fallen konventionelle Verfahren wie die Ermittlung der Varianz oder der Standardabweichung der Unebenheitshöhen genauso wie die Bildung der Spektralen Dichte. Hierbei können durch den Einsatz der Fouriertransformation die Unebenheiten der Straße durch die darin enthaltenen Sinusschwingungen in Wellenlängen und Amplituden beschrieben werden. Der Kennwert für die Auswertung ist das Allgemeine Unebenheitsmaß (AUN), welches gleichbedeutend mit der Spektralen Dichte bei einer Wellenlänge von 6,28 m ist. Weitere Vertreter sind die Auswertung mittels Wellenbandanalyse (Wave Band Analysis) sowie die Wavelet Transformation. Auch das relativ neue Verfahren des bewerteten Längsprofils zielt darauf ab, das Längsprofil ohne Einfluss von Geschwindigkeit, Fahrzeugeigenschaften oder ähnlichem aussagekräftig bewerten zu können.

In der zweiten Gruppe liegen je nach Verfahren der Berechnung unterschiedliche Wirkungen zu Grunde. Die Wahrnehmungsstärke (oder auch Komfortziffer) stützt sich auf die menschliche Empfindung, der Internationale Roughness Index (IRI) basiert allein auf der Simulation eines Fahrzeuges und beurteilt die Schwingreaktion von diesem. Ein Abgleichung mit dem menschlichen Empfindungen wird erst durch die Entwicklung der Ride Number (RN) verwirklicht. Der Längsebenheitswirkindex (LWI) versucht möglichst umfassend die Wirkung der Unebenheit zu beurteilen und lässt drei unterschiedliche Schwingungserscheinungen in die Auswertung einfließen. Dies sind der Schwingungseintrag auf den menschlichen Körper, die entstehenden Radlastschwankungen sowie die Vertikalbeschleunigungen auf die Ladefläche von LKWs.

Zu dem gesamten Themenkomplex gibt es eine Vielzahl an Literatur, zur besseren Übersicht befindet sich eine Auflistung der wichtigsten in alphabetischer Reihenfolge im Anhang. Weiters ist diese mit einer Kurzfassung und den besprochenen Themenkomplexen sowie relevanten Kennwerten versehen.

Es besteht der berechtigte Wunsch, hier auch international gleiche Auswerteverfahren anzusetzen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Bisher ist der International Roughness Index (IRI), trotz der Einschränkungen die er mit sich bringt, am weitesten verbreitet,

wahrscheinlich auch bedingt durch seine Einfachheit und Anschaulichkeit der Ergebnisse. Als weiterer internationaler Kennwert sei die Spektrale Dichte der Unebenheiten (PSD) genannt. Besonderes Augenmerk ist hierbei immer auf die Spezifikationen der Berechnung zu legen, da schon kleine Unterschiede, wie beispielsweise in der Abschnittslänge, merklichen Einfluss auf das Ergebnis nehmen. Diesem Problem wirken vor allem die europäischen und internationalen Normenwerke zu diesem Themenbereich entgegen.

Forschungstätigkeit im Bereich der Bewertung findet vor allem in Richtung Einsatzmöglichkeiten der Wavelet Transformation, sowie, vor allem in Deutschland, über die Auswertung mittels Verfahren des bewerteten Längsprofils und des Längsebenheitswirkindex (LWI) statt.

Mit dem Wissen über die vorhandenen Bewertungsverfahren kann nun für Österreich ein spezifischer Ebenheitskennwert erstellt werden, der die für relevant befundenen Wirkungen betrachtet und sich dennoch durch Einfachheit und Klarheit in Konzept und Berechnung auszeichnet. Nur so kann gewährleistet sein, dass dieser international akzeptiert und zu einer anerkannten Vergleichsgröße wird.

## 6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Messung mit Latte und Keil [6].	10
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung eines Planografen [8].	11
Abbildung 2-3: California Profilograf [17].	12
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des Braunschweiger Profilografen [9].	12
Abbildung 2-5: Unebenheitsaufnahme mit dem Primal [10].	13
Abbildung 2-6: Funktionsprinzip eines Winkelmessers [8].	14
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung Dipstick.	14
Abbildung 2-8: Dipstick [4].	14
Abbildung 2-9: ARRB Walking Profiler [12].	15
Abbildung 2-10: Profilneigungsmessgerät der Bast [11].	15
Abbildung 2-11: System Bump Integrator [8].	17
Abbildung 2-12: Mobiler Bump Integrator [14].	17
Abbildung 2-13: Messungen mit APL in beiden Radspuren [10].	18
Abbildung 2-14: Funktionsprinzip APL [11].	19
Abbildung 2-15: Die heutzutage gebräuchlichere Variante ist die Abstandbestimmung mittels Laserdiode, die mit dem hier dargestellten Triangulationsprinzip arbeitet [11]...	20
Abbildung 2-16: ALFRED [10].	21
Abbildung 2-17: ARAN [10].	21
Abbildung 2-18: LRST [16].	21
Abbildung 2-19: Dual Track Profiler ICC [17].	21
Abbildung 2-20: Befestigung des Differentialumwandlers am Fahrzeug [10].	22
Abbildung 2-21: Auswertung der Messdaten [19].	23
Abbildung 2-22: Amplitudenübertragung [20].	24
Abbildung 2-23: RoadSTAR bei Messeinsatz [21].	24
Abbildung 2-24: Messvorrichtung des RoadSTAR [21].	24
Abbildung 2-25: HRM [10].	25
Abbildung 2-26: Sensoranordnung auf starrem Balken [20].	25
Abbildung 2-27: ARGUS [10].	26
Abbildung 3-1: Unebenheiten als Funktion des Weges	29
Abbildung 3-2: Reifenlatsch [22].	31
Abbildung 3-3: Klassifizierung nach Varianz der Unebenheitshöhen und subjektivem Empfinden [11].	33
Abbildung 3-4: Zusammengesetztes Profil aus periodischen Schwingungen nach [27].	36
Abbildung 3-5: Darstellung des Unebenheitsspektrums	38

Abbildung 3-6: nach [33] .....	41
Abbildung 3-7: Wirkbereiche der Filter [10]. .....	43
Abbildung 3-8: verschiedene Mother Wavelets [37]. .....	45
Abbildung 3-9: Daubechies Mother Wavelets [38]. .....	45
Abbildung 3-10: Ablaufschema der oktavenbezogenen Bewertung des Unebenheitsprofils; genauer Rechenhergang [30]. .....	49
Abbildung 3-11: Beispiel eines räumlichen Zweiachs-Zweispur-Ersatzmodells, dieses ermöglicht die Anregung an vier Punkten [49]. .....	51
Abbildung 3-12: ebenes Zweiachs-Ersatzmodell (Zweipunktanregung) und Einachs- Ersatzmodell (Einpunktanregung) [49]. .....	51
Abbildung 3-13: Vergrößerungsfunktion der Sitzbeschleunigung [45]. .....	52
Abbildung 3-14: Fahrzeugsatzsystem [3]. .....	54
Abbildung 3-15: Wirkung der Kräfte im Gleichgewicht .....	55
Abbildung 3-16: Filterantwort des IRI-Algorithmus [17]. .....	58
Abbildung 3-17: Abschätzung des Werte Bereiches der IRI Berechnung .....	58
Abbildung 3-18: Verteilung des IRI Wertes auf österreichischen Bundesstraßen [49]. .....	59
Abbildung 3-19: Filterantwort des RN Algorithmus [17]. .....	60
Abbildung 3-20: Berechnungsablauf LWI [33]. .....	63

## 7 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Abnahmegrenzwerte in der RVS [5]. .....	10
Tabelle 2-2: Klassifizierung der Messgeräte [54] .....	27
Tabelle 3-1: Zusammenfassung der Schwingungskennwerte .....	30
Tabelle 3-2: Zusammenspiel von Unebenheitswerten und Subjektivurteilen [28]. .....	42
Tabelle 3-3: Grenzwerte für das bewertete Längsprofil [34]. .....	49
Tabelle 3-4: Belastungen bei Erreichung des Grenzwertes [50]. .....	64
Tabelle 4-1: Zustandsklasseneinteilung für Autobahnen und Schnellstraßen [5]. .....	66
Tabelle 4-2: Beurteilung des Zustandes von HLS über die Standardabweichung des Winkelwertes [25]. .....	67
Tabelle 4-3: Warn- und Schwellenwerte für das Unebenheitsmaß [24]. .....	68
Tabelle 4-4: Klasseneinteilung aufgrund PSD [53]. .....	70

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AWASTHI G., SINGH T. and DAS A.: On Pavement Roughness Indices. IE-Journal CV, Vol.84, The Institution of Engineers, India, 2003
- [2] ARBEITSAUSSCHUSS 4.2 „EBENHEIT“ DER FGSV: Technische Prüfvorschrift für Ebenheitsmessung auf Fahrbahnoberflächen im Längs- und Querprofil, Teil 1: Berührungslose geschwindigkeitsunabhängige Messungen. (Entwurf), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2004
- [3] SAYERS M. W., GILLESPIE T. D. and QUEIRIOZ C.A.: The International Road Roughness Experiment, Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. World Bank Technical Paper Nr. 45, The World Bank, Washington, 1986
- [4] SAYERS M.W. and KARAMIHAS S.M.: The Little Book Of Profiling. University of Michigan, Michigan, 1998
- [5] RVS – Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Wien,
- RVS 8S.04.11: Technische Vertragsbedingungen für Straßenbauten – Asphalt – Anforderungen an Asphaltsschichten. 2004
- RVS 8S.06.32: Technische Vertragsbedingungen für Straßenbauten – Betondecken – Deckenherstellung. 2001
- RVS 11.066 Teil II: Feldprüfungen, Teil II – Ebenheitsmessung mit dem Planograf. 1995
- RVS 11.066 Teil VIII: Feldprüfungen, Teil VIII – Längsebenheitsmessung mit dem System RoadSTAR. 2004
- RVS 13.512 (Entwurf): Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR. 2005
- [6] SULTEN P.: Erfassen und Beurteilen der Längsebenheit von Straßen. Straße und Autobahn, Heft 2, Kirschbaum Verlag, Köln, 1992
- [7] GERZ U.: Fahrbahnunebenheiten – Messverfahren bei Straßen. VDI Berichte Nr. 877: Unebenheiten von Schiene und Straße als Schwingungsursache, VDI Verlag, Düsseldorf, 1991
- [8] AUGUSTIN H. und PIPPICH J.: Zerstörungsfreie Bestimmung von Kenngrößen der Straße mit den Geräten des Messfahrzeuges zum Zweck der Kontrolle und Abnahme durch die Baubehörde. Straßenforschung, Heft 174, BMBT, Wien, 1981
- [9] BRAUN H. und LAERMANN F.: Vergleichende Unebenheitsmessungen zwischen TRRL-High-Speed-Profilometer und dem Braunschweiger Profilografen. Straße und Autobahn, Heft 12, Kirschbaum Verlag, Köln, 1980
- [10] DESCORNET G., DUCROS D-M., PETKOVIC L., BELEMONT B., ALONSO M., YANGUAS S., JENDRYKA W., ANDREN P.: FILTER Experiment – Longitudinal Analysis. FEHRL – Investigation on Longitudinal and Transverse Evenness of Roads, Belgian Road Research Centre, Brüssel, 2001
- [11] BRAUN H., MITSCHKE M., UECKERMANN A., GERZ U., OHNEMÜLLER L., SULTEN P., LIESNER W., ALTENDORFER D., HELLENBROICH T.: Sammlung und Auswertung von Straßenunebenheitsdaten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 598, BM für Verkehr, Bonn - Bad Godesberg, 1991

- 
- [12] KARAMIHAS S.: The 2004 FHWA Profiler Round-Up. Transportation Research Institute, University of Michigan, Michigan, 2004
- [13] JORDAN P. and YOUNG J.: Developments in the calibration and use of the Bump-Integration for ride assessment. TRRL-Supplementary Report 604, UK, 1980
- [14] ROMDAS: Specification Sheet, Bump Integrator. Romdas, New Zealand, 2004
- [15] SPRICE J., KROPAC O. and SPRINC M.: Characterization of Longitudinal Road Unevenness in the Light of the International PIARC-EVEN Experiment 1998. Vehicle System Dynamics, Vol. 37, No. 4, Swets & Zeitlinger, London, 2002
- [16] VTI Väg-Och Transportforskningsinstitut, [www.vti.se](http://www.vti.se)
- [17] PERERA R. and KOHN S.: Issues in pavement smoothness. National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Web Document 42, Michigan, 2002
- [18] KOKOT D. and LEBEN B.: New Slovenian Criteria for Pavement Roughness Evaluation. Beitrag zum 5<sup>th</sup> Symposium on Pavement Surface Characteristics, World Road Association, Toronto, 2004
- [19] SCHNIERING A.: Berührungslose Ebenheitsmessung mit schnellfahrenden Geräten. Fahrzeug und Fahrbahn, Beitrag zur FGSV Tagung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Weimar, 2004
- [20] JORDAN P. und SULTEN P.: Ein Profilometer für die schnelle Bewertung des Zustands von Straßenbefestigungen. Straße und Autobahn, Heft 2, Kirschbaum Verlag, Köln, 1984
- [21] GRUBER J.: Straßenzustandserfassung mit dem RoadSTAR. Beitrag zum 1.ÖSAG Innovationstag, Österreich, 2003
- [22] KOESSLER P.: Ebenheit und Griffigkeit aus Sicht der Fahrzeugtechnik. Straße und Autobahn, Heft 9, Kirschbaum Verlag, Köln, 1968
- [23] CEN standards, Comité Européen de Normalisation:  
pre-EN 13036-5: Surface Characteristics of road and airfield pavements. Test methods – Determination of Longitudinal Unevenness Indices, Final draft, 2004  
pre-EN 13036-6: Surface Characteristics of road and airfield pavements. Test methods – Measurement of transverse and longitudinal profiles in the unevenness and meagtexture wavelength ranges, 2005
- [24] ZEB – Zustandserfassung und –bewertung von Straßen, Forschungsgesellschaft für Straße und Verkehrswesen (FGSV):  
Arbeitspapier Nr. 9/A1: FGSV-Arbeitspapier zur Zustandserfassung und –bewertung. Köln, 2001  
ZTV ZEB-StB (Entwurf): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und –bewertung von Straßen. 2004
- [25] SN – Schweizer Norm, Richtlinienwerk des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute, VSS, Zürich:  
SN 640 520a: Ebenheit – Prüfung der Geometrie. 1977  
SN 640 521c: Ebenheit – Qualitätsanforderungen. 2003

- SN 640 904: Erhaltungsmanagement (EM); Gesamtbewertung von Fahrbahnen, Kunstbauten und technischen Ausrüstungen: Substanz- und Gebrauchswerte. 2003
- SN 640 935b: Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF), Zustandserhebung und Indexbewertung. 2003
- [26] SUN L.: On Human Perception and Evaluation to Road Surfaces. Journal of Sound and Vibration, Elsevier, 2001
- [27] BECKER W.: Die Spektrale Dichte – ein Maß für die Fahrbahnunebenheit im Längsprofil. Straße und Autobahn, Heft 10, Kirschbaum Verlag, Köln, 1995
- [28] MITSCHKE M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [29] DAVIS B.R. and THOMPSON A.G.: Power Spectral Density of Road Profiles. Vehicle System Dynamics, Vol. 35, No. 6, Swets & Zeitlinger, London, 2001
- [30] UECKERMANN A.: Das bewertete Längsprofil. Straße und Autobahn, Heft 1, Kirschbaum Verlag, Köln, 2005
- [31] WESTERMANN T.: Mathematik für Ingenieure mit Maple. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1997
- [32] STEINAUER B. und UECKERMANN A.: Ein vereinfachtes Verfahren zur Auswertung der Längsebenheit von Straßen. Straße und Autobahn, Heft 4, Kirschbaum Verlag, Köln, 1999
- [33] UECKERMANN A.: Der Längsebenheitswirkindex LWI. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 839, BM für Verkehr, Bonn – Bad Godesberg, 2002
- [34] UECKERMANN A.: Ein geometrische basiertes Verfahren zur Lokalisierung und Bewertung einzelner, periodischer und regelloser Unebenheiten im Straßenlängsprofil. Aachener Mitteilungen für das Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Nr.44, ISAC – Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen, Aachen, 2004
- [35] RONDOS L.: Proceedings Closing Conference TEMPUS JEP – 1180 Educational Developments in Pavement Managing Systems, TU Delft, Bratislava, 1993
- [36] DAUBECHIES I.: Ten Lectures on Wavelets. Soc. for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1992
- [37] LIEBIG S. und QUARZ V.: Zur waveletbasierten Synthese stochastischer Fahrwegstörungen für die numerische Simulation der Dynamik von Fahrzeugen. VDI-Bericht 1846, Humanschwingungen, VDI Verlag, Dammstadt, 2004
- [38] WEI L., FWA T. and ZHE Z.: Pavement Roughness Analysis Using Wavelet Theory. Beitrag zur 6th International Conference on Managing Pavement, Queensland, 2004
- [39] GRAPS A.: An Introduction to Wavelets. IEEE Computational Science and Engineering, IEEE Computer Society, USA, 1995
- [40] WEI L., FWA T. and ZHE Z.: Wavelet Analysis and Interpretation of Road Roughness. Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No.2, American Society of Civil Engineers, USA, 2005

- [41] SHIRAKAWA T., KAWAMURA A. and NAKATSUJI T.: Application of the Second Generation Wavelet Transform for Pavement Preventive Maintenance. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, Eastern Asia Society for Transportation Studies, Tokyo, 2005
- [42] STEINAUER B. und UECKERMANN A.: Die Längsebenheit – auch eine Beanspruchungskomponente für Straße und Fahrer. Straße und Autobahn, Heft 8, Kirschbaum Verlag, Köln, 2001
- [43] VDI-Richtlinie 2057, Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörper - Schwingung. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2002
- [44] STEINAUER B.: Harmonisierung zwischen Befahrbarkeitszustand und Ausbauzustand von Straßen. Informationen – Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 38, Universität der Bundeswehr, München-Neubiberg, 1994
- [45] STEINAUER B.: Stochastische und periodische Unebenheiten auf Fahrbahnen, Informationen – Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 32, Universität der Bundeswehr, München-Neubiberg, 1991
- [46] SAYERS M., GILLESPIE T. and PATERSON D.: Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. World Technical Paper 46, The World Bank, Washington, 1986
- [47] SAYERS M. and KARAMIHAS S.: Interpretation of Road Roughness Profile Data. Final Report, Federal Highway Administration, USA, 1996
- [48] ARCHONDO-CALLAO R. S.: Unpaved Roads' Roughness Estimation by Subjective Evaluation. The World Bank Transport No. RT-2, Infrastructure Notes, The World Bank, 1999
- [49] GRUBER J., MAURER P.: Zustandserfassung der Straßenoberfläche auf Bundesstraßen B, Messungen mit dem RoadSTAR in den Jahren 2001 und 2002. Straßenforschung, Heft 542, BMVIT, Wien, 2004
- [50] MITSCHKE M., BRAUN H. und LIESNER W.: Ermittlung zulässiger Amplituden und Wellenlängen periodischer Fahrbahnunebenheiten unter den Gesichtspunkten Straßen- und Ladegutbeanspruchung, Fahrsicherheit und Schwingempfinden. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 466, BM für Verkehr, Braunschweig, 1986
- [51] STEINAUER B., KEMPKENS E. und UECKERMANN A.: Zustandserfassung und –bewertung der Bundesfernstraßen – Verbessertes Verfahren zu Beurteilung der Längsebenheit. Straße und Autobahn, Heft 1, Kirschbaumverlag, Köln, 2003
- [52] BÜHLER B., KLINKHAMMER S., GAST H., MAERSCHALK G., KOCH R. und OERTELT S.: Erstellung eines Leitfadens für die Erfassung und Bewertung des Zustands von Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 832, BM für Verkehr, Bonn – Bad Godesberg, 2002
- [53] ASTM standards, American Society for Testing and Materials:  
E867-04: Terminology Related to Vehicle Pavement Systems. 2004  
E950-98: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference. 2004  
E1082-90: Standard Test Method for Measurement of Vehicular Response to Traveled Surface Roughness. 1995

- E1170-97: Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surfaces. 2001
- E1215-93. Standard Specification for Trailers Used for Measuring Vehicular Response to Road Roughness. 2003
- E1274-03: Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Profilograph. 2003
- E1364-95: Standard Test Method for Measuring Pavement Roughness Using a Static Level Method. 2000
- E1489-98: Standard Practice for Computing Ride Number of Roads from Longitudinal Profile Measurements Made by an Inertial Profile Measuring Device. 2003
- E1926-98: Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements. 2003
- WK366: Test Method for Using a Rolling Inclinator to Measure Longitudinal and Transverse Profiles of a Traveled Surface. 2005
- [54] ISO standards, International Organization for Standardization:  
ISO 8608: Mechanical Vibrations-road surface profiles-reporting measured data, 1995  
ISO 13473-3: 2002: Characterization of pavement texture by the use of surface profiles – Part 3: specification and classification of profilometers, 2002
- [55] KARAMIHAS S., PERERA R., GILLESPIE T. and KOHN S.: Transverse Variations in International Roughness Index. 80<sup>th</sup> TRB Annual Meeting (Paper Nr. 01-2851), Washington, 2001

## 9 ANHANG

Anhang A:	Berechnung Spektrale Dichte	82
Anhang B:	Ermittlung AUN und w	87
Anhang C:	Spektrale Dichte mittels vereinfachtem Verfahren	89
Anhang D:	Berechnung des Internationalen Roughness Index IRI	93
Anhang E:	Kurzübersicht über relevante Fachbücher (in alphabetischer Reihenfolge)	95

## Anhang A: Berechnung der Spektralen Dichte

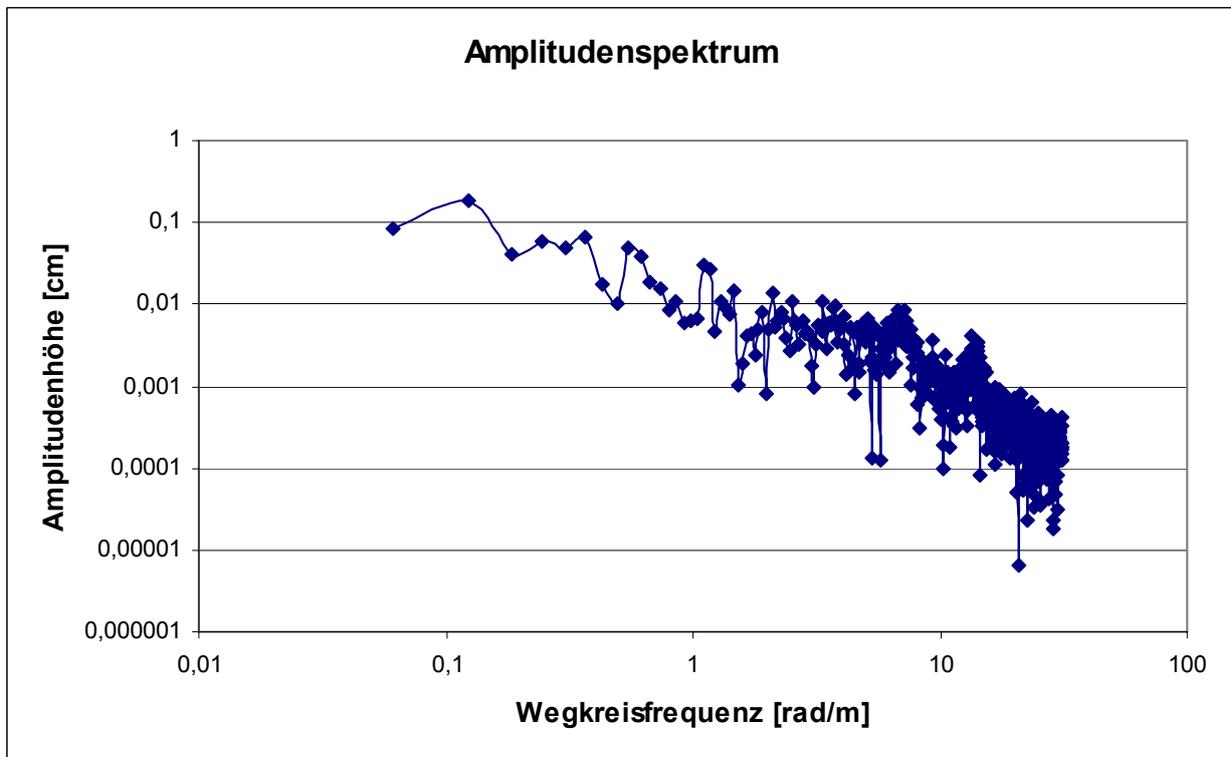
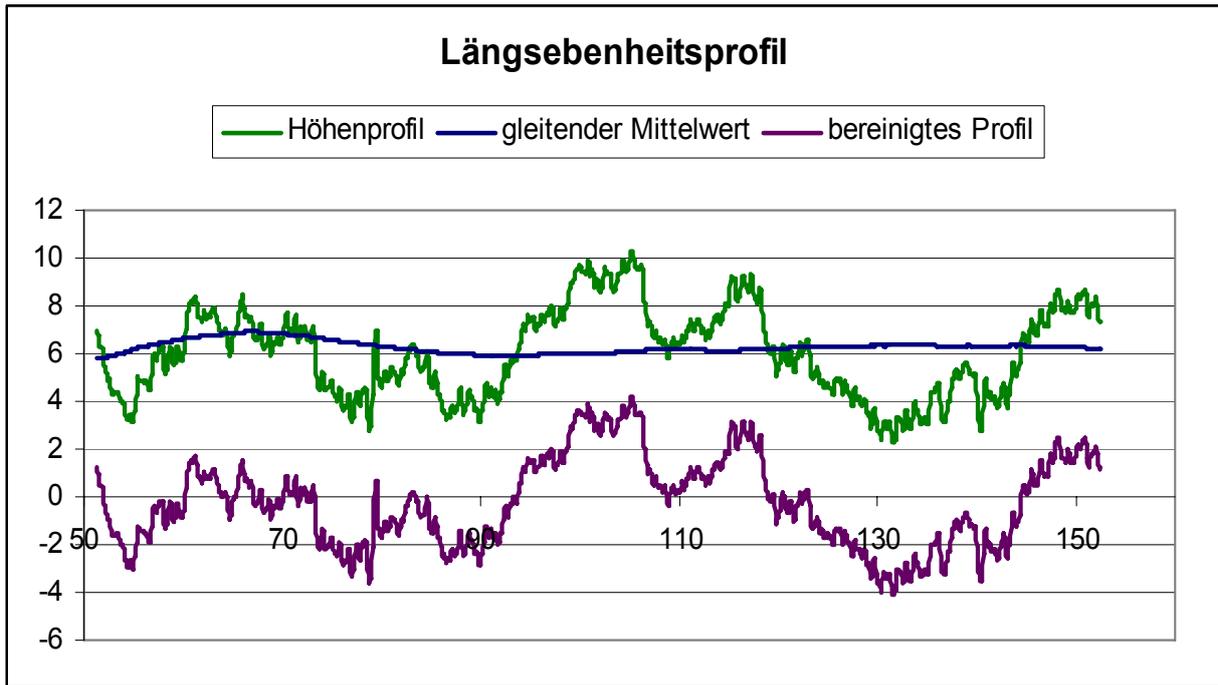
Die nachfolgende Berechnung hat das Ziel, die in der Arbeit erläuterten Berechnungsschritte, nochmals übersichtlich darzustellen und anhand von Datenmaterial nachvollziehbar zu machen. Vor allem auch die graphische Darstellung der Ergebnisse ermöglicht die Auswirkung der einzelnen Berechnungsschritte auf die Daten zu erfassen. Hierbei möchte ich den Verlauf des gleitenden Mittelwerts und das sich daraus ergebende bereinigte Profil, sowie die Gegenüberstellung von 3-Punkt Glättung und Oktavenglättung erwähnen.

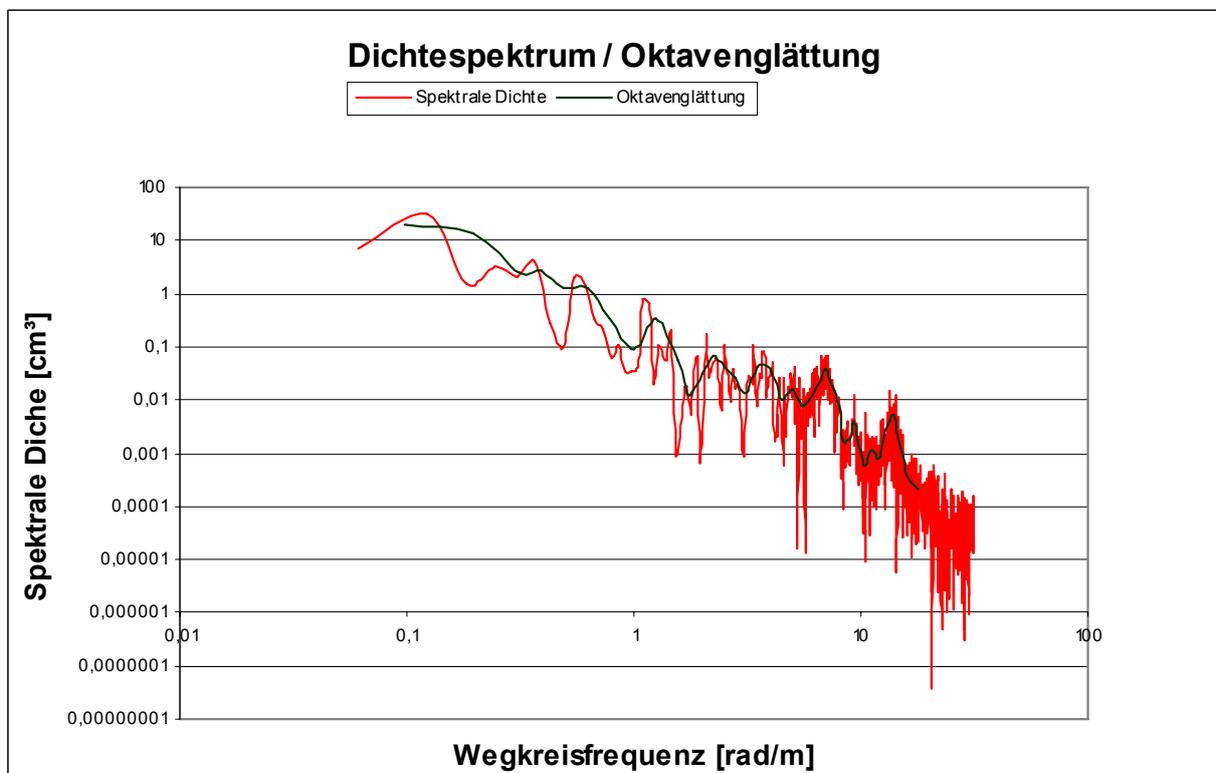
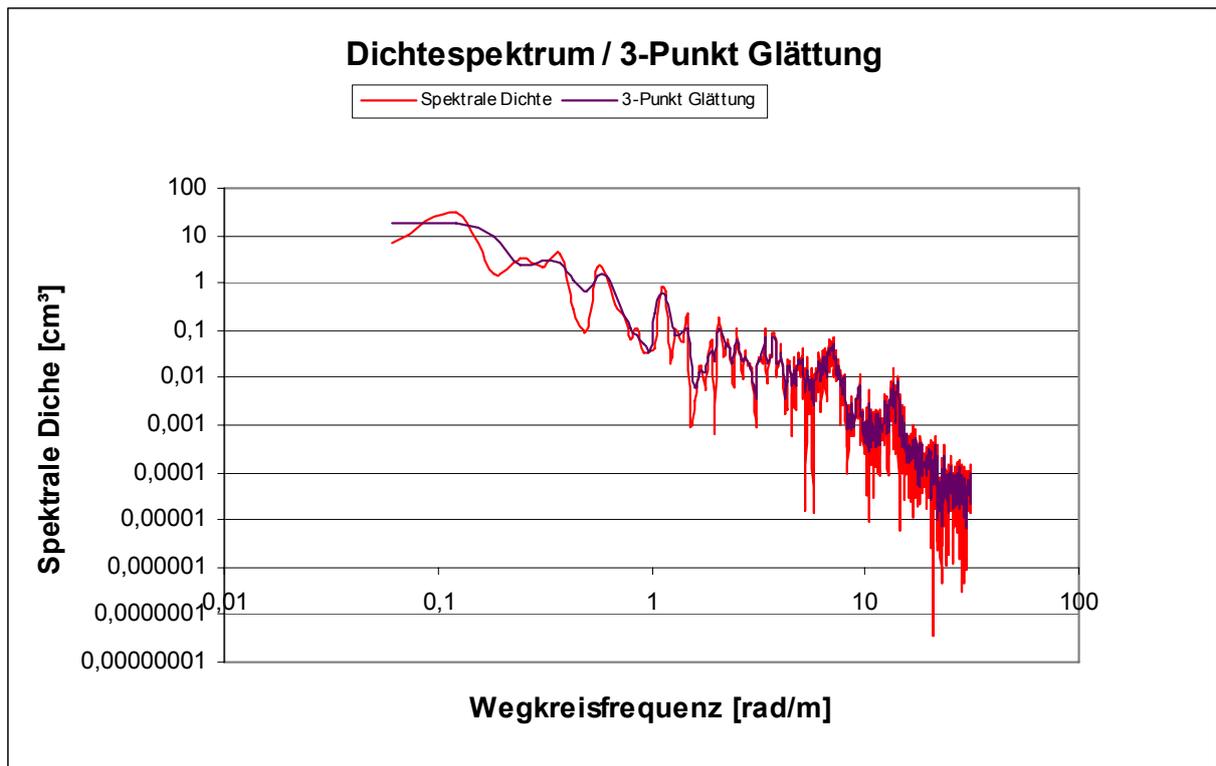
Die verwendeten Daten stellen das Höhenprofil eines kurzen Stückes einer österreichischen Autobahn dar. Es flossen insgesamt 2048 Profilwerte in die Berechnung ein, das entspricht einem betrachteten Abschnitt von 102,4 m Länge, mit einem, für die Bildung des gleitenden Mittelwerts notwendigen, Vorlauf sowie Nachlauf von 51,2 m. In der folgenden Darstellung sind jedoch nur die ersten 60 Werte des betrachteten Abschnitts angeführt.

Die Berechnungsschritte an sich wurden in allen Fällen mit einem herkömmlichen Tabellenkalkulationsprogramm (das die Möglichkeit einer Fourieranalyse bietet) durchgeführt.

Wegstrecke x [m]	Profilhöhe h [mm] (dx = 0,1)	n	gleitender Mittelwert $\mu$	bereinigtes Profil (h- $\mu$ )	betrachteter Abschnitt	Profilhöhe [mm]	CDTW	Eingangsdaten [cm] (h*CDTW)
51	7,279335825	511						
51,05								
51,1	7,187956833	512						
51,15								
51,2	6,957850556	513	5,766932116	1,190918441	1	1,190918441	0,00	4,46889E-34
51,25					2	1,091577369	0,00	2,56839E-05
51,3	6,86764536	514	5,776067991	1,091577369	3	1,041979963	0,00	9,80444E-05
51,35				0	4	0,925595792	0,00	0,000195883
51,4	6,827393097	515	5,785413134	1,041979963	5	0,567592276	0,00	0,000213428
51,45				0	6	0,452270183	0,01	0,000265538
51,5	6,720148097	516	5,794552305	0,925595792	7	0,482890578	0,01	0,00040791
51,55				0	8	0,3514979	0,01	0,000403728
51,6	6,370954983	517	5,803362707	0,567592276	9	-0,079615765	0,01	-0,000119299
51,65				0	10	-0,414723464	0,02	-0,000785457
51,7	6,264223388	518	5,811953205	0,452270183	11	-0,549051025	0,02	-0,001281868
51,75				0	12	-0,724744867	0,03	-0,002044018
51,8	6,303054944	519	5,820164365	0,482890578	13	-0,963870178	0,03	-0,003229312
51,85				0	14	-0,954375767	0,04	-0,003745255
51,9	6,179202821	520	5,827704922	0,3514979	15	-0,949730135	0,05	-0,004313295
51,95				0	16	-1,175090121	0,05	-0,006112452
52	5,754951167	521	5,834566932	-0,079615765	17	-1,451740033	0,06	-0,008570981
52,05				0	18	-1,636947083	0,07	-0,010881913
52,1	5,426491482	522	5,841214946	-0,414723464	19	-1,639639817	0,07	-0,012186197
52,15				0	20	-1,607236768	0,08	-0,013270723
52,2	5,299067712	523	5,848118738	-0,549051025	21	-1,598097097	0,09	-0,014575859
52,25				0	22	-1,590876632	0,10	-0,015945574
52,3	5,130699342	524	5,85544421	-0,724744867	23	-1,564025689	0,11	-0,01714663
52,35				0	24	-1,625065441	0,12	-0,019403088
52,4	4,899337377	525	5,863207555	-0,963870178	25	-1,850160291	0,13	-0,023964097
52,45				0	26	-2,02767835	0,14	-0,028387243
52,5	4,917098573	526	5,87147434	-0,954375767	27	-2,079096568	0,15	-0,031355245
52,55				0	28	-2,155622894	0,16	-0,034911099
52,6	4,930524336	527	5,880254471	-0,949730135	29	-2,302042586	0,17	-0,039920544
52,65				0	30	-2,532760417	0,19	-0,04690188
52,7	4,71425967	528	5,889349791	-1,175090121	31	-2,703409838	0,20	-0,053323267
52,75				0	32	-2,815051153	0,21	-0,059001508
52,8	4,446821942	529	5,898561975	-1,451740033	33	-2,910417853	0,22	-0,064673816
52,85				0	34	-2,732001693	0,24	-0,064228865
52,9	4,271124544	530	5,908071626	-1,636947083	35	-2,665978811	0,25	-0,066177807
52,95				0	36	-2,877061428	0,26	-0,075264038
53	4,278267107	531	5,917906924	-1,639639817	37	-3,05100961	0,28	-0,083962056
53,05				0	38	-2,861596379	0,29	-0,082700097
53,1	4,321122402	532	5,92835917	-1,607236768	39	-2,523749339	0,30	-0,076470609
53,15				0	40	-2,215457883	0,32	-0,070272884
53,2	4,34089372	533	5,938990817	-1,598097097	41	-1,893612736	0,33	-0,062783691
53,25				0	42	-1,421457033	0,35	-0,0491931
53,3	4,358773095	534	5,949649727	-1,590876632	43	-1,206245123	0,36	-0,043514105
53,35				0	44	-1,360299228	0,38	-0,05108416
53,4	4,39609834	535	5,960124029	-1,564025689	45	-1,424765021	0,39	-0,055629862
53,45				0	46	-1,435486661	0,41	-0,058204056
53,5	4,346047361	536	5,971112802	-1,625065441	47	-1,392198459	0,42	-0,05855182
53,55				0	48	-1,43227909	0,44	-0,062411697
53,6	4,133653047	537	5,983813338	-1,850160291	49	-1,521486364	0,45	-0,068617731
53,65				0	50	-1,492291364	0,47	-0,069582269
53,7	4,015123599	538	5,997303509	-1,98217991	51	-1,490682882	0,48	-0,071790749
53,75				0	52	-1,698397165	0,50	-0,0843988
53,8	3,983321418	539	6,010999769	-2,02767835	53	-1,900228084	0,51	-0,097343101
53,85				0	54	-1,871223632	0,53	-0,098725314
53,9	3,945245148	540	6,024341716	-2,079096568	55	-1,722046637	0,54	-0,09348968
53,95				0	56	-1,566565941	0,56	-0,087439337
54	3,881853002	541	6,037475896	-2,155622894	57	-1,230637393	0,57	-0,07056047
54,05				0	58	-0,702298306	0,59	-0,041330404
54,1	3,748141739	542	6,050184325	-2,302042586	59	-0,405305405	0,60	-0,024462438
54,15				0	60	-0,510327773	0,62	-0,031564375

FFT (komplexe Größe als Amplituden und Phaseninformation)	Amplitude (norm)	Wegkreisfrequenz [rad/m]	Spektrale Dichte [cm <sup>2</sup> ] H <sup>2</sup> /(2ΔΩ)	3-Punkt Glättung	Bandglättung	Frequenz bandmittwerte	zugehörige Wegkreisfrequenz	
Anzahl der Daten N=1024 Abschnittslänge L= 102,4m ΔΩ=2π/L= 0,0613592								
-27,6482420431233	0,054000473	0	2,715671054	nL	2 3	19,126087	0,09802	
-43,1016816577447-6,53141175227788i	0,085144026	0,0613592	6,751346651	18,8498865	nH	3 5	13,7230979	0,196
80,6711653438108-46,9439403998713i	0,182296473	0,1227185	30,94842635	17,53681535	Be	0,06136 0,06		
-11,4741770540593+17,0384649896524i	0,040120726	0,1840777	1,499062036	9,291302243	nl	0,0694 0,14		
0,529191779161768+30,0953407584963i	0,058789049	0,2454369	3,21865855	2,514628212	nh	0,1388 0,28		
-24,0093201017019-4,57219509876805i	0,047735926	0,3067962	2,122133714	2,872335904				
21,2978301833356+26,0726954979098i	0,065753427	0,3681554	4,026417639	2,614694741				
-7,14986721809757-5,36359322233218i	0,017457128	0,4295146	0,283809974	1,172889016	nL	5 6 7	2,57648366	0,3116
-4,02328312246191+3,35609117842196i	0,010232987	0,4908739	0,097518479	0,650586804	nH	6 7 9	2,75287147	0,3927
-9,77313447008125+22,4103309495782i	0,047751294	0,5522331	2,123500282	1,445872255	Be	0,06136 0,06 0,06	1,25914681	0,4945
5,05630635281702-19,4803664968742i	0,039308353	0,6135923	1,438969977	1,335817666	nl	0,2777 0,35 0,44	1,25224973	0,6233
3,50942332056615-9,15994872357318i	0,019158624	0,6749515	0,341830403	0,583990355	nh	0,34997 0,44 0,56	0,34272931	0,7854
-2,40913495622603-7,3651752641653i	0,015135111	0,7363108	0,213330639	0,208225737			0,08872279	0,9896
2,99629289199145-3,02541639186507i	0,008316487	0,79767	0,064411268	0,113408217			0,33035057	1,2466
5,41236286613972+1,44443025675841i	0,010940996	0,8590292	0,111479691	0,080340884			0,05732431	1,5708
1,086310364848+2,89628635729711i	0,006041614	0,9203885	0,033992884	0,054019065				
-2,71891820232373-1,70673295175975i	0,006269943	0,9817477	0,036610801	0,0327537627				
0,470749147150393+3,44446137486095i	0,006790002	1,0431069	0,042936021	0,239273372				
-13,6032513332346+7,06281469455803i	0,029936494	1,1044662	0,834610647	0,59650483				
12,1844814284233-6,42040543699225i	0,026899516	1,1658254	0,673862007	0,550722481				
0,998851920632344+2,18822500882086i	0,004698081	1,2271846	0,020555265	0,206842786				
4,92525117732742-2,71672845904822i	0,010985996	1,2885439	0,112398605	0,079857158				
0,281954683030352-4,55767049202996i	0,008918718	1,3499031	0,074077598	0,079142195				
-1,45123793816878-3,6961303427784i	0,007755522	1,4112623	0,056014977	0,09667706				
-6,52407539776771+3,72865478411516i	0,014676591	1,4726216	0,200600689	0,114553986				
0,105304403372424-0,519886513938097i	0,001036024	1,5339808	0,000999589	0,051488468				
-2,59794454677384E-002-0,9713044954023i	0,001897758	1,59534	0,003354003	0,005846346	nL	27 30 34	0,01240056	1,7631
-0,85938598678145+1,91691013710986i	0,004102999	1,6566993	0,015677788	0,013010965	nH	30 34 38	0,03320509	1,9792
1,62130523074312+1,50024622024277i	0,004314315	1,7180585	0,01733428	0,013929769	Be	0,06136 0,06 0,06	0,06558678	2,2127
1,21365108700954+0,198500544907057i	0,002401908	1,7794177	0,005372728	0,012732558	nl	1,66442 1,87 2,1	0,04138702	2,4938
-2,15708264055437+1,33383089853626i	0,004953439	1,8407769	0,022850495	0,027618811	nh	1,86799 2,1 2,35	0,02559885	2,7985
-4,0886602897665-5,95861543555301E-001	0,007986524	1,9021362	0,059401529	0,035575395			0,01329433	3,1416
0,280273801627-0,322310283067934i	0,000834173	1,9634954	0,000648028	0,021186031			0,04106872	3,5261
1,969088834448703-1,7004324618984i	0,005081422	2,0248546	0,024046541	0,057637658			0,03699099	3,9584
6,16340930037492-3,63171423216575i	0,01397228	2,0862139	0,181809521	0,103472499			0,01041814	4,4428
-0,268886426035144+2,70361307319925i	0,005306545	2,1475731	0,026224413	0,068040102			0,01673889	4,9870
2,07156230659387-2,5253822346436i	0,006379555	2,2089323	0,03790206	0,040664598			0,00769453	5,5977
-4,13045882238553-7,6214034752658E-002	0,008068676	2,2702916	0,060629858	0,050505908			0,01740365	6,2832
-3,19129470060545+1,37137923726054i	0,006784135	2,3316508	0,042861857	0,040140066				
-1,7508022908028-0,966274553123987i	0,003905759	2,39301	0,014206693	0,019541201				
1,35551195897546-0,319228171742233i	0,002719911	2,4543693	0,006889559	0,033557897				
0,183754081786108+5,46562052334833i	0,010681071	2,5157285	0,106245777	0,064479694				
2,40222876843657+2,25325020426655i	0,006432824	2,5770877	0,038537663	0,052922115				
2,59518724047105-1,11805054750218i	0,005519102	2,638447	0,028367357	0,026169116				
-0,737169746629544-1,4504160155657i	0,003177732	2,6998062	0,009404088	0,021484152				
-1,44206689596176-2,9717284679313i	0,006451443	2,7611654	0,038761075	0,025952787				
-1,10258854680431+1,88073832160757i	0,004258027	2,8225246	0,016884912	0,023045365				
0,399608948177556+2,31768944023861i	0,004593529	2,8838839	0,019650561	0,017939681				
-1,6067183170804-1,3423714519454i	0,004089223	2,9452431	0,015572689	0,013399842				
0,713523609976149-0,529161603412455i	0,001735017	3,0066023	0,002803429	0,00551968				
-0,204379214130905-0,459711538612932i	0,000982609	3,0679616	0,000899174	0,003554205				
1,47445476509328+0,729719167187606i	0,003213177	3,1293208	0,009615044	0,012155123				
2,55756183294397-1,21605108228978i	0,005531139	3,19068	0,028491231	0,022855262				
-2,17894248123821+1,49656485940244i	0,005162866	3,2520393	0,024823541	0,024306733				
0,746365366244348+2,19456862629691i	0,004527373	3,3133985	0,01908862	0,043423725				
-1,71488791613214-5,31206939385943i	0,010902378	3,3747577	0,110694117	0,068151611				
0,841669622866839-2,88715172406069i	0,005873698	3,436117	0,032129592	0,045620586				
1,21895973502092+0,795903852962481i	0,002843341	3,4974762	0,007529044	0,019731634				
2,02364139941673-2,19975938765804i	0,005837873	3,5588354	0,031738856	0,024608379				
-1,44616756797392+2,37252349790942i	0,00542683	3,6201947	0,027426761	0,039965711				

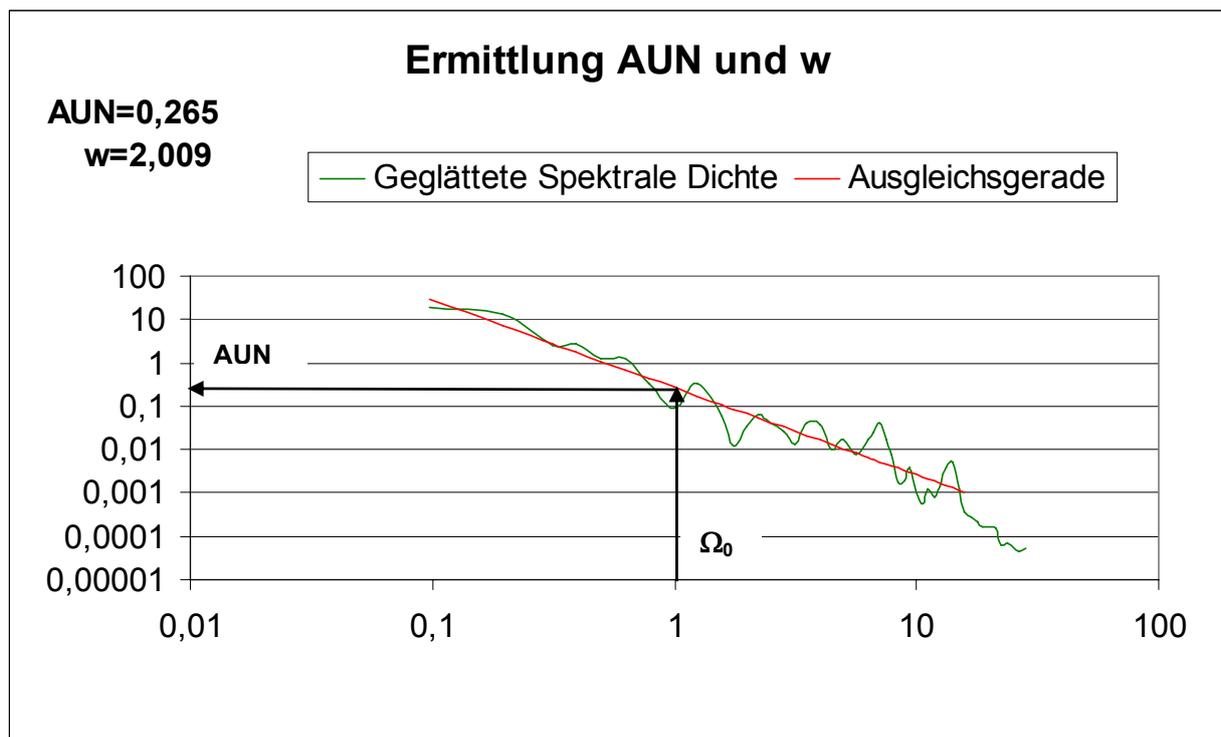




## Anhang B: Ermittlung AUN und w

Zur Klassifizierung und Bewertung der Ebenheit der Straße werden, aus den in Anhang A ermittelten Werten der Spektralen Dichte, die Kennwerte AUN und w ermittelt. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Kapitel 3.3.4.

In einem ersten Schritt wird die Ausgleichsgerade festgelegt, die Welligkeit ergibt sich aus der Neigung der Geraden, den AUN erhält man bei einer Wegkreisfrequenz von  $\Omega_0=1$  rad/m.



Frequenzbandmittelwerte der Spektralen Dichte		Ausgleichsgerade	quadr. Abweichungen
Wegkreisfrequenz [rad/m]	Dichte [cm <sup>3</sup> ]	AUN= w= Y=AUN*X <sup>-w</sup>	0,26579176 2,009367113
0,09802	19,12608702	28,27226384	0,028809786
0,196	13,72309791	7,025203141	0,084560729
0,3116	2,576483661	2,767516024	0,000964895
0,392699082	2,752871473	1,738698293	0,039824875
0,494486684	1,259146813	1,094201231	0,003718459
0,623291982	1,252249729	0,687197512	0,067917242
0,785398163	0,34272931	0,431861466	0,010078796
0,989601686	0,088722792	0,271433334	0,235834537
1,246583965	0,330350567	0,170687535	0,082238897
1,570796327	0,057324315	0,107266641	0,074052456
1,763061797	0,012400563	0,085054956	0,699327796
1,979203372	0,03320509	0,067419171	0,094604685
2,221734325	0,06558678	0,053445329	0,007904375
2,493796248	0,041387016	0,042374261	0,000104817
2,798530736	0,025598848	0,033612043	0,013988853
3,141592654	0,013294331	0,026643109	0,091154726
3,526123594	0,04106872	0,021126125	0,083342676
3,958406744	0,036990986	0,016745713	0,118468321
4,442840331	0,010418139	0,013278634	0,01110141
4,986964178	0,01673889	0,010527671	0,040559681
5,59768979	0,00769453	0,008346746	0,00124857
6,283185307	0,017403646	0,00661767	0,176345486
6,657034833	0,023903637	0,005892073	0,369902241
7,052875507	0,040182476	0,005246411	0,781764297
7,471963967	0,017605817	0,004671866	0,331966997
7,916185169	0,007948717	0,004159998	0,079075645
8,386795748	0,001702935	0,00370423	0,113906088
8,885680661	0,001838843	0,003298174	0,064378334
9,414096546	0,003788237	0,002936721	0,012226714
9,973928357	0,001043648	0,002614885	0,159120086
10,56706105	0,000566738	0,002328314	0,376577783
11,19537958	0,001188517	0,002073182	0,058386035
11,8607689	0,000768327	0,001846097	0,144938966
12,56637061	0,001735653	0,001643711	0,000558737
13,31344135	0,003819466	0,001463624	0,173533193
14,1051227	0,005009176	0,001303231	0,341926597
14,94392793	0,001219937	0,001160408	0,000472045
15,83237034	0,000374537	0,001033269	0,194233119
16,77421981	0,000285568	0,000919995	0,258140786
17,77136132	0,000212678	0,000819207	0,343010419
18,82819309	0,000167821	SUMME=	5,427259731
19,94785671	0,000169534	lt. EN 13036-5 Anpassung über den Wegkreisfrequenzbereich	
21,1341221	0,000145751	Ω= 0,06911 bis 17,78 rad/m	
22,39075916	6,17362E-05		
23,72216613	6,8029E-05		
25,13274123	5,31518E-05		
26,62751101	4,52615E-05		
28,21024539	5,32201E-05		
29,88785587	3,85735E-05		

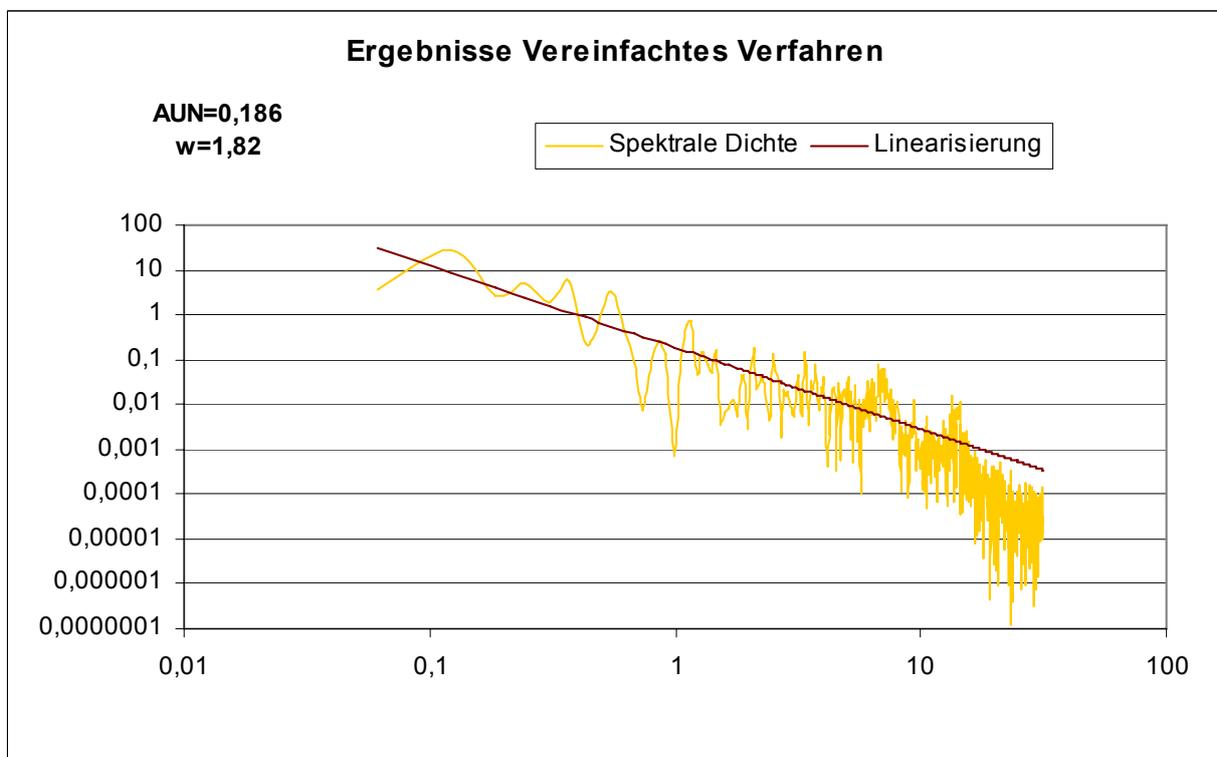
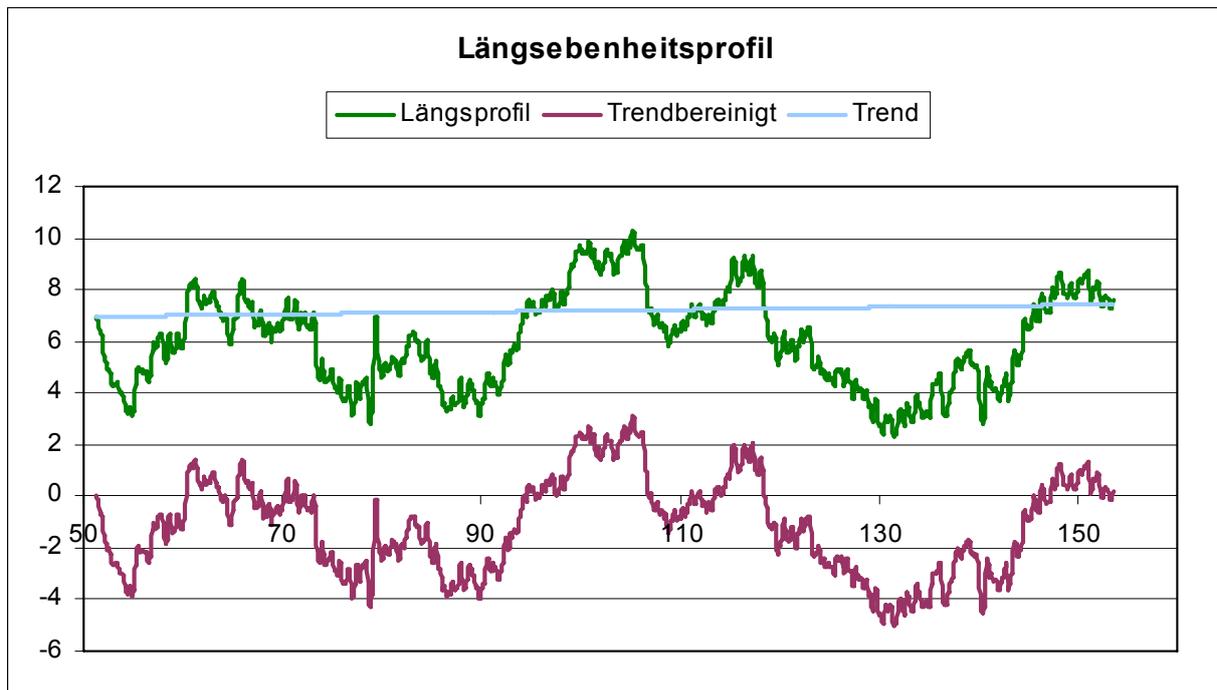
## **Anhang C: Spektrale Dichte mittels vereinfachtem Verfahren**

Diese Berechnung wurde aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit mit denselben Daten durchgeführt, die schon in Anhang A zum Einsatz kamen. Die Vorlauf und Nachlaufdaten, welche zur Berechnung des Gleitenden Mittelwerts erforderlich sind, wurden bei diesem Verfahren nicht benötigt. Das heißt die Betrachtung stützt sich auf einen abgeschlossenen Abschnitt mit 102,4 m Länge.

Das Ergebnis unterscheidet sich doch merklich von den Ergebnissen in Anhang A, jedoch weisen beide Verfahren der Straße eine ausgesprochen gute Ebenheit zu. Einen gewissen Einfluss hat die Einbeziehung eines größeren Bereiches für die Mittelwertbildung beim konventionellen Verfahren, da die betrachtete Straße im Vorlaufbereich des beurteilten Abschnitts etwas größere Unebenheiten aufweist. Zu beachten ist weiters der Unterschied in den einfließenden Wellenlängen, beim konventionellen Verfahren 0,35 – 90 m, im vereinfachten Verfahren 0,2 – 102,4 m. Etwas Unsicherheit bringt auch die Bestimmung der Welligkeit mittels einer Graphik [32] mit sich.

x [m]	l [m]	Profilhöhe h [mm] (dx = 0,1)	Trendbereinigung	FFT
Geradensteigung 0,00461581				
51,2	0	6,95785056	6,957850556	0 -119,155522515047
51,3	0,1	6,86764536	6,958312137	-0,00906668 -30,8611621150717-15,5456205893537i
51,4	0,2	6,8273931	6,958773718	-0,01313806 74,2580727439538-54,4402146336958i
51,5	0,3	6,7201481	6,959235298	-0,02390872 -17,3828924574143+23,8296912928645i
51,6	0,4	6,37095498	6,959696879	-0,05887419 0,760198589901946+39,6248586012334i
51,7	0,5	6,26422339	6,960158459	-0,06959351 -23,9722382638577+7,71913140646326i
51,8	0,6	6,30305494	6,96062004	-0,06575651 22,9317305815725+36,6434467328078i
51,9	0,7	6,17920282	6,961081621	-0,07818788 -6,23587079365306+6,09045031358741i
52	0,8	5,75495117	6,961543201	-0,1206592 -3,43335931299228+13,9588667067174i
52,1	0,9	5,42649148	6,962004782	-0,15355133 -6,98431218310528+32,2035062872008i
52,2	1	5,29906771	6,962466362	-0,16633987 5,45069087045711-10,9987093367544i
52,3	1,1	5,13069934	6,962927943	-0,18322286 4,73973770391399-2,15712899738766i
52,4	1,2	4,89933738	6,963389524	-0,20640521 -0,990593701825163-1,2154110674898i
52,5	1,3	4,91709857	6,963851104	-0,20467525 5,13498135952604+1,32866110412563i
52,6	1,4	4,93052434	6,964312685	-0,20337883 7,9317526410691+4,46854138175545i
52,7	1,5	4,71425967	6,964774265	-0,22505146 3,86527955494252+5,17329789666342i
52,8	1,6	4,44682194	6,965235846	-0,25184139 -0,418786761922699+0,246442993963804i
52,9	1,7	4,27112454	6,965697426	-0,26945729 3,20762897271102+4,60703204742464i
53	1,8	4,27826711	6,966159007	-0,26878919 -10,6261224418613+9,38344554933807i
53,1	1,9	4,3211224	6,966620588	-0,26454982 13,565290305524-7,6663831618205i
53,2	2	4,34089372	6,967082168	-0,26261884 3,19979578270751+2,05656900690299i
53,3	2,1	4,3587731	6,967543749	-0,26087707 6,05082609000509-3,50039448195428i
53,4	2,2	4,39609834	6,968005329	-0,2571907 0,9083423543464-4,86236368161816i
53,5	2,3	4,34604736	6,96846691	-0,26224195 -1,16669095458186-3,84411180441094i
53,6	2,4	4,13365305	6,968928491	-0,28352754 -5,36674592405646+4,15360799795618i
53,7	2,5	4,0151236	6,969390071	-0,29542665 0,320452386615897-1,09317737808119i
53,8	2,6	3,98332142	6,969851652	-0,29865302 -5,01230640902725E-002-1,476350061190i
53,9	2,7	3,94524515	6,970313232	-0,30250681 -0,462855977039467+1,52177545828954i
54	2,8	3,881853	6,970774813	-0,30889218 1,83599102806311+0,779942173443343i
54,1	2,9	3,74814174	6,971236394	-0,32230947 1,24929676865758-0,45936109151921i
54,2	3	3,53003678	6,971697974	-0,34416612 -1,7673026706216+1,30403870516133i
54,3	3,1	3,37210576	6,972159555	-0,36000538 -3,80948825617998+0,27689823272755i
54,4	3,2	3,27317783	6,972621135	-0,36994433 0,522879286060717-0,790687342649715i
54,5	3,3	3,19056639	6,973082716	-0,37825163 2,03484472505714-2,44180201760158i
54,6	3,4	3,38184711	6,973544297	-0,35916972 5,82016790929259-5,15416797582922i
54,7	3,5	3,46096697	6,974005877	-0,35130389 0,87627318325231+2,52740783502514i
54,8	3,6	3,26314482	6,974467458	-0,37113226 2,09884757020517-2,93222969571006i
54,9	3,7	3,10241832	6,974929038	-0,38725107 -3,38464404904634+1,02781939699004i
55	3,8	3,30494167	6,975390619	-0,3670449 -2,08507236377385+2,39414006267022i
55,1	3,9	3,65582361	6,975852199	-0,33200286 -1,205662904084-2,1351335060565E-002i
55,2	4	3,97708563	6,97631378	-0,29992282 1,90224231046198-2,75344437734635E-0i
55,3	4,1	4,3118699	6,976775361	-0,26649055 2,27643644787519+5,90239196300325i
55,4	4,2	4,79697332	6,977236941	-0,21802636 3,6819562317951+2,30199274619712i
55,5	4,3	5,02499646	6,977698522	-0,19527021 2,96779063675295-1,09458747026729i
55,6	4,4	4,88326202	6,978160102	-0,20948981 -0,367504325639204-0,65612370205648i
55,7	4,5	4,830619	6,978621683	-0,21480027 -1,54318426063697-2,11092663693875i
55,8	4,6	4,8317972	6,979083264	-0,21472861 5,35125986904327E-002+2,217096415772i
55,9	4,7	4,88717173	6,979544844	-0,20923731 1,57043751007092+1,93351543317684i
56	4,8	4,85876741	6,980006425	-0,2121239 -1,45827000971873-1,24688349991454i

Amplitude (norm)	Wegkreisfrequenz [rad/m]	Spektrale Dichte [ $\text{cm}^3/\text{H}^2/(2\Delta\Omega)$ ]	Linearisierung		Linearisierung
$\Omega^{-w}$					
1	0,23272563	0	44,1345316	P(ges)= 55,30819	
2	0,06749107	0,061359232	3,71178437	P(lang)= 50,15497	160,71579 29,96590033
3	0,17983603	0,122718463	26,3538153	P(ges)/P(lang)= 1,102746	45,518084 8,486971398
4	0,05760954	0,184077695	2,70445012		21,761953 4,05757585
5	0,07740654	0,245436926	4,88253583	w aus Diagramm= 1,82	12,891676 2,403688283
6	0,04918825	0,306796158	1,97157288		8,5888131 1,601407738
7	0,08442848	0,368155389	5,80855379	SUMME $\Omega$ = 296,6338	6,1634416 1,149190574
8	0,01702467	0,429514621	0,23618242	AUN= 0,186453	4,6556479 0,868058308
9	0,02807599	0,490873852	0,64233292		3,651193 0,68077493
10	0,06435973	0,552233084	3,37534819		2,9467086 0,549421896
11	0,02397509	0,613592315	0,46839312		2,432532 0,453552255
12	0,01017095	0,674951547	0,08429716		2,0451439 0,381322686
13	0,00306242	0,736310778	0,00764223		1,7456159 0,32547487
14	0,01035955	0,79767001	0,08745245		1,5089737 0,281352274
15	0,01778101	0,859029241	0,25763381		1,3185771 0,245852317
16	0,01261292	0,920388473	0,1296348		1,1629806 0,216840919
17	0,00094906	0,981747704	0,00073397		1,0340944 0,192809737
18	0,01096426	1,043106936	0,09795995		0,9260651 0,172667378
19	0,02768781	1,104466167	0,62469412		0,8345697 0,155607803
20	0,03043308	1,165825399	0,75471315		0,7563573 0,141024892
21	0,00742911	1,22718463	0,04497423		0,6889441 0,12845551
22	0,01365306	1,288543862	0,15189741		0,6304047 0,117540684
23	0,00966109	1,349903093	0,07605762		0,5792276 0,107998582
24	0,00784621	1,411262325	0,05016602		0,5342123 0,099605351
25	0,01325457	1,472621556	0,14315994		0,494395 0,092181309
26	0,00222496	1,533980788	0,00403398		0,4589948 0,085580834
27	0,00288516	1,595340019	0,00678311		0,427373 0,079684864
28	0,00310666	1,656699251	0,0078646		0,3990033 0,074395262
29	0,00389607	1,718058482	0,01236924		0,3734487 0,069630532
30	0,00259975	1,779417714	0,00550749		0,3503436 0,065322527
31	0,00428971	1,840776945	0,01499499		0,3293805 0,061413896
32	0,00746004	1,902136177	0,04534944		0,3102989 0,057856086
33	0,00185144	1,963495408	0,00279326		0,2928772 0,054607761
34	0,00620805	2,02485464	0,03140509		0,2769257 0,051633547
35	0,01518419	2,086213872	0,18787682		0,2622811 0,048903022
36	0,00522462	2,147573103	0,02224329		0,2488025 0,046389906
37	0,00704294	2,208932335	0,04042017		0,2363676 0,044071393
38	0,00690872	2,270291566	0,0388942		0,2248699 0,041927618
39	0,00620081	2,331650798	0,03133187		0,2142163 0,039941207
40	0,00235518	2,393010029	0,00452		0,2043247 0,038096909
41	0,00371571	2,454369261	0,01125053		0,1951234 0,036381294
42	0,0123558	2,515728492	0,12440319		0,1865486 0,034782493
43	0,00848115	2,577087724	0,0586137		0,1785438 0,033289987
44	0,00617815	2,638446955	0,0311033		0,171059 0,031894422
45	0,00146882	2,699806187	0,00175803		0,1640494 0,030587463
46	0,00510712	2,761165418	0,02125411		0,1574751 0,029361657
47	0,00433153	2,82252465	0,01528876		0,1513001 0,028210324
48	0,00486511	2,883883881	0,01928745		0,1454925 0,027127466
49	0,00374739	2,945243113	0,01144321		0,140023 0,02610768



## Anhang D: Berechnung des Internationalen Roughness Index IRI

Die folgende Berechnung zeigt die Reaktion des IRI Kennwertes auf ein definiertes Anregungsprofil. Dieses ist in der Graphik ersichtlich und wird in Form von Höhenkoten für den Berechnungsvorgang verwendet. Die eingesetzten fahrzeugspezifischen Werte entsprechen einem amerikanischen Standardwagen der 1980er.

Das Ergebnis entspricht nicht einem Kennwert über den die Ebenheit beurteilt werden kann, sondern stellt den Verlauf der Auslenkung des simulierten Fahrzeugs dar. Der angegebene IRI Wert ergibt sich dann als Summe der Auslenkungen bezogen auf die überfahrene Strecke. Konventionell bezieht sich der IRI Kennwert auf eine Abschnittslänge von 100 m.

### Beispielrechnung laut World Technical Paper 46 [40]

#### Fahrzeugspezifische Werte:

K1=	653	s <sup>-2</sup>
K2=	63,3	s <sup>-2</sup>
μ=	0,15	
C=	6,00	s <sup>-1</sup>
V=	80	km/h

dx=	0,1	Messpunktabstand		
dt=	dx*3600*0,001/V=	0,00450	s	Zeit zwischen Messungen

u= input over the interval i-1 to i (Annahme: konstante Neigungsänderung von i-1 bis i)  
 =beste Annahme für u=Neigungsverlauf

b=	baselength moving average/Aufstandsfläche =	0,25	m
----	---	------	---

A=	0	1	0	0	C=
	-K2	-C	K2	0	
	0	0	0	1	
	K2/μ	C/μ	(-K1+K2)/μ	-C/μ	

0,000	1,000	0,000	0,000
-63,300	-6,000	63,300	6,000
0,000	0,000	0,000	1,000
422,000	40,000	-4775,333	-40,000

B=	0
	0
	0
	4353,333333

#### State Transition Matrix:

ST= e<sup>A\*dt</sup> = I + Σ(A<sup>i</sup>dt<sup>i</sup>/(i!)) =

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

i=1 dt<sup>i</sup>/i! = 0,00450

0,00000	0,00450	0,00000	0,00000
-0,28485	-0,02700	0,2849	0,0270
0,00000	0,00000	0,00000	0,0045
1,89900	0,18000	-21,4890	-0,1800

0,00000	1,00000	0,00000	0,00000
-63,30000	-6,00000	63,30000	6,00000
0,00000	0,00000	0,00000	1,00000
422,00000	40,00000	-4775,333	-40,00000

A

ST=	0,999401438	0,004442351	0,000218886	5,7218E-05
	-0,25705483	0,975036051	0,007965921	0,024584273
	0,003960384	0,000381453	0,954804799	0,004055587
	1,687311789	0,16389515	-19,34263448	0,794870032

**Particular Response Matrix:**

detA= 275566,00

A<sup>-1</sup>=

-0,0948	-0,01733	0,09479	-0,00023
1	0,00000	0,00000	0,00000
0	-0,00153	0,00000	-0,00023
0	0,00000	1,00000	0,00000

ST-1=

-0,0006	0,00444	0,00022	0,00006
-0,2571	-0,02496	0,00797	0,02458
0,004	0,00038	-0,04520	0,00406
1,6873	0,16390	-19,34263	-0,20513

PR=A<sup>-1</sup>(ST-1)\*B=

0,004499087	1,00374E-05	4,82214E-07	8,72151E-08
-0,000598562	0,004442351	0,000218886	5,7218E-05
6,06135E-06	5,81434E-07	0,004430979	9,47201E-06
0,003960384	0,000381453	-0,045195201	0,004055587

0	<b>0,0003797</b>
0	<b>0,2490889</b>
0	<b>0,0412348</b>
4353,3333	<b>17,655323</b>

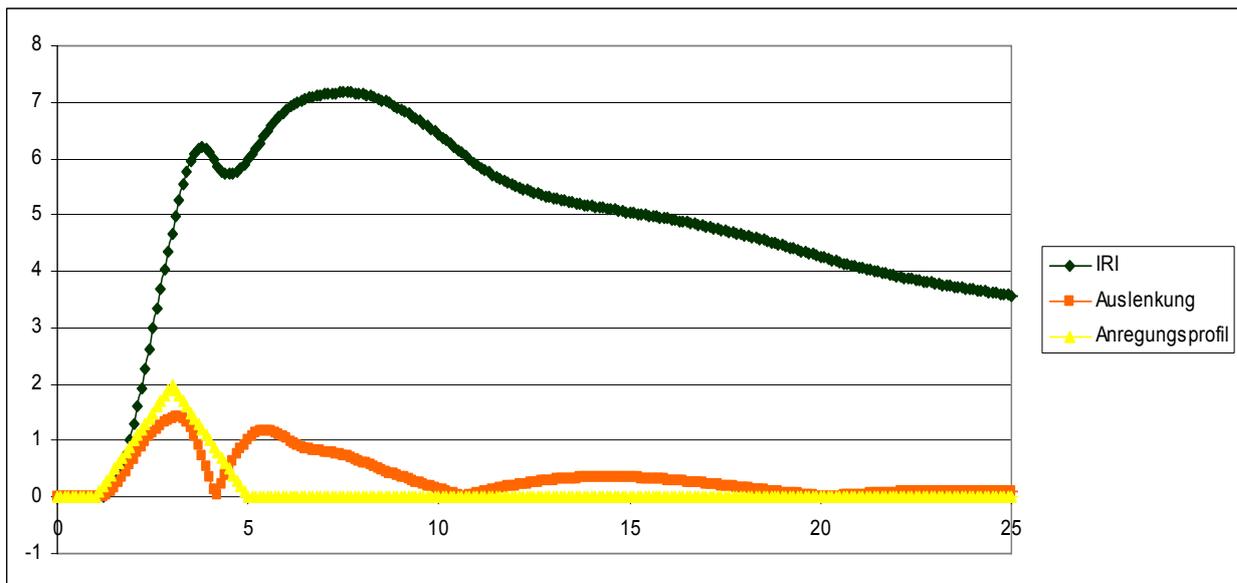
**Eingang ist Profilverlauf**

k= 5

x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Zs	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z's	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z'u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Auslenkung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IRI		0	0	0	0	0	0	0	0	0

der IRI-Wert ergibt sich als Abschnittswert jeweils von 0 bis zum jeweiligen Punkt, IRI(x=100) die Summe über einen 100m Abschnitt

x	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
h	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20
Zs	0	3,79676E-05	0,000326457	0,001244532	0,0032825	0,0069862	0,0129	0,0215513	0,0333614	0,0486795
Z's	0	0,024908891	0,117532263	0,308845694	0,6172989	1,0492874	1,6006	2,2582649	3,0034185	3,8134189
Zu	0	0,004123482	0,019354006	0,05060124	0,1006371	0,1702218	0,2584	0,3627612	0,4800905	0,6065752
Z'u	0	1,765532269	4,858820739	8,80418415	13,134268	17,427822	21,337	24,605479	27,07214	28,670946
Auslenkung	0	0,004085514	0,019027549	0,049356707	0,0973546	0,1632357	0,2455	0,34121	0,4467291	0,5578958
IRI	0	0,003714104	0,019260886	0,055745977	0,1213031	0,22204	0,3616	0,5410247	0,7591506	1,0128247



## **Anhang E: Kurzübersicht über relevante Fachbücher und Artikel**

Die Zusammenstellung der relevanten Literatur zum Thema Längsebenheitserfassung und Bewertung hat das Ziel Information zu bestimmtem Themenbereichen leichter zugänglich zu machen. Daher bietet diese Übersicht zu jedem Text eine Auflistung der jeweiligen Schwerpunkte, soweit es sinnvoll war, auch mit Seitenangaben versehen. Diese Liste ist nochmals getrennt nach Aufnahmegesäten (Messgrößen) und Bewertung der Daten (Indikatoren). Weiters sind die Datenblätter auch mit einer Zusammenfassung der Literatur versehen und nach Autoren in alphabetischer Reihenfolge angehängt.

Autor: **AUGUSTIN H. und PIPPICH J.**

[8]

Titel: **Zerstörungsfreie Bestimmung von Kenngrößen der Straße mit den Geräten des Messfahrzeuges zum Zweck der Kontrolle und Abnahme durch die Baubehörde**

Reihe: **Bundesministerium für Bauten und Technik; Straßenforschung, Heft 174**

herausgegeben: Ort: **Wien**

Jahr: **1981**

besprochene Themen: **Aufnahme und Simulation von Ebenheitskenngrößen**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- Latte (S. 31)
- Planograph (S. 31)
- Analyseur de profil en long u. Bump Integrator (S. 30)
- Winkelmesser (S. 32)

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- PSI (S. 12)
- Periodische Unebenheitsfunktion (S. 21)
- Regellose Unebenheitsfunktionen / spektrale Dichte (S. 23)
- 

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Das Werk ist in vier Abschnitte gegliedert, einerseits beschäftigt es sich mit der Entwicklung und Berechnung des Present Serviceability Index (PSI) als Abbild der Empfindungen von Testfahrern, andererseits wird mathematisch die Schwingungseinwirkung auf den Fahrer ermittelt und über die Funktion der Wahrnehmungsstärke mit der Empfindung des Menschen verknüpft (abhängig von Wellenlänge und Geschwindigkeit). Das Längsprofil geht in Form einer periodischen Unebenheitsfunktion oder als regellose Unebenheitsfunktion (spektrale Dichte) in die Berechnung ein.

Im Weiteren werden verschiedene Ebenheitsmessgeräte vorgestellt. Für diese werden Simulationsalgorithmen zur Ermittlung von Messwerten aus den vorgegebenen Profilen oder speziell erstellten Wellenformationen entwickelt. (S. 29)

Den Abschluss bilden Korrelationsrechnungen zwischen Wahrnehmungsstärke ( $k$ ) und Befahrbarkeit (PSI), sowie Messkurve des Planographen und der Neigungsvarianz.

Autor: **AWASTHI G., SINGH T. and DAS A.**

[1]

Titel: **On Pavement Roughness Indices**

Reihe: **IE-Journal CV, Vol. 84**

herausgegeben: Ort: **Indien**

Jahr: **2003**

besprochene Themen: **Überblick über Aufnahmegeräte und Bewertungskennzahlen**

Aufnahmegeräte (Messgrößen)

- Rod and Level
- TRRL Beam
- Profilografen
- Dipstick
- Inertial Profiler

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- International Roughness Index (IRI)
- Mean Panel Rating (MPR)
- Profil Index (PI) und Ride Number (RN)
- PSD
- statistische Kenngrößen

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Der Artikel beschreibt kurz die oben angeführten Kennwerte und gibt Erläuterungen zu den Aufnahmegeräten. Es ist dadurch schnell möglich, einen Überblick zu erhalten, genauere Informationen auch zu den einzelnen Werten sind aber nicht enthalten.

Text ist in Englisch.

Autor: **BECKER W.**

[27]

Titel: **Die Spektrale Dichte – ein Maß für die Fahrbahnunebenheit im Längsprofil**Reihe: **Straße und Autobahn, Heft 10**herausgegeben: Ort: **Köln**Jahr: **1995**besprochene Themen: **Berechnung und Interpretation der Spektralen Dichte**Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Spektrale Dichte (S. 583)
- Standardabweichung des gleitenden Mittelwertes (S. 590)
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung  
 + Beispiele  
 mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Ziel des Berichts ist die Erläuterung der Bedeutung des Kennwerts Spektrale Dichte, sowie deren Berechnung (Ablauf einer Spektralanalyse und auch spezifisch mit notwendigen Vorbereitungs- und Nachbereitungsrechnungen.)

Im weiteren Verlauf werden Aufnahmegерäte und andere Kennwerte dargestellt (Standardabweichung des gleitenden Mittelwertes).

Zum Schluss wird auf die Möglichkeit verwiesen, in Zukunft die Unebenheit mit Hilfe der fraktalen Dimension zu beschreiben und dadurch Schätzwerte für die Profileigenschaften in anderen Wellenlängenbereichen zu erhalten.

Autor: **BRAUN H. und LAERMANN F.**

[9]

Titel: **Vergleichende Unebenheitsmessungen zwischen TRRL-High-Speed-Profilometer und dem Braunschweiger Profilographen**

Reihe: **Straße und Autobahn, Heft 12**

herausgegeben: Ort: **Köln**

Jahr: **1980**

besprochene Themen: **Vergleich der Messergebnisse der beiden Aufnahmegeräte**

Aufnahmegeräte (Messgrößen)

- High Speed Profilometer
- Braunschweiger Profilograf
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden zu Beginn die Messsysteme beschrieben, einerseits der TRRL High Speed Profilometer, andererseits der Braunschweiger Profilograf. Im Folgenden werden die verwendeten Messstrecken und die Versuchsdurchführung erläutert. Interessant ist vor allem die Datenaufbereitung und Auswertung mittels direktem Vergleich der aufgenommenen Profile, nach Einführung einer Mittelwertsbereinigung sowie die statistische Aufbereitung der Datenmenge.

Die Ergebnisse sind vor allem graphisch sehr anschaulich dargestellt.

Autor: **BÜHLER B., KLINKHAMMER S., GAST H., MAERSCHALK G., KOCH R. und OERTELT S.** [52]

Titel: **Erstellung eines Leitfadens für die Erfassung und Bewertung des Zustands von Straßen**

Reihe: **Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 832**

herausgegeben: Ort: **Bonn – Bad Godesberg**

Jahr: **2002**

besprochene Themen: **Vorarbeit / Schlussbericht zur Erstellung der Arbeitspapiere Nr. 9**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- AUN, w
- SEI
- S03, S10, S30 (S. 31, 127)
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung  
 + Beispiele  
 mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Änderungen zu vorhergehenden Versionen werden explizit dargestellt.

Von Interesse für die Längsebenheit:

Übersicht über die Zustandsmerkmale und Indikatoren der Merkmalgruppe Ebenheit (S. 31)

Verbesserungsvorschläge im Besonderen der Reihe M (Messtechnische Zustandserfassung, S.125), sowie des Abschnitts A 1.1. (Methodik der Zustandsbewertung, S. 163)

Autor: **DAVIS B. R. and THOMPSON A. G.**

[29]

Titel: **Power Spectral Density of Road Profiles**

Reihe: **Vehicle System Dynamics, Vol. 35, No. 6**

herausgegeben: Ort: **London**

Jahr: **2001**

besprochene Themen: **Herleitungen zur Berechnung der Spektralen Dichte**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Spektrale Dichte (PSD)
- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Mathematische Herleitung und Zusammenhänge zur Berechnung der Spektralen Dichte aus Straßenlängsprofilen. Dargestellt sowohl im Zeitbereich, als auch im Wegbereich.

Autor: **GERZ U.** [7]  
Titel: **Fahrbahnunebenheiten – Messverfahren bei Straßen**  
Reihe: **VDI Berichte Nr. 877: Unebenheiten von Schiene und Straße als Schwingungs-  
ursache**  
herausgegeben: Ort: **Düsseldorf**  
Jahr: **1991**  
besprochene Themen: **Verfahren zur Längs- und Querebenheitsmessung**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- Richtlatte, Profilograf
- Winkelmesser
- Bump Integrator
- Bayerisches Unebenheitswirkgerät
- Hochgeschwindigkeitsgeräte

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Zur Überprüfung der Ebenheit von Fahrbahnoberflächen bei Herstellung oder Erhaltungsmaßnahmen kommen verschiedenste Geräte zum Einsatz. Gemeinsam ist den beschriebenen Methoden das Ziel die Geometrie zu erfassen, um damit die Auswirkungen bewerten zu können.

Für die Unebenheiten im Längsprofil werden folgende Messverfahren vorgestellt: Profilograf, Richtlatte, Winkelmesser, Bump Integrator, Bayerisches Unebenheitswirkgerät, sowie auch Hochgeschwindigkeitsgeräte (High-Speed Road Monitor HRM, Laser Road Surface Tester LRST,...).

Autor: **JORDAN P. und SULTEN P.**

[20]

Titel: **Ein Profilometer für die schnelle Bewertung des Zustands von Straßenbefestigungen**

Reihe: **Straße und Autobahn, Heft 2**

herausgegeben: Ort: **Köln**

Jahr: **1984**

besprochene Themen: **Beschreibung des Profilometers**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- TRRL Profilometer
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Der Text beinhaltet die Beschreibung des Systems, beginnend bei der Motivation, über die Komponenten und Messwerkzeuge des Gerätes (später unter dem Namen HRM bekannt), bis hin zur Auswertung. Diese beinhaltet die Betrachtung des Varianz-Spektrums, aber auch Untersuchungen über die Wirkung der Straßenunebenheit auf den Nutzer. Zum Abschluss werden einige Überlegungen bezüglich der Wirtschaftlichkeit von Straßenbegutachtung im Sinne des Erhaltungsmanagement angeführt.

Autor: **KARAMIHAS S., PERERA R., GILLESPIE T. and KOHN S.**

[55]

Titel: **Transverse Variation in International Roughness Index**

Reihe: **80<sup>th</sup> TRB Annual Meeting, Paper No. 01-2851**

herausgegeben: Ort: **Washington**

Jahr: **2001**

besprochene Themen: **Veränderungen des Messwertes bei seitlichen Abweichen von der Messspur**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- IRI
- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Es soll experimentell festgestellt werden, wie sehr sich der IRI ändert, wenn die Messspur sich seitlich verschiebt. Dieser Test wurden auf einer 1-jährigen, 3-jährigen, 6-jährigen und einer älteren Oberfläche durchgeführt.

Das Ergebnis schwankt auch abhängig von der generellen Ebenheitssituation (bei glatter Straße – geringe Schwankungen, bei Straßen mit ausgeprägten Spurrinnen sind auch diese in der Verteilung der Unebenheit über den Querschnitt gut zu erkennen).

Es kann anhand von Beispielmessungen festgestellt werden, dass der IRI-Wert zum rechten Fahrbahnrand hin deutlich ansteigt mit Ausnahme der Strecken mit deutlich ausgeprägten Spurrinnen.

Autor: **KOESSLER P.** [22]

Titel: **Ebenheit und Griffigkeit aus Sicht der Fahrzeugtechnik**

Reihe: **Straße und Autobahn, Heft 9**

herausgegeben: Ort: **Köln**

Jahr: **1968**

besprochene Themen: **Grundlagen zu Ursache und Wirkung von Unebenheiten**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- Braunschweiger Unebenheitsgerät
- Bayerisches U-Messer
- Slopemeter
- Braunschweiger Wirkgerät
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- quadratischer Mittelwert
- spektrale Unebenheitsdichte
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung  
 + Beispiele  
 mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Die grundlegenden Wirkungen, die das Überfahren von Unebenheiten auslöst, werden erläutert. Darunter fallen die Wahrnehmungsgrenzen von Schwingungen, die Schwinganregung auf ein gedämpftes Feder-Masse-System und das daraus ableitbare Vergrößerungsverhältnis.

In weiterer Folge wird die Unebenheit mittels quadratischem Mittelwert, spektraler Unebenheitsdichte und Welligkeit betrachtet.

Die möglichen Aufnahmegерäte (Liste siehe oben) werden kurz beschrieben.

Autor: **KOKOT D. and LEBEN B.**

[18]

Titel: **The New Slovenian Criteria for Pavement Roughness Elevation**

Reihe: **5<sup>th</sup> Symposium on Pavement Surface Characteristics**

herausgegeben: Ort: **Toronto**

Jahr: **2004**

besprochene Themen: **Einsatz und Ergebnisse des slowenischen Messgerätes**

Aufnahmegeräte (Messgrößen)

- ZAG – VP Longitudinal Profilometer
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- International Roughness Index (IRI)
- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Das slowenische Messgerät wird in seinen Bestandteilen erläutert (mobiler Beschleunigungsmesser, der in einen Standard-Pkw montiert wird). Die Messergebnisse auf dem slowenischen Straßennetz werden dargestellt und klassifiziert, sowie mit den Ergebnissen von Lattenmessungen verglichen. Zu beachten sind die unterschiedlichen Abschnittslängen über die der IRI jeweils gebildet wird, dieser Einfluss ist sehr deutlich erkennbar.

Aus diesen Ergebnissen werden Vorschläge für „Penalty - Zahlungen“ bei unzureichender Qualität gebildet.

Autor: **LIEBIG S. und QUARZ V.**

[37]

Titel: **Zur waveletbasierten Synthese stochastischer Fahrwegstörungen für die numerische Simulation der Dynamik von Fahrzeugen**

Reihe: **VDI-Bericht 1846, Humanschwingungen**

herausgegeben: Ort: **Dammstadt**

Jahr: **2004**

besprochene Themen: **Messprinzipien der derzeit gebräuchlichen Hochgeschwindigkeitsgeräte**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Spektrale Dichte
- Betrachtung mittels Wavelets
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

In einem ersten Schritt wird die Beschreibung der Unebenheiten auf Basis der Fouriertransformation erläutert, anschaulich und mathematisch nachvollziehbar. Von diesem ausgehend gelingt der Übergang zur waveletbasierenden Betrachtung. Hierbei werden zuerst Wavelets an sich dargestellt und dann die Analyse der Straßendaten, so können Vor- und Nachteile der beiden Verfahren gut dargestellt werden.

Die eigentliche Anwendung versucht in diesem Fall, aus vorgegebenen Spektralen Dichten mit Hilfe von Fahrzeugmodellen die Anregungssignale zu ermitteln.

Autor: **MITSCHE M., BRAUN H. und LIESNER W.**

[50]

**Titel: Ermittlung zulässiger Amplituden und Wellenlängen periodischer Fahrbahnunebenheiten unter dem Gesichtspunkten Straßen- und Ladegutbeanspruchung, Fahrsicherheit und Schwingempfinden (Lösungsansätze)**

**Reihe: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 466**

herausgegeben: Ort: **Braunschweig**

Jahr: **1986**

**besprochene Themen: Bewertung Einzelhindernisse und regelloser Grundunebenheit mit dem Ziel der Festlegung von Grenzwerten**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Spektrale Dichte
- zulässige Unebenheitsamplituden
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Zu Beginn werden die Grenzwerte für Fahrsicherheit, Straßenbeanspruchung, Schwingbeanspruchung des Menschen und Ladegutbeanspruchung begründet und mathematisch hergeleitet über die Festlegung von zulässigen Unebenheitsamplituden.

Im Weiteren Darstellung charakteristischer Hindernisse und deren Wirkung auf das Fahrzeug.

Prinzip der Aufspaltung der Anregung in regellose Unebenheiten und hervorstechende Hindernisse.

Mathematische Beschreibung Schwingantwort mittel Ersatzmodells (geteilt nach Grundunebenheit und Einzelhindernissen).

Autor: **PERERA R. and KOHN S.**

[17]

Titel: **Issues in Pavement Smoothness**

Reihe: **National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Web Document 42, Project 20-51**

herausgegeben: Ort: **Michigan**

Jahr: **2002**

besprochene Themen: **Langzeitstudie über verschiedene Kennwerte mit verschiedenen Aufnahmegeräten**

Aufnahmegeräte (Messgrößen)

- Response Type Road Roughness Measurement Systems
- High Speed Inertial Systems
- Profilografen
- Lightweight Profilografen
- Manuelle Messgeräte
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- International Roughness Index (IRI)
- Ride Number (RN)
- Profile Index (PI)
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Es werden die Durchführung und die Ergebnisse einer Langzeitstudie über die Ebenheit von Straßen erläutert. Wobei der Schwerpunkt bei der Messung und den verschiedenen Geräten liegt, im Speziellen die Wiederholbarkeit, um im Weiteren auch richtige Indexberechnungen durchführen zu können.

Interessant ist der Bericht vor allem auf Grund der Erläuterungen zu den oben aufgezählten Messgerätegruppen, hier finden sich auch Hinweise, wodurch die Ergebnisse beeinflusst und verfälscht werden können.

Auch werden Auswirkungen der Ebenheit auf Benzinverbrauch und Fahrzeugabnutzung betrachtet.

Andere Oberflächenschäden wie Makrotextur, Risse, Aufwölbungen, Spalten werden auch angesprochen.

Autor: **SAYERS M.W., GILLESPIE T. D. and QUEIROZ C. A. V.** [3]

Titel: **The International Road Roughness Experiment  
Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements**

Reihe: **World Bank Technical Paper Number 45**

herausgegeben: Ort: **Washington**

Jahr: **1986**

besprochene Themen: **Festlegung des International Roughness Index**

Aufnahmegeräte (Messgrößen)

- bump integrator, BPR roughmeter (S. 109)
- APL Trailer (S. 115)
- geometrisches Einmessen (S.118)
- TRRL Beam (S.119)

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Reference Average Rectified Slope (RARS) (S. 249)
- CAPL 25 (S.318)
- Power Spectral Density (PSD) (S. 405)
- 

sonstige Themen: Korrelationsrechnungen, Source Code für IRI

Tiefe der Erläuterungen:

allgemeine Beschreibung

+ Beispiele

mathematisch nachvollziehbar **nur der Kennwert IRI**

Zusammenfassung:

Ergebnisse des Projekts in Brasilia im Jahr 1982, das zum Ziel hatte, einen Internationalen Roughness Index zu definieren.

- Welche Eigenschaften muss dieser Wert aufweisen (messbar mit verschiedensten Systemen, konstant über die Zeit, wiederholbar, aussagekräftig im Bezug auf Komfort sowie einfach und dienlich)
- Festlegung auf ARS 80 (average rectified slope bei  $v=80$ )
- Messgeräte, die zur Aufnahme des Kennwertes dienen, Beschreibung der Geräte und Einteilung in 4 Kategorien (je nachdem, wie genau der Wert ermittelt werden kann – Messpunktabstand)
- Aufstellung Schwingungsgleichung und Lösungsansätze für Ermittlung der vertikalen Bewegung des Systems (für RARS / IRI-Berechnung)
- allgemeine Beschreibung von anderen Kennwerten wie CAPL 25, PSD (Power Spectral Density)

Autor: **SAYERS M., GILLESPIE T. D. and PATERSON W. D. O.** [46]

Titel: **Guidelines for Conducting and Calibration Road Roughness Measurements**

Reihe: **World Bank Technical Paper Number 46**

herausgegeben: Ort: **Washington**

Jahr: **1986**

besprochene Themen: **Hinweise zur Messung des IRI mit verschiedenen Messinstrumenten; vor allem auch Verwendung der Geräte**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- Rod and Level (S.23)
- Versch. Profilometer (S.26)
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- IRI (S.31)
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen: Klasseneinteilung der Profilometer

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Hier sind die für die Umsetzung notwendigen Informationen zusammengetragen, es findet sich eine Übersicht, in welchen Wertebereichen sich die IRI Berechnung bewegt, sowie Anforderungen an die Messgeräte bezüglich Genauigkeit, Wiederholbarkeit, Kalibrierung,...

Im Weiteren werden die einzelnen Geräte vorgestellt, die zur Aufnahme des Kennwertes verwendet wurden (Rod-Level, versch. Profilometer)

Auflistung der Rechenschritte für die Berechnung des IRI auf der Grundlage des  $ARS_{80}$  (average rectified slope bei  $v=80\text{km/h}$ ) als Summe der Federbewegungen dividiert durch die überfahrene Strecke. (incl. Beispielprogramm und Darstellung der Reaktion auf dreieckigen Testimpuls)

IRI-Analyse filtert jegliche Information außerhalb der Wellenlänge 1,3-30m. Kalibrierungsvorgang für Profilometer; Merkmale und Einteilung der Messgeräte in die 4 Klassen (je nachdem wie direkt IRI berechnet werden kann), bis hin zur Bewertung durch Versuchspersonen, wo auch versucht wird, eine Beschreibung durch den IRI zu ermöglichen.

Autor: **SAYERS M. and KARAMIHAS S.** [47]  
Titel: **Interpretation of Road Roughness Profile Data**  
Reihe: **Federal Highway Administration**  
herausgegeben: Ort: **USA**  
Jahr: **1996**  
besprochene Themen: **Mess- und Bewertungsverfahren in den USA**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- International Roughness Index (S. 5,118)
- Ride Number (S. 10, 118)
- Spektral Analyse (S. 23)
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung  
 + Beispiele  
 mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Beschreibung der Kennwerte (International Roughness Index, Half-Car Roughness Index, Ride Number, Spektral Analyse) und deren Bestandteile (Moving Average Filter, Butterworth Filter)

Unterschiede der Gerätetypen in der Längsebenheitsaufnahme, sowie häufige Fehlerquellen (Oberflächenstruktur,...) (S. 41)

Weiters findet sich eine kurze Erläuterung des Programms „RoadRuf“ (S. 53).

Im Anhang finden sich ein Projekt zur Überprüfung von Korrelations- und Übertragbarkeitsmatrizen anhand von Datenvergleichen (S. 85), sowie die Berechnungsschritte zur Ermittlung des IRI, der RN, Butterworth Filters und Quarter Car Filters (Achtung Fehler in 1. und 3. Zeile der Matrix A – vgl. SAYERS - World Bank Technical Paper No. 46).

Autor: **SAYERS M. and KARAMIHAS S.** [4]  
Titel: **The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles**  
Reihe: **University of Michigan**  
herausgegeben: Ort: **Michigan**  
Jahr: **1998**  
besprochene Themen: **Grundbegriffe zum Thema Längsebenheit**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- Nivellement (S. 3)
- Dipstick(S. 4)
- Profilometer (S. 6)
- Response Type Systems (S. 39)
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Gleitender Mittelwert (S. 18)
- Power Spectral Density (S. 26)
- IRI (S. 45)
- Ride Number (S. 55)
- PSI (S. 66)
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung  
 + Beispiele  
 mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Erläuterung der Grundbegriffe zu den Themen:

- Aufnahmegerate (Nivellement, Dipstick, Profilometer,...) und der mögliche Fehler
- Auswertung der Messdaten (Filtern mit gleitendem Mittelwert, Zerlegung mittels PSD (Power Spectral Density), IRI, Ride Number , subjektive Befragungen,... )
- Anregung des Fahrzeugs zu vertikalen Schwingungen durch die Unebenheiten in Abhängigkeit von der Federung (S. 32)

Besondere Aufmerksamkeit kommt dem IRI und der RN zu, hierbei werden Entstehung und Wirkung genauer betrachtet.

- Kalibrierung und Fehleranalyse (Einfluss von Geschwindigkeit und Oberflächenstruktur)

Autor: **SCHNIERING A.**

[19]

Titel: **Berührungslose Ebenheitsmessung mit schnellfahrenden Geräten**

Reihe: **Fahrzeug und Fahrbahn, Beitrag zur FGSV Tagung**

herausgegeben: Ort: **Weimar**

Jahr: **2004**

besprochene Themen: **Messprinzipien der derzeit gebräuchlichen Hochgeschwindigkeitsgeräte**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- Distanz und Beschleunigungsmessung
- Mehrfachabtastung
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Die heute gebräuchlichen Verfahren zur Profilbestimmung werden näher erläutert, beginnend mit dem Prinzip der Punktriangulation. Im Weiteren die Umsetzung auf das Bestimmen der Höhen einerseits mittels Distanz und Beschleunigungsmessung und andererseits über das geometrische Prinzip der Mehrfachabtastung. Auch für die Querebenheit werden verschiedenen Messmethoden angegeben.

Autor: **SHIRAKAWA T., KAWAMURA A. and NAKATSUJI T.** [41]

Titel: **Application of the Second Generation Wavelet Transform for Pavement Preventive Maintenance**

Reihe: **Journal of the Eastern Asia Society of Transport Studies, Vol. 6**

herausgegeben: Ort: **Tokyo**

Jahr: **2005**

besprochene Themen: **Wavelet Analyse mit anpassungsfähigen freien Parametern**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Ausgehend von der Wavelet Analyse mit vorgegebenen Wavelets werden Erweiterungen durch freie Parameter vorgenommen, um eine Anpassung an die jeweilige Situation zu ermöglichen (im besondern Fall die Anpassung an die Darstellung und Identifizierung von spezifischen Schadstellen an Straßenoberflächen).

Für die genauen Berechnungen der notwendigen Schritte wird auf die jeweils anzuwendende Literatur verwiesen.

Eine genauere Darstellung wird jedoch der Anpassung der freien Parameter zuteil und deren mögliche Anwendung zur Auffindung von definierten Schadstellen.

Autor: **STEINAUER B. und UECKERMANN A.**

[32]

Titel: **Ein vereinfachtes Verfahren zur Auswertung der Längsebenheit von Straßen**

Reihe: **Straße und Autobahn, Heft 4**

herausgegeben: Ort: **Köln**

Jahr: **1999**

besprochene Themen: **Beschreibung der Längsunebenheit mit Spektraler Dichte  
berechnet in konventioneller oder vereinfachter Form**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Spektrale Unebenheitsdichte
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Zu Beginn steht eine sehr anschauliche Erklärung der Bedeutung der Ermittlung der Spektralen Unebenheitsdichte eines Profils.

Es folgt eine schrittweise Erläuterung der Berechnung nach der konventionellen Methode.

In gleicher Weise wird auch die neue Methode vorgestellt.

Zur besseren Vergleichbarkeit werden generierte Profile mit beiden Methoden bewertet.

Autor: **STEINAUER B., KEMPKENS E. und UECKERMANN A.** [51]

Titel: **Zustandserfassung und –bewertung der Bundesfernstraßen – Verbessertes Verfahren zur Beurteilung der Längsebenheit**

Reihe: **Straße und Autobahn, Heft 1**

herausgegeben: Ort: **Köln**

Jahr: **2003**

besprochene Themen: **Einleitung und Kurzfassung zu Thema LWI**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- AUN (-Grenzwerte)
- LWI
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Basis für den Text war ein Vortrag auf dem Deutschen Straßen- und Verkehrskongress 2002 in München.

Er erläutert die Beweggründe für die Entwicklung des LWI, sowie dessen Berechnungsschema und Wirkweisen. Es wird das Verhalten dieses Berechnungsansatzes im Vergleich zum AUN anhand von Beispielprofilen, mit besonderer Berücksichtigung von periodischen Unebenheiten und Einzelhindernissen, dargestellt

Weiters werden Statistiken angeführt, die den Unterschied in der Klassifizierung der Straße, einerseits bei Basis AUN andererseits LWI, aufzeigen.

Autor: **STEINAUER B.**

[44]

Titel: **Haromonisierung zwischen Befahrbarkeitszustand und Ausbaustandard von Straßen**Reihe: **Informationen – Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 38**herausgegeben: Ort: **München - Neubiberg**Jahr: **1994**Besprochene Themen: **Bewertung von Straßen unter Einbeziehung von Längsunebenheit, Fahrbahngriffigkeit und Spurrinnen**Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Komfortberechnung
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Das Kapitel über Längsunebenheit bietet eine gute Kurzfassung der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeit (Stochastische und periodische Unebenheiten auf Fahrbahnen). Dadurch ist es möglich, die Zusammenhänge sehr gut darzustellen, ausgehend von einer allgemeinen Einleitung über Ebenheitsbetrachtung (Spektrale Unebenheitsdichte), über eine gut erläuterte Darstellung der Komfortberechnung bis hin zur Berücksichtigung von periodischen Anregungen und in weiterer Folge dann die Ermittlung der Wohlbefindensgeschwindigkeit.

In weiteren Kapiteln werden noch der Einfluss der Fahrbahngriffigkeit (im Besonderen auf nasser Fahrbahn; Aquaplaning) und der Spurrinnen (bewirkt Wanken) auf die Befahrbarkeit behandelt.

Zusammenfassen lassen sich diese Erkenntnisse in Gebrauchswerten, wobei hierfür auch Bewertungshintergründe angeführt sind.

Autor: **STEINAUER B.** [45]  
Titel: **Stochastische und periodische Unebenheiten auf Fahrbahnen**  
Reihe: **Informationen – Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 32**  
herausgegeben: Ort: **München - Neubiberg**  
Jahr: **1991**

Themenbereiche: **Bewertung von Unebenheit (Grenzwerte für Spektrale Kenngrößen)**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Spektrales Unebenheitsmaß; Welligkeit
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung  
 + Beispiele  
 mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Der erste Teil beschäftigt sich damit, wie Längsprofile mathematisch zusammengefasst und dargestellt werden können (mit den mathematischen Ansätzen für spektrale Unebenheitsdichte und im weiteren auch das Unebenheitsspektrum).

Dann schließt ein Teil über Komfortziffern an; wie werden die Belastungen durch den Menschen empfunden?, aufgeteilt in Körper, Hand, Fuß, Nick- und Wankbeschleunigungen, die zu Anregung führen. Im Besonderen werden Schwingungersatzsysteme und daraus folgende Schwingungsgleichungen für Hub-, Nick- und Wankbeschleunigungen aufgestellt. (S. 27)

Auflistung der relevanten Fahrzeugkennwerte und Vergrößerungsfunktionen (S. 37).

Aus vorgegebenen Gesamtkomfortziffern werden zulässige Unebenheitswerte zurückgerechnet. (S. 84)

Vorschläge für Abnahme-, Warn- und Schwellenwerte (S. 98)

Äquivalente Spektrale Unebenheit zur besonderen Berücksichtigung von periodischen Anregungen (Verknüpfung stochastische und periodische Unebenheiten über Komfortberechnung).

Autor: **SULTEN P.** [6]

Titel: **Erfassen und Beurteilen von Längsebenheit von Straßen**

Reihe: **Straße und Autobahn, Heft 2**

herausgegeben: Ort: **Köln**

Jahr: **1992**

besprochene Themen: **verwendete Messgeräte, sowie Auswertung der Messdaten mit spektraler Dichte**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- Latte und Keil
- Planograph
- High-Speed-Road Monitor (HRM)
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Spektrale Dichte
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Dieser Artikel beschreibt die Längsebenheitsaufnahme in Deutschland, er erläutert kurz die Wirkung von Unebenheiten und geht dann über zu der Messung. Einerseits auf neu hergestellten Strecken (als Abnahmeprüfung), andererseits mit schnellfahrenden Geräten zur kontinuierlichen Überprüfung des Netzes. Weiters werden noch statistische Auswerteverfahren mit deren Grenzwerten und ein Bericht über Anwendung von großflächigen Messungen in Deutschland angeführt.

Autor: **SUN L.** [26]

Titel: **On Human Perception and Evaluation to Road Surfaces**

Reihe: **Journal of Sound and Vibration**

herausgegeben: Ort: **USA**

Jahr: **2001**

besprochene Themen: **Ebenheitsanalyse auf Basis PSI und PSD**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- CHOLE Profilometer
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Power Spectral Density (PSD)
- Present Serviceability Index (PSI)
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Der Present Serviceability Index (PSI) wird näher betrachtet, da er einer der wenigen Kennwerte ist, die die menschliche Empfindung direkt (über Testpersonen) in die Bewertung einfließen lassen. Ausgehend von diesem wird ein Bezug zur Spektralen Unebenheitsdichte hergestellt.

Dies erfolgt über die Darstellung der Messung des Ebenheitsprofils mittels des Messgerätes CHOLE Profilometer. Der Aufnahme folgt die statistische Auswertung der Daten sowie die Herstellung des Zusammenhangs zum PSD.

In einem weiteren Kapitel werden Grenzwertvorschläge zur Klassifizierung von Straßen auf Grund von PSI Werten angeführt.

Autor: **UECKERMANN A.**

[30]

Titel: **Das bewertete Längsprofil**

Reihe: **Straße und Autobahn, Heft 1 (2005) oder FGSV Tagung März 2004**

herausgegeben: Ort: **Köln**

Jahr: **2004 / 2005**

besprochene Themen:

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- bewertete Längsprofil
- 
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Ziel war die Entwicklung eines Kennwertes, der Allgemeinunebenheiten, Periodizitäten und Einzelhindernisse berücksichtigen kann.

Voran steht eine Auflistung der am häufigsten verwendeten Kennwerte (gute Graphik).

Der Wert baut auf den Grenzwerten des AUN auf, die zu maximal akzeptierten Höhen der Längsebenheit (abhängig von der Wellenlänge) rückgerechnet werden.

Im Weiteren werden die Rechenschritte für das bewertete Längsprofil und die Herleitung der verwendeten Formeln dargestellt. Das Ergebnis der Berechnung sind die Standardabweichung  $\sigma_{\text{bew}}$  und die Spannweite  $\Delta_{\text{bew}}$ .

Autor: **UECKERMANN A.**

[33]

Titel: **Der Längsebenheitswirkindex LWI**Reihe: **Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 839**herausgegeben: Ort: **Bonn – Bad Godesberg**Jahr: **2002**Themenbereiche: **Erweiterte Bewertung der Längsebenheit nach ihrer Auswirkung**Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- LWI
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Weiterentwicklung des AUN, um auch die adäquate Bewertung von Einzelhindernissen und periodischen Unebenheiten zu ermöglichen.

Ziel war das Zusammenspiel der Beurteilung nach Geometrie und Wirkung der vorhandenen Längsunebenheit.

Berechnung:

Längsprofil wird durch drei Filter bewertet (Mensch, Radlast, Ladegut) (S. 11).

Zur Veranschaulichung der Wirkweise der Berechnung sind einige Beispielprofile und die Reaktion des Kennwerts angeführt (S. 12).

Ableiten von Grenzwerten aus AUN und Vergleich mit ZTV-ZEB Bewertung (S. 14).

An fiktiven Straßen werden die starken Abweichungen vom AUN bei guter Oberfläche und ausgeprägten einzelnen oder periodischen Unebenheiten gezeigt (S. 17).

Vergleichsrechnungen an realen Straßenabschnitten.

Autor: **UECKERMANN A.**

[34]

Titel: **Ein geometrisch basiertes Verfahren zur Lokalisierung und Bewertung einzelner, periodischer und regelloser Unebenheiten im Straßenlängsprofil**

Reihe: **ISAC – Institut für Straßenwesen, RWTH Aachen, Heft 44**

herausgegeben: Ort: **Aachen**

Jahr: **2004**

besprochene Themen: **Möglichkeiten der Längsebenheitsbewertung (Methoden die in Deutschland entwickelt wurden)**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Spektrale Leistungsdichte
- Abweichungen vom gleitenden Mittelwert
- Längsebenheitswirkindex
- bewertete Längsprofil
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Ausgehend von den schon in Verwendung befindlichen Kennwerten in Deutschland, Spektrale Leistungsdichte, Abweichung vom gleitenden Mittelwert und dem Längsebenheitswirkindex, welche zum besseren Verständnis nochmals kurz dargestellt werden, wird schrittweise erklärt, wie es zur Bildung des bewerteten Längsprofils kommt.

Nach der Entwicklung des Kennwertes folgt die Anwendung, Bildung von Grenzwerten und Beispielrechnungen an fiktiven Profilen. Diese dienen vor allem dazu die Wirkweise dieses Kennwertes zu verdeutlichen.

Autor: **WEI L., FWA T. and ZHE Z.** [40]

Titel: **Wavelet Analysis and Interpretation of Road Roughness**

Reihe: **Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No.2**

herausgegeben: Ort: **USA**

Jahr: **2005**

besprochene Themen: **Grundsätzliches zur Anwendung von Wavelet Transformationen**

Aufnahmegерäte (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Wavelet Analyse
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Die Wavelet Analyse wird als neue Methode der Betrachtung von Straßenunebenheiten eingeführt. Daher erscheint es sinnvoll, grundlegende Festlegungen und Entwicklungen dieser Methode anzuführen. So erfolgt eine Darstellung der mathematischen Vorgänge und der ausgewählten „Mother Wavelets.“

Mit diesem Grundwissen wird nun an Hand von Beispielstrecken mit gleichem Internationalem Roughness Index (IRI) gezeigt, wie sich diese Profile bei der Betrachtung mittels Wavelet Analyse doch unterscheiden.

Diese Analysemethode macht es auch möglich, lokale Schadstellen aufzufinden, wie auch anhand von Beispielprofilen und dem Vergleich mit IRI Berechnungen dargestellt wird.

Autor: **WEI L., FWA T. and ZHE Z.** [38]

Titel: **Pavement Roughness Analysis Using Wavelet Theory**

Reihe: **6th International Conference on Managing Pavement 2004**

herausgegeben: Ort: **Queensland**

Jahr: **2004**

besprochene Themen: **Vorteile aus der Anwendung von Wavelet Transformationen**

Aufnahmegerate (Messgrößen)

- 
- 
- 
- 
- 

Bewertung der Daten (Indikatoren)

- Wavelet Analyse
- 
- 
- 
- 

sonstige Themen:

Tiefe der Erläuterungen:

- allgemeine Beschreibung
- + Beispiele
- mathematisch nachvollziehbar

Zusammenfassung:

Durch die Anwendung von Wavelet Analysen ist es möglich, sowohl im Frequenz- als auch im Wegbereich zu arbeiten und dadurch können Fehlstellen lokalisiert werden.

Die Funktionsweise einer Wavelet Analyse wird kurz erklärt (ähnlich wie Fourier Transformation, jedoch wird das Profil aus so genannten „Mother Wavelets“ überlagert).

Besondere Anwendung findet sie zur Identifizierung von Rissen, Schlaglöchern, Senkungen, Hebungen und ähnlichem.

Im Anhang findet sich die graphische Aufarbeitung einiger Beispielprofile.