

DIN EN 13036-5

ICS 17.040.20; 93.080.10

Einsprüche bis 2017-08-16

Entwurf

**Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen –
 Prüfverfahren –
 Teil 5: Bestimmung der Längsunebenheitindizes;
 Deutsche und Englische Fassung prEN 13036-5:2017**

Road and airfield surface characteristics –
 Test methods –

Part 5: Determination of longitudinal unevenness indices;
 German and English version prEN 13036-5:2017

Caractéristiques de surface des routes et aéroports –
 Méthodes d'essais –

Partie 5: Détermination des indices longitudinaux;
 Version allemande et anglaise prEN 13036-5:2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-06-16 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
 Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs
 besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-
 Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de,
 sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nabau@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann
 im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-
 Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6,
 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
 Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 105 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 13036-5:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 227 „Straßenbaustoffe“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-10-08 AA „Oberflächeneigenschaften“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen — Prüfverfahren — Teil 5: Bestimmung der Längsunebenheitindizes

Caractéristiques de surface des routes et aéroports — Méthodes d'essais — Partie 5 : Détermination des indices longitudinaux

Road and airfield surface characteristics — Test methods — Part 5: Determination of longitudinal unevenness indices

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm

Dokument-Untertyp:

Dokument-Stage: CEN-Umfrage

Dokument-Sprache: D

STD Version 2.8l

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole und Abkürzungen	9
5 Berechnung der Ebenheitsindizes	10
6 Internationaler Rauigkeitsindex (IRI)	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Darstellung der erhaltenen Ergebnisse	12
7 Wellenbandanalyse	13
7.1 Allgemeines	13
7.2 Wellenbandindizes	14
8 Analyse des Bewerteten Längsprofils (WLP)	14
8.1 Allgemeines	14
8.2 Voraussetzungen	14
9 Berichterstattung	14
Anhang A (normativ) Berechnung des IRI	16
A.1 Die IRI-Berechnung	16
A.2 Gleitender-Mittelwert-Filter	16
A.3 Die Viertelfahrzeugmodell-Parameter, die IRI definieren	16
A.4 Lösung der Differentialgleichung	17
Anhang B (informativ) Beispielcode für die IRI-Berechnung	20
Anhang C (informativ) Wellenbandanalyse mit Bi-Oktavbändern und RMS	21
C.1 Allgemeines	21
C.2 Wiederabtastung und Filterung	21
C.3 3-Band-Filterung des Profils	21
C.3.1 Das Kurzwellenband Psw	21
C.3.2 Das Mittelwellenband Pmw	22
C.3.3 Das Langwellenband Plw	22
C.3.4 Berechnung der Indizes und der Auswertungslänge	22
C.4 Festlegungen für Filterparameter	22
C.4.1 Oktavfilter (nach ANSI S1-11-2004-07-27 und ISO 8608)	22
C.4.2 Bi-Oktavband	23
C.5 Filterkoeffizienten	24
C.6 Antwortkurven der Wellenbandfilter	26
C.7 Quadratischer Mittelwert (RMS) der aufbereiteten Profilhöhen je Wellenband	27
C.8 C++-Code für die Berechnung der wellenbandgefilterten Energieprofile	27
Anhang D (informativ) Wellenbandanalyse mit Hilfe der LPV über ausgewählte Wellenlängen	41
D.1 Übersicht zur Berechnung der Varianz des Längsprofils (LPV)	41
D.2 Aufbereitung	41

D.3	Filterung	41
D.4	Berechnung der Filterkoeffizienten.....	41
D.5	Berechnung der Filterbreite	42
D.6	Berechnung der Hochpasskoeffizienten.....	42
D.7	Anwendung der Koeffizienten für die Filterung der Profildaten	43
D.8	Erweiterte Varianz.....	43
Anhang E (informativ) Berechnung des WLP.....		44
E.1	Die WLP-Berechnung	44
E.1.1	Aufbereitung	44
E.1.2	Fouriertransformation.....	44
E.1.3	Begrenzung des Wellenlängenbereiches.....	44
E.1.4	Bewertete Fouriertransformation	45
E.1.5	Oktavbandfilterung	45
E.1.6	Inverse Fouriertransformation.....	46
E.1.7	Berechnung des WLP	46
E.1.8	Charakterisierung der WLP	47
E.1.9	Beispielcode für die WLP-Berechnung.....	47
Anhang F (informativ) Überprüfung der Indikatorimplementierung.....		50
Literaturhinweise.....		51

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 13036-5:2017) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 227 „Straßenbaustoffe“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Einleitung

Die Ebenheit des Straßenprofils beeinträchtigt infolge der dynamischen Wechselwirkung von Straße/Fahrzeug und Fahrzeugschwingungen die Sicherheit (Reifenkontaktkräfte), den Fahrkomfort, den Energieverbrauch und Fahrzeugverschleiß sowie die Fahrbahn- und Straßenhaltbarkeit. Die Ebenheit des Straßenprofils ist demzufolge eine entscheidende Information für Managementsysteme der Straßeninstandhaltung und Leistungskontrolle.

Der Zweck des vorliegenden Dokuments besteht darin, ein Standardverfahren für die Berechnung und Berichterstattung von Schätzwerten der Straßenebenheit von digitalisierten Längsprofilen zu liefern.

Diese Vorgehensweise umfasst die mathematische Verarbeitung von Längsprofilmessungen, um Ebenheitsstatistiken (Indizes) für den Wellenlängenbereich von 0,5 m bis 50 m zu erstellen. Diese Wellenlängen decken die meisten Fahrzeugsituationen ab¹⁾. Die Vorgehensweise beschreibt das Berechnungsverfahren für den Internationalen Rauigkeitsindex (IRI), die Wellenbandanalyse (quadratischer Mittelwert (RMS) und Varianz des Längsprofils (LPV)) und das Bewertete Längsprofil (WLP).

Der Zweck dieser Vorgehensweise besteht darin, sicherzustellen, dass bei Anwendung eines der möglichen Verfahren die genau gleichen Schritte ausgeführt werden, mit dem Ziel, den Vergleich von Ebenheitsmessungen zu erleichtern, die mit unterschiedlichen Oberflächenprofilmessgeräten in europäischen Ländern durchgeführt wurden. Die Verfahren für Wellenbandanalysen sind informativ und daher wird der IRI als Benchmarkingparameter bevorzugt.

ANMERKUNG Als Kontrolle für die Implementierung der Berechnung der Ebenheitsindizes stehen drei Längsprofile, einschließlich der „wahren Werte“, zur Verfügung. Sie können unter www.erpug.org dem Dateiverzeichnis *reference profiles* entnommen werden. Mehr Informationen dazu können Anhang F entnommen werden.

1) Bei höherer Geschwindigkeit, z. B. auf Landebahnen von Flughäfen oder Autobahnen, können auch längere Wellenlängen von Bedeutung sein.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm legt die mathematische Verarbeitung von digitalisierten Längsprofilmessungen fest, um Ebenheitsindizes zu erstellen. Das Dokument beschreibt das Berechnungsverfahren für den Internationalen Rauigkeitsindex (IRI, en: International Roughness Index), quadratischer Mittelwert (RMS, en: Root Mean Square) und Varianz des Längsprofils (LPV, en: Longitudinal Profile Variance) von drei separaten Wellenbändern und σ WLP und Δ WLP des Bewerteten Längsprofils (WLP, en: Weighted Longitudinal Profile).

Der Zweck des vorliegenden Dokuments besteht darin, ein Standardverfahren für die Berechnung und Berichterstattung von Schätzwerten der Straßenebenheit von digitalisierten Längsprofilen zu liefern. Weitere Ziele dieser Norm bestehen darin, den Vergleich der Ergebnisse von Ebenheitsmessungen, die mit verschiedenen Profilometern in europäischen Ländern durchgeführt wurden, zu ermöglichen.

Der in dieser Norm abgedeckte Ebenheitsbereich umfasst den festgelegten Wellenlängenbereich von 0,5 m bis 50 m. Es sollte beachtet werden, dass kürzere und längere Wellenlängen den Fahrkomfort beeinflussen können, jedoch in dieser Norm nicht abgedeckt sind.

Die nach dieser Norm abgeleiteten quantifizierten Ebenheitsindizes sind eine nützliche Unterstützung für Fahrbahnmanagementsysteme. Das Ergebnis kann auch für die Typprüfung und Leistungskontrolle von neuen und alten Fahrbahnbelägen genutzt werden. Die Indizes können auf starre, flexible und Schotterstraßenoberflächen angewendet werden.

Die Norm legt nicht fest, von welcher Stelle auf der Straße das Längsprofil erhalten werden sollte.

Die abgeleiteten Indizes sind in dem Sinne übertragbar, dass sie von Längsprofilen erhalten werden können, die mit verschiedenen Messgeräten gemessen wurden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 13036-6, *Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen — Prüfverfahren — Teil 6: Bestimmung der Quer- und Längsprofile in den Wellenlängenbereichen der Ebenheit und der Megatextur*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Längsebenheit

Abweichung des Längsprofils von einer geraden Bezugslinie in einem festgelegten Wellenlängenbereich von z. B. 0,5 m bis 50 m

3.2 Straßenlängsprofil

eines der erhaltenen Profile, wenn sich das Profilometer in der gleichen Richtung fortbewegt wie der übliche Straßenverkehr

Anmerkung 1 zum Begriff: Gewöhnlich wird eines der in den Fahrspuren gemessenen Profile verwendet.

3.3

Messweg oder -position

zu verwendender ausgewählter Schnittpunkt von allen möglichen Profilen in Querrichtung

3.4

aufbereitetes Profil (wiederabgetastetes und gefiltertes Profil)

wird durch Anwendung von Wiederabtastung und Filterverfahren erhalten

3.5

Profil

Profil der Oberfläche, das durch zwei Koordinaten beschrieben wird: eine in der Oberflächenebene in Richtung der Lauflinie des Profilometers, als Abstand bezeichnet (die Abszisse) und die andere in Richtung senkrecht zur Oberflächenebene, als vertikale Verschiebung bezeichnet (die Ordinate)

3.6

Profilometer

Gerät zur Messung und Erfassung von Profilen, das die Ebenheit von z. B. Straßen und Flugplätzen erfasst

3.7

Profilmesslänge

Länge einer ununterbrochenen Profilmessung; sie gibt die Länge an, über deren Verlauf das Profilometer das Profil durchgehend und genau digitalisiert und aufzeichnet (in Bild 1, von Punkt B nach C)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die meisten Profilometer benötigen eine Mindeststrecke, die sie vor und nach dem eigentlich zu messenden Profil abfahren müssen; diese Anfangs- (in Bild 1, von Punkt A nach B) und Endphase (in Bild 1, von Punkt C nach D) sollten in der Profilmesslänge nicht enthalten sein.

3.8

Rohprofil

von einem Profilometer beim Vermessen eines Straßenlängsprofils ermitteltes Profil

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Kennwerte des Rohprofils hängen von dem verwendeten Profilometer ab.

3.9

Wiederabtastung

auf das ursprünglich gemessene Profil angewendetes Verfahren zur Erzeugung eines neuen Profils mit einem alternativen Abtastabstand

3.10

Ortsfrequenz

Reziprokwert einer Wellenlänge in Perioden je Meter; die Ortsfrequenz N definiert die Anzahl an Wellen der Wellenlänge λ je Meter:

$$N = \frac{1}{\lambda} (3 - A)$$

3.11

räumliches Abtastintervall

absoluter Wert der Differenz der Abszisse zwischen zwei benachbarten Punkten der digitalisierten Längsprofilinie

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Definition setzt voraus, dass der mit dem Profilometer gemessene Abstand, der sich gewöhnlich auf die krummlinige Abszisse bezieht, im mathematischen Sinn zur Abszisse nahe genug ist.

3.12

Wellenlänge

Abstand zwischen zwei identischen benachbarten Punkten in einer Welle

Anmerkung 1 zum Begriff: Sie wird üblicherweise zwischen zwei leicht zu identifizierenden Punkten gemessen, z. B. zwei benachbarten Wellenbergen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Obwohl Wellenlängen für viele Wellenarten berechnet werden können, werden sie am genauesten bei sinusförmigen Wellen gemessen, die eine glatte und sich wiederholende Schwingung haben. Die Wellenlänge einer sinusförmigen Welle ist der räumliche Abstand der Welle, der Abstand über dessen Verlauf sich die Wellenform wiederholt. In den meisten Fällen kann das Profil adäquat als eine Summe von Sinusfunktionen beschrieben werden, in diesem Fall gilt für diese Sinusfunktion:

$$A \times \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)(x - x_0) \quad (3-B)$$

Dabei ist

λ die Wellenlänge der Schwingung, in Meter (m);

A die Amplitude der Schwingung, in Meter (m);

x die Abszisse des aktuellen Punkts, in Meter (m);

x_0 die Phase der Schwingung, in Meter (m).

3.13

Fahrspuren

Bereich einer Fahrbahnoberfläche, in dem sich die Mehrheit der Überfahrten der Fahrzeugräder konzentriert

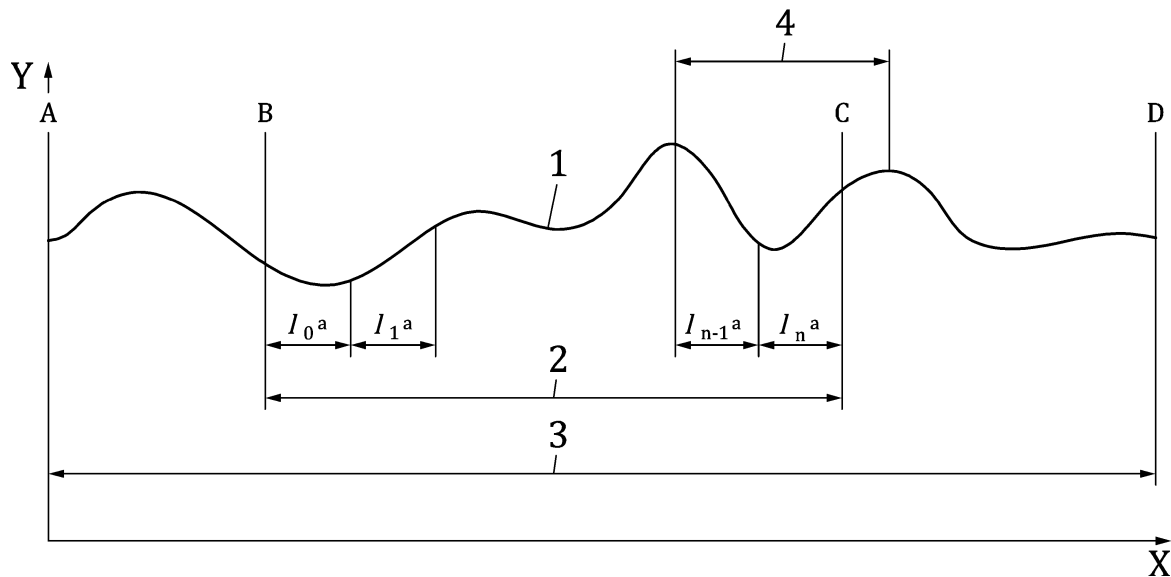
3.14

Bewertungs- oder Auswertungslänge

über die Straßenoberfläche durchgeführte Messungen, die häufig mit Hilfe kürzerer Abschnitte oder Abtastlängen (Bild 1, Legende 4, l_0 bis l_n) analysiert werden, um eine präzisere Beschreibung des gemessenen Profils zu ermöglichen

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Bewertungs- oder Auswertungslänge ist die Länge einer derartigen Abtastung.

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei aufeinanderfolgenden Abtastungen über die Profilmesslänge, wie in Bild 1, l_0 und l_1 , wird das Wort „Abschnitt“ verwendet.



Legende

- | | | | |
|-------|---|---|------------------------|
| 1 | Straßenoberfläche | X | Strecke |
| 2 | B bis C, Messlänge des Profils | Y | vertikale Verschiebung |
| 3 | A bis D, vom Profilometer zurückgelegte Gesamtstrecke | | |
| 4 | Wellenlänge des Profils | | |
| l_0 | Bewertungs- oder Auswertungslänge | | |

Bild 1 — Definitionen von Profillängen

4 Symbole und Abkürzungen

- B** ist die Basis, die für die IRI-Berechnung, in Meter (m), eingesetzt wird. Sie ist die Länge, über die die IRI-Berechnung vorgenommen wird (oder Erfassungslänge nach der Terminologie des vorliegenden Dokuments)
- L** bezeichnet die Messlänge, in Meter (m)
- N** ist die Ortsfrequenz, in Zyklen je Meter (m):

$$N = \frac{1}{\lambda};$$
N wird gewöhnlich als Wellenzahl bezeichnet
- x_i ist die Abszisse am Abtastpunkt i , in Meter (m)
- z_i ist die Höhe des Profils, bestimmt am Abtastpunkt i , in Meter (m) oder Millimeter (mm)
- δ_x ist das Raumabtastintervall für die Digitalisierung des Profils, in Meter (m) oder Millimeter (mm)
- λ ist die Wellenlänge, in Meter (m)
- Δ Abtastintervall
- IRI** ist der Internationale Rauigkeitsindex (en: International Roughness Index)
- WB** ist der Wellenbandindex, berechnet mit Hilfe der RMS-Analyse (quadratischer Mittelwert),

angewandt auf die aufbereiteten Profilhöhen für das Wellenband W, in Meter (m)

SW ist der quadratische Mittelwert des Kurzwellenbands (en: short wavelength band)

MW ist der quadratische Mittelwert des Mittelwellenbands (en: medium wavelength band)

LW ist der quadratische Mittelwert des Langwellenbands (en: long wavelength band)

w ist die Welligkeit des Bezugsspektrums, verwendet für das WLP

WLP ist das Bewertete Längsprofil (en: Weighted Longitudinal Profile)

σ WLP ist die Standardabweichung des WLP

Δ WLP ist die Variationsbreite des WLP

5 Berechnung der Ebenheitsindizes

Ein Profil kann von einer beliebigen Seitenlage in der Fahrspur beginnend erhalten werden. Diese Norm legt nicht fest, welches dieser Profile verwendet werden sollte, sondern nur, wie eines der vier festgelegten Ebenheitsindizes zu berechnen ist.

Die Berechnung der Ebenheitsindizes umfasst die folgenden Schritte:

- die Messung des Profils, einschließlich Identifikation der Start- und Endpunkte der Profilmesslänge und mögliche Ereignisse (z. B. Kreisverkehre, Bodenschwellen, Ecksteine usw.)
- für Benchmarkingzwecke wird empfohlen, das Profil mit einem Schritt von 0,100 m abzutasten. Das Wiederabtastverfahren ist besonders zu berücksichtigen, um fehlerhafte Energie im Signal zu vermeiden;
- die Berechnung eines oder mehrerer Index/Indizes;
- die Erstellung eines Berichts.

Im Falle der Wellenbandanalyse ist die Aufbereitung, einschließlich Wiederabtastung und Filterung, unerlässlich und wird empfohlen, um die Profile zu homogenisieren und Vergleiche zu erleichtern. Für Benchmarkingzwecke ist eine Wiederabtastung nach der Wiederabtastfunktion in Matlab®²⁾ erforderlich. Für andere Anwendungen könnte ein lineares Modell verwendet werden. Je nach Anwendungszweck gibt es vier mögliche Gruppen von Ebenheitsindizes, die zur Auswahl stehen. Die erste ist die Berechnung des Internationalen Rauigkeitsindex IRI, beschrieben in Anhang A (normativ), der bei internationalen Vergleichen und Benchmarktests verwendet werden sollte, die zweite ist die Berechnung der Ebenheitsenergie in drei verschiedenen Wellenbändern mit Hilfe der Bi-Oktavzerlegung (RMS), beschrieben in Anhang C (informativ). Die dritte ist ein alternatives Verfahren zur Berechnung der Ebenheitsenergie in drei Wellenbandbändern mit Hilfe der Profilvarianz (LPV), siehe Anhang D (informativ). Das letzte der vier Verfahren ist die Berechnung der Variationsbreite und Standardabweichung der Ebenheit mit Hilfe des Bewerteten Längsprofils (WLP), beschrieben in Anhang E (informativ). In Anhang B ist ein Beispielcode für die Berechnung des IRI angegeben. Das allgemeine Verfahren zur Berechnung der Ebenheitsindizes ist in Bild 2 dargestellt.

2) Ein geeignetes handelsübliches Produkt ist beispielsweise Matlab®. Diese Angabe dient nur zur Unterrichtung der Anwender dieser Europäischen Norm und bedeutet keine Anerkennung des genannten Produkts durch CEN.

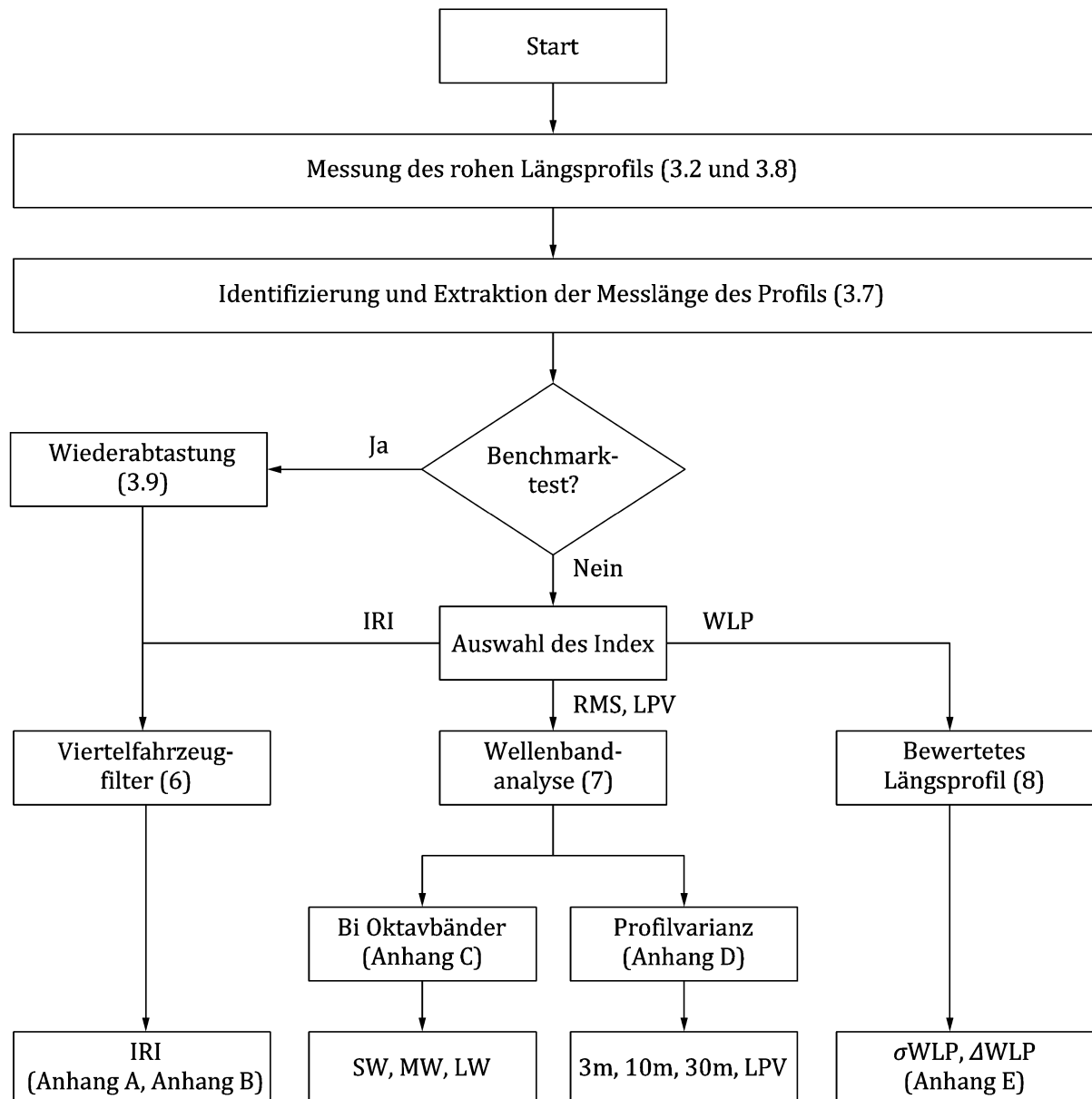


Bild 2 — Übersicht zum Berechnungsverfahren der Indizes (Verweisungen auf Abschnitte in Klammern)

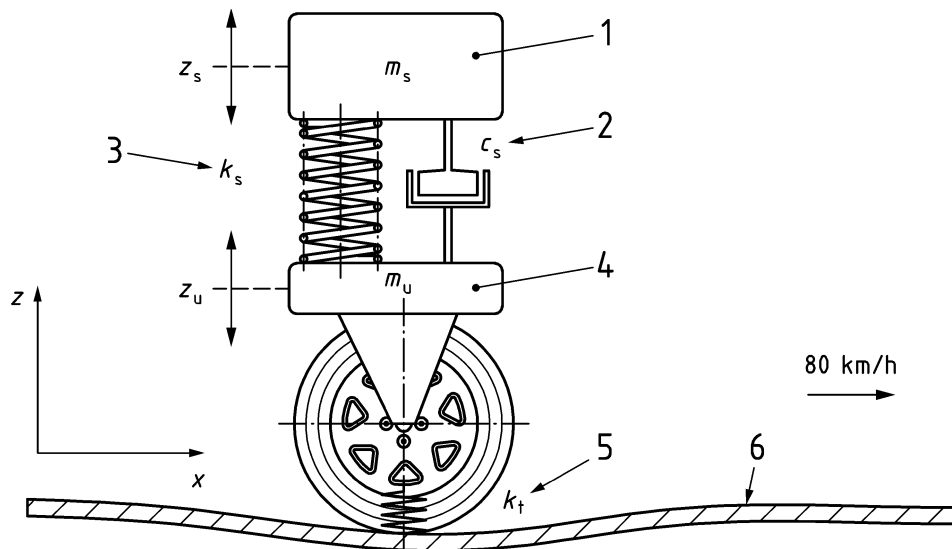
6 Internationaler Rauigkeitsindex (IRI)

6.1 Allgemeines

Der IRI ist ein Index, der aus einer Messung des Straßenlängsprofils mit Hilfe eines virtuellen Ansprechsystems (Viertelfahrzeugsimulation), das mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h fährt, berechnet wird (siehe Bild 3). Die auf das digitalisierte Straßenprofil angewendete Viertelfahrzeugsimulation berechnet die kumulierten Stoßbewegungen dividiert durch die zurückgelegte Strecke. Die Beschreibung der IRI-Berechnung basiert auf [4]:

- Der IRI wird aus einem einzelnen Straßenlängsprofil berechnet. Für genaue Berechnungen sollte das Abtastintervall nicht größer als 125 mm sein. Die erforderliche vertikale Sensorauflösung hängt von dem Ebenheitsniveau ab, wobei eine feinere Auflösung bei glatten Straßen erforderlich ist. Eine vertikale Sensorauflösung von 0,5 mm ist für alle Bedingungen geeignet;

- es wird vorausgesetzt, dass das Profil hat eine konstante Steigung zwischen den abgetasteten Höhenpunkten;
- das Profil wird mit einem gleitenden Mittelwert der Basislänge 250 mm geglättet;
- das geglättete Profil wird mit einer Viertelfahrzeugsimulation gefiltert, mit spezifischen Parameterwerten, bei einer simulierten Geschwindigkeit von 80 km/h;
- die simulierte Aufhängungsbewegung wird linear kumuliert und durch die Länge des Profils dividiert, um den IRI zu ergeben. Somit hat der IRI Einheiten der Steigung, z. B. Millimeter je Meter oder Meter je Kilometer.



Legende

- | | | | |
|---|---|---|----------------------------------|
| 1 | gedfederte Masse m_s | 4 | ungefederte Masse m_u |
| 2 | Dämpfungskonstante der Aufhängung c_s | 5 | Federkonstante des Reifens k_t |
| 3 | Federkonstante der Aufhängung k_s | 6 | Längsprofil $Z(x)$ |

Bild 3 — Viertelfahrzeug (virtuelles Ansprechsystem)

Weitere Einzelheiten zu dem Verfahren der IRI-Berechnung und zu dem Abtastcode sind in Anhang A und Anhang B angegeben.

6.2 Darstellung der erhaltenen Ergebnisse

Der IRI kann mit einer anderen Auswertungslänge L berechnet werden. Für eine detailliertere Analyse der Straßenprofilaten darf die Auswertungslänge L nach Ermessen verändert werden. Daher sollte sie als der erste Subindex angegeben werden, z. B. IRI_{20} für $L = 20$ m. Für das europäische Benchmarking wird eine Auswertungslänge von 100 m empfohlen; sie sollte mit IRI_{100} bezeichnet werden.

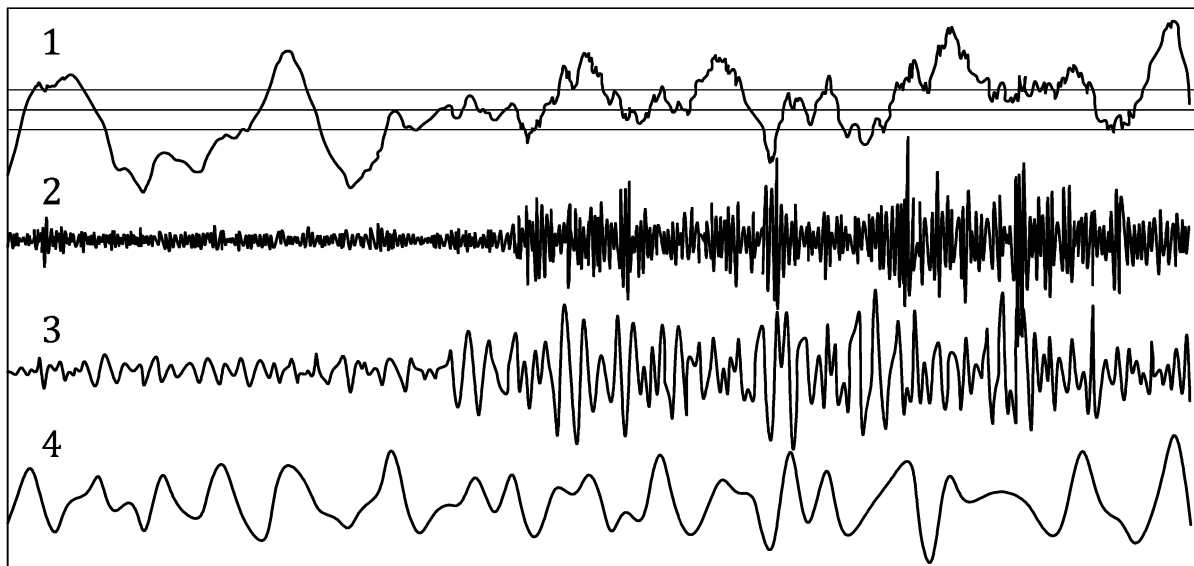
Veränderungen der in Bild 3 dargestellten IRI-Parameter oder der Simulationsgeschwindigkeit liegen außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Norm. Wenn das Viertelfahrzeugmodell jedoch aus irgendeinem Grund mit anderen als den genannten Parametern berechnet wird, sollte es nicht als IRI bezeichnet werden.

7 Wellenbandanalyse

7.1 Allgemeines

Um die Wellenbandanalyse durchzuführen, wird das aufbereitete Profil mit Hilfe von Filtern (siehe Bild 4) in verschiedene wellenbandbegrenzte Profile aufgeteilt. Die Wellenbänder werden im Allgemeinen gewählt, um verschiedene Merkmale der Fahrqualität darzustellen. Beispielsweise kann die Anwendung eines Kurzwellenfilters einen Index ergeben, der das Vorhandensein von kleinen Wellenbewegungen auf der Straßenoberfläche berücksichtigt, die bei geringeren Geschwindigkeiten von größerer Bedeutung sein können. Im Gegensatz dazu kann die Anwendung eines Langwellenfilters einen Index ergeben, der das Vorhandensein von großen Wellenbewegungen berücksichtigt, die höchstwahrscheinlich die Fahrqualität bei hohen Geschwindigkeiten beeinträchtigen würden.

Die Definition der benutzten Wellenbänder und die Kennwerte der Filter, die benutzt werden, um vom ursprünglichen Längsprofil bandbegrenzte Signale zu erhalten, müssen angegeben werden. Außerdem muss festgelegt werden, wie die Indizes aus den bandbegrenzten Signalen abgeleitet werden.



Legende

- 1 aufbereitetes Profil
- 2 kurzwellengefiltertes Profil
- 3 mittelwellengefiltertes Profil
- 4 langwellengefiltertes Profil

Bild 4 — Aufteilung der Wellenbänder

Die Filter, die auf das Längsprofil angewendet werden, sind im Allgemeinen entweder:

- Bandpassfilter, bei denen Wellenlängen außerhalb eines festgelegten Bereiches abgeschwächt werden; oder
- Hochpassfilter, bei denen Wellenlängen größer als eine festgelegte Wellenlänge abgeschwächt werden.

Die für die Aufteilung des ursprünglichen Längsprofils in die zuvor festgelegten Bänder verwendeten Filter sollten sorgsam ausgewählt werden, damit möglichst wenige Verzerrungen in die gefilterten Signale eingebracht werden; eine diesbezüglich übliche Verfahrensweise ist die Anwendung einer digitalen bidirektionalen Filterung (en: digital forward and reverse filtering) zusammen mit einer Messstrecke über das zu bewertende Profil hinaus.

7.2 Wellenbandindizes

Um die verschiedenen wellenbandgefilterten Profile zu charakterisieren, werden zwei Verfahren, einschließlich Indizes, festgelegt:

- quadratischer Mittelwert (RMS) über Bi-Oktavbänder (siehe Anhang C);
- Varianz des Längsprofils (LPV) über ausgewählte Wellenlängen (siehe Anhang D).

8 Analyse des Bewerteten Längsprofils (WLP)

8.1 Allgemeines

Das Bewertete Längsprofil (WLP) ist das Straßenlängsprofil, das nach einer Gewichtungsfunktion in der Frequenzdomäne bewertet wurde. Die Gewichtungsfunktion verstärkt kleine Wellenlängen und schwächt große Wellenlängen so ab, dass ihre entsprechenden Energieinhalte später mit der gleichen Skala in der Raumdomäne messbar sind. Nach der Gewichtung des Spektrums wird das WLP nach folgenden Schritten berechnet:

- Filterung des bewerteten Signals in Oktavbändern;
- Multiplizieren der oktavbandgefilterten Signale mit Umrechnungsfaktoren (die deren entsprechende Leistungsverteilungen im Verhältnis zum gesamten Leistungsinhalt berücksichtigen); und
- Zusammenaddieren der Signale, um das WLP zu ergeben.

Das WLP ist durch die Standardabweichung σ_{WLP} und die Variationsbreite ΔWLP charakterisiert.

8.2 Voraussetzungen

Die WLP-Berechnung basiert auf dem aufbereiteten Profil. Die Aufbereitung umfasst:

- Detrendierung des Rohprofils mit Hilfe einer linearen Regression, um Offset und Trend des Signals zu entfernen;
- Wiederabtastung durch Anwendung eines konstanten Intervalls von 0,1 m mit Hilfe eines linearen Interpolationsalgorithmus;
- Vorfilterung durch Anwendung eines Hochpassfilters, um Wellenlängen größer als 100 m abzuschwächen. Der Filter muss die Amplitude der Wellenlängen größer als 150 m um mindestens 50 % abschwächen. Der Filter sollte die Phase der Profilmerkmale mit Wellenlängen kürzer als 100 m nicht verzerren.

9 Berichterstattung

Der berechnete Ebenheitsindex sollte für eine vereinbarte Auswertungslänge angegeben werden. Bei internationalem Benchmarking sollte diese 100 m betragen. Sie sollte als ein Subindex angegeben werden, wie in Bild 1 beschrieben und für den IRI in 6.2 erläutert. Es wird empfohlen, die folgenden verwaltungstechnischen Daten beizufügen:

- geographische Lage und Informationen über das gemessene Objekt;
- die seitliche Lage des Längsprofils, z. B. rechte oder linke Radspur. Für Benchmarkzwecke sollte das die rechte oder äußerste Radspur sein;

- Messstrecke;
- Datum und Zeit;
- abweichende Bedingungen, die das Ergebnis beeinträchtigen könnten.

Weitere vorgeschriebene Angaben können EN 13036-6 entnommen werden und sollten in dem Bericht angegeben werden. Letztlich sollte jede Abweichung von dieser Norm prEN 13036-5 dokumentiert und in dem Prüfbericht angegeben werden.

Anhang A (normativ)

Berechnung des IRI

A.1 Die IRI-Berechnung

Die IRI-Berechnung umfasst zwei verschiedene Filter: einen Gleitender-Mittelwert-Filter und ein Viertelfahrzeugmodell.

A.2 Gleitender-Mittelwert-Filter

Der Gleitender-Mittelwert-Filter wurde aus zwei Gründen einbezogen: um das Umhüllungsverhalten von Luftreifen auf Motorfahrzeuge zu simulieren und um die Empfindlichkeit des IRI-Algorithmus gegenüber dem Abtastintervall Δ zu verringern. Für ein Profil, das mit Δ abgetastet wurde, ist ein Glättungsfilter (Gleitender-Mittelwert-Filter) definiert durch die Summation in Gleichung (A.1):

$$h_{ps}(i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{i+k-1} h_p(j) \quad (A.1)$$

$$k = \max \left[1, \text{nint} \left(\frac{L_B}{\Delta} \right) \right]$$

Dabei ist

- h_p die Profilhöhe;
- h_{ps} die geglättete Profilhöhe;
- $\max$ das Maximum zweier Argumente;
- nint die nächste ganze Zahl; und
- L_B die Basislänge des gleitenden Mittelwerts, 250 mm.

A.3 Die Viertelfahrzeugmodell-Parameter, die IRI definieren

Der IRI wird mit Hilfe des Viertelfahrzeugmodells berechnet. Es umfasst die wesentlichen dynamischen Effekte, die bestimmen, wie die Unebenheit Schwingungen in einem Straßenfahrzeug verursacht. Die Massen, Federn und Dämpfer werden durch die folgenden Parameter definiert:

- c_s die Dämpfungskonstante der Aufhängung
- k_s die Federkonstante der Aufhängung
- k_t die Federkonstante des Reifens
- m_s die gefederte Masse (der Teil der Fahrzeugmasse, der von einem Rad getragen wird)
- m_u die ungefederte Masse (Masse des Rads, Reifens und der Hälfte der Achse/Aufhängung)

Um die Gleichungen zu vereinfachen, werden die Parameter auf die gefederte Masse m_s normalisiert. Die folgenden Werte für die normalisierten Parameter definieren den eingestellten IRI:

$$\begin{aligned} c &= c_s/m_s = 6,0 & k_1 &= k_t/m_s = 653 \\ k_2 &= k_s/m_s = 63,3 & \mu &= m_u/m_s = 0,15 \end{aligned} \tag{A.2}$$

Das Viertelfahrzeugmodell wird durch vier gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung beschrieben, die in Matrixform nach Gleichung (A.3) umgeschrieben werden können.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}h_{ps} \tag{A.3}$$

Dabei sind die Arrays $\mathbf{x}$, $\mathbf{A}$ und $\mathbf{B}$ wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [z_s \quad \dot{z}_s \quad z_u \quad \dot{z}_u]^T \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1 + k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_1}{\mu} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \tag{A.4}$$

Dabei ist

h_{ps} die geglättete Profilhöhe;

z_s die Höhe (vertikale Lage) der gefederten Masse;

z_u die Höhe (vertikale Lage) der ungefederten Masse; und

$\mathbf{x}$ das Array der Zustandsvariablen (d. h. die Variable, die den Zustand des simulierten Systems vollständig beschreibt).

Zeitableitungen werden mit einem Punkt gekennzeichnet (z. B. $\dot{z}_s$). Die Zeit wird aus dem Längsabstand und der simulierten Geschwindigkeit V , die mit 80 km/h definiert ist, berechnet.

Der IRI ist eine Kumulierung der simulierten Bewegung zwischen der gefederten und der ungefederten Masse im Viertelfahrzeugmodell, normalisiert auf die Länge L des Profils:

$$\text{IRI} = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt \tag{A.5}$$

A.4 Lösung der Differentialgleichung

Um Differentialgleichungen, wie z. B. Gleichung (A.3), zu lösen, sollten die Anfangswerte der Zustandsvariablen zur Startzeit bekannt sein. Bei der normalen IRI-Simulation beeinflussen die Anfangswerte die Viertelfahrzeugantwort für etwa 20 m. Zur Abschätzung der Anfangswerte sollten z_s und z_u eingestellt werden, um der Höhe des ersten Profilpunkts angepasst zu werden, und $\dot{z}_s$ und $\dot{z}_u$ sollten eingestellt werden, um der mittleren Änderung der Profilhöhe je Sekunde angepasst zu werden, bei der Simulations-

geschwindigkeit über die ersten 11 m des Profils. Die Initialisierung der Simulation sollte bei den Profildaten starten, die mindestens 20 m vor dem Beginn des zu bewertenden Abschnitts erfasst wurden. Die IRI-Kumulierung (Gleichung (A.5)) muss am Beginn der Prüfstelle starten.

Die Viertelfahrzeugdynamiken und das Initialisierungsverfahren zusammen kennzeichnen eine Berechnungsart, die den Oberbegriff „Anfangswertproblem“ oder „Integration von gewöhnlichen Differentialgleichungen“ hat und für die mehrere Lösungsverfahren zur Verfügung stehen. Die Genauigkeit dieser Verfahren kann variieren, weshalb diese Norm ein Verfahren beschreibt, auf das in Sayers (1995) als der „empfohlene Algorithmus“ verwiesen wird. Der Algorithmus wird in den folgenden Absätzen beschrieben. Am Ende von diesem Anhang B ist eine Maschinsprache angegeben, die für numerische Rechenprogramme wie Matlab® oder GNU Octave geeignet ist. Die ursprüngliche Maschinsprache FORTRAN kann dem in Bezug genommenen Artikel entnommen werden.

Für verschiedene lineare Gleichungen, wie z. B. Gleichung (A.1), ist die Gesamtantwort am Punkt i die Summe der freien Antwort (keine Eingabe) des Systems auf seinen Zustand an einem vorherigen Punkt $i-1$ plus der erzwungenen Antwort auf eine Eingabe über das Intervall zwischen den Punkten $i-1$ und i . Für den Fall, dass die Eingabe eine Konstante ist, ist die geschlossene Lösung bekannt:

$$\mathbf{x}_i = e^{\mathbf{A}\Delta/V} \mathbf{x}_{i-1} + \mathbf{A}^{-1}(e^{\mathbf{A}\Delta/V} - \mathbf{I})\mathbf{B}u \quad (\text{A.6})$$

Dabei ist

- e die Basis des natürlichen Logarithmus;
- $\mathbf{I}$ die 4×4 Einheitsmatrix; und
- u die Eingabe, die über das Intervall $i-1$ bis i konstant ist.

Das Exponential der Matrix kann als eine Taylorreihenerweiterung angegeben werden:

$$e^{\mathbf{A}\Delta/V} = \mathbf{I} + \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{A}^i (\Delta/V)^i}{i!} \quad (\text{A.7})$$

Dabei ist N eine Zahl, die groß genug ist, dass die Elemente der Zustandsübergangsmatrix innerhalb der Präzision des Rechners korrekt sind (üblicherweise ist N etwa 10). Gleichung (A.6) ist in dem Maß genau, dass die Eingabe u tatsächlich über das Intervall von Punkt $i-1$ bis i konstant ist. Die Steigung zwischen zwei Punkten des Profils ist konstant. Das bedeutet, dass zur Erzielung der besten Genauigkeit die als konstant angenommene Eingabe u in Gleichung (A.6) die Profilsteigung sein sollte. Folglich ist Gleichung (A.6) die Lösung für die Differentialgleichung:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}s_{ps} \quad (\text{A.8})$$

Dabei ist s_{ps} die geglättete Profilsteigung. Der Austausch von h_{ps} mit s_{ps} impliziert allerdings, dass das Array $\mathbf{x}$ neu bestimmt wird als:

$$\mathbf{x} = [s_s \quad \dot{s}_s \quad s_u \quad \dot{s}_u]^T \quad (\text{A.9})$$

Dabei sind s_s und s_u gefilterte Steigungsvariablen, verbunden mit der gefederten und ungefederten Masse.

Die IRI-Definition nach Gleichung (A.5) kann nun umgeschrieben werden in:

$$\text{IRI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |s_{s,i} - s_{u,i}| \quad (\text{A.10})$$

Dabei ist n die Anzahl der Profilabtastungen.

Die geglättete Profilsteigung, basierend auf einem Intervall von 250 mm, wird wie folgt berechnet:

$$s_{ps,i} = \frac{h_{p,i+k} - h_{p,i}}{k\Delta} \quad (\text{A.11})$$

wobei k in Gleichung (A.1) definiert wurde.

Die IRI-Definition nach Gleichung (A.10) kann wie folgt in Matrixform umgeschrieben werden:

$$\text{IRI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathbf{C}\mathbf{x}| \quad (\text{A.12})$$

Dabei ist

$$\mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad -1 \quad 0] \quad (\text{A.13})$$

Zur Initialisierung des Algorithmus werden die Elemente des $\mathbf{x}$ -Arrays für $i = 1$ definiert:

$$\mathbf{x}_1 = [(h_{p,L_0/\Delta} - h_{p,1})/L_0 \quad 0 \quad (h_{p,L_0/\Delta} - h_{p,1})/L_0 \quad 0] \quad (\text{A.14})$$

Dabei ist

$$L_0 = 11 \text{ m.}$$

Anhang B (informativ)

Beispielcode für die IRI-Berechnung

Der nachfolgend angegebene Matlab®-Code berechnet den IRI. Die Ausgabe irivec wird die gleiche Länge und den gleichen Abtastabstand wie das Eingabe-Profil haben, irivec kann später zu einer längeren Auswertungslänge gemittelt werden. Der Code wurde mit dem FORTRAN-Code aus dem Weltbankbericht [2] verifiziert und ergibt das gleiche Ergebnis für das numerische Rauschen.

```
function irivec = iri(prof, dx)
%IRI Calculate the IRI from a height input profile.
%   irivec = iri(prof, dx)
%   'prof' is given in millimetres and 'dx' in meters.

% Set parameters.
base    = 0.25;
xinit   = 11;

% Physical Constants Of Quarter Car.
K1      = 653.0;      % kt/ms
K2      = 63.3;      % ks/ms
U       = 0.15;      % mu/ms
C       = 6.0;       % cs/ms
V       = 80/3.6;    % speed

% The wheel-road contact moving average distance.
ibase   = max(round(base/dx), 1);

% Initialize simulation variables.
ilead   = min(round(xinit/dx) + 1, length(prof));
X       = [(prof(ilead) - prof(1))/(dx*ilead); 0; (prof(ilead) - prof(1))/(dx*ilead); 0];

% The slope profile.
sprof   = (prof((ibase + 1):(length(prof))) - prof(1:(length(prof) - ibase)))/(dx*ibase);

% State Space Matrix 'A'.
A       = [ -0,      1,      0,      0;
            -K2,    -C,      K2,      C;
            -0,     -0,      0,      1;
            +K2/U, C/U, -(K2 + K1)/U, -C/U];

% State Space Matrix 'B'.
B       = [0; 0; 0; K1/U];

% Calculate the State Transition matrix 'ST' and the Partial Response vector 'PR'.
ST      = expm(A*dx/V);
PR      = inv(A)*(ST - eye(4))*B;

% Initialize the IRI vector.
irivec  = zeros(length(sprof), 1);

% Calculate the IRI.
for i = 1:length(sprof)
    % Calculate the new state vector.
    XN   = ST*X + PR*sprof(i);
    X    = XN;
    irivec(i) = abs(X(3) - X(1));
end
```

Anhang C (informativ)

Wellenbandanalyse mit Bi-Oktavbändern und RMS

C.1 Allgemeines

Dieser Prozess kann auf jede Auswertungslänge oder vorzugsweise auf die gesamte Profilmesslänge angewendet werden, um filterinduzierte Randeffekte zu begrenzen. Das C++-Programm, entwickelt, um die Filterung des Profils durchzuführen, ist später in diesem Anhang dargestellt.

Alle Filterbeschreibungen richten sich nach den üblichen Regeln der Signalverarbeitung [11], [12], wobei eine Filterantwort durch ihre normierte Übertragungsfunktion charakterisiert ist, definiert wie folgt:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + b(3)z^{-2} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{a(1) + a(2)z^{-1} + a(3)z^{-2} + \dots + a(n+1)z^{-n}} \quad \text{mit } a(1) = 1 \quad (\text{C.1})$$

Die folgenden Schritte werden auf das Rohprofil (P) angewendet:

C.2 Wiederabtastung und Filterung

Das Profil (P) wird mit Hilfe einer linearen Regression detrendiert, um Offset und Trend des Signals zu entfernen, wobei ein detrendiertes Profil (Pd) erzeugt wird. Das Profil (Pd) wird wiederabgetastet und vorgefiltert durch Anwendung eines Wiederabtastintervalls von 0,05 m mit Hilfe eines linearen Interpolationsalgorithmus, um Prs zu erhalten. Durch Anwendung eines allgemeinen IIR-Hochpassfilters (mit unendlicher Impulsantwort, en: Infinite-Impulse-Response), begrenzt auf $\lambda = 100$ m (Butterworth, 6. Ordnung), auf das Profil Prs, wird ein hochpassgefiltertes Profil Php erhalten, einschließlich der Anwendung einer bidirektionalen Filterung, um Phasenprobleme zu verhindern. Der Hochpassfilter sollte auf das gemessene Längsprofil angewendet werden, um Wellenlängen größer als 100 m abzuschwächen. Der Filter muss die Amplitude der Wellenlängen größer als 150 m um mindestens 50 % abschwächen. Der Filter sollte die Phase von Profilmerkmalen mit Wellenlängen kürzer als 100 m nicht verzerren.

C.3 3-Band-Filterung des Profils

C.3.1 Das Kurzwellenband Psw

Das Kurzwellenband Psw ist festgelegt als $0,707 \text{ m} < \lambda < 2,828 \text{ m}$ und wird durch folgende Schritte erhalten:

- Zuerst wird ein Psw1 erhalten, durch Anwendung eines IIR-Tiefpassfilters, begrenzt auf $\lambda = 0,707$ m (Butterworth, 8. Ordnung), auf das Profil³⁾.
- Anschließend, um Psw2 zu erhalten, wird ein IIR-Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 2,828$ m (Butterworth, 8. Ordnung), auf das Profil angewendet²⁾.

Das Kurzwellenband Psw ist definiert als die Differenz zwischen Psw1 und Psw2.

3) Um Phasenprobleme zu verhindern, sollte eine bidirektionale Filterung angewendet werden.

C.3.2 Das Mittelwellenband Pmw

Das Mittelwellenband Pmw ist festgelegt als $2,828 \text{ m} < \lambda < 11,312 \text{ m}$ und wird durch folgende Schritte erhalten:

- Zuerst wird ein Pmw1 erhalten, durch Anwendung eines IIR-Tiefpassfilters, begrenzt auf $\lambda = 2,828 \text{ m}$ (Butterworth, 7. Ordnung), auf das Profil²⁾.
- Anschließend, um Pmw2 zu erhalten, wird ein IIR-Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 11,312 \text{ m}$ (Butterworth, 7. Ordnung), auf das Profil angewendet²⁾.

Das Mittelwellenband Pmw ist definiert als die Differenz zwischen Pmw1 und Pmw2.

C.3.3 Das Langwellenband Plw

Das Langwellenband Plw ist festgelegt als die Langwellen $11,312 \text{ m} < \lambda < 45,248 \text{ m}$.

- Zuerst wird ein Plw1 erhalten, durch Anwendung eines IIR-Tiefpassfilters, begrenzt auf $\lambda = 11,312 \text{ m}$ (Butterworth, 6. Ordnung), auf das Profil²⁾.
- Anschließend, um Plw2 zu erhalten, wird ein IIR-Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 45,248 \text{ m}$ (Butterworth, 6. Ordnung), auf das Profil angewendet²⁾.

Das Langwellenband Plw ist definiert als die Differenz zwischen Plw1 und Plw2.

C.3.4 Berechnung der Indizes und der Auswertungslänge

Zuletzt sollte die Energie der gefilterten Profile berechnet und wie nachfolgend definiert dargestellt werden:

- je 20 m für Psw;
- je 100 m für Pmw;
- je 200 m für Plw;

C.4 Festlegungen für Filterparameter

C.4.1 Oktavfilter (nach ANSI S1-11-2004-07-27 und ISO 8608)

Oktavfilter sind relativ konstante Bandfilter, wie folgt definiert:

$$\frac{f_h}{f_l} = 2 \quad (\text{C.2})$$

Dabei ist

f_h die Hochpass-Ortsgrenzfrequenz bei -3 dB , in Perioden je Meter;

f_l die Tiefpass-Ortsgrenzfrequenz bei -3 dB , in Perioden je Meter.

Die mittlere Ortsfrequenz eines derartigen Filters ist definiert als $f_c = \sqrt{f_l f_h}$.

C.4.2 Bi-Oktavband

Die für die Bestimmung der bandbegrenzten Ebenheitsindizes verwendeten Bi-Oktavbänder legen zwei aufeinanderfolgende Oktaven zusammen. Die hier angegebenen Bandbreiten sind definiert nach ANS I-S1-11-2004-07-27 und ISO 8608. Diese Bänder sind nachstehend festgelegt:

- Kurzwellenband SW: legt die Oktaven zusammen, die eine mittlere Ortsfrequenz von 1 Periode je Meter und 0,5 Perioden je Meter haben;
- Mittelwellenband MW: legt die Oktaven zusammen, die eine mittlere Ortsfrequenz von 0,25 Perioden je Meter und 0,125 Perioden je Meter haben;
- Langwellenband LW: legt die Oktaven zusammen, die eine mittlere Ortsfrequenz von 0,062 5 Perioden je Meter und 0,031 2 Perioden je Meter haben.

In Tabelle C.1 sind diese Werte zusammengefasst und sowohl Wellenlängen als auch Ortsfrequenzen angegeben.

Tabelle C.1 — Kennwerte der Filter

Band	Raumfilterung in Wellenlängen		Ortsfrequenzen in Perioden je Meter
	Bi-Oktave m	Oktave m	
Kurzwellen (SW)			
Untere Grenze	0,707 1	0,707 1	1,414 2
Mittelwert	1,414 2	1	1
Obere Grenze	2,828	1,414 2	0,707 1
		2	0,5
		2,828	0,353 6
Mittelwellen (MW)			
Untere Grenze	2,828	2,828	0,353 6
Mittelwert	5,656	4	0,25
Obere Grenze	11,312	5,656	0,176 8
		8	0,125
		11,312	0,088 4
Langwellen (LW)			
Untere Grenze	11,312	11,312	0,088 4
Mittelwert	22,624	16	0,062 5
Obere Grenze	45,248	22,624	0,044 2
		32	0,031 2
		45,248	0,022 1

C.5 Filterkoeffizienten

Die Koeffizienten können direkt angewendet werden oder mit Hilfe des im nachfolgenden Abschnitt „C++-Code für die Berechnung der wellenbandgefilterten Energieprofile“ beschriebenen Codes berechnet werden. Diese Koeffizienten setzen voraus, dass das Abtastintervall 0,05 m ist. In den nachfolgenden Tabellen sind die Koeffizienten für jeden Filter angegeben (17 Dezimalstellen sind gültig):

— allgemeiner Hochpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 100$ m (Butterworth, 6. Ordnung)

Zähler	Nenner
0,995 903 722 138 424 15	1
–3,983 614 888 553 696 6	–3,991 790 624 414 471 2
5,975 422 332 830 545 4	5,975 405 553 386 730 5
–3,983 614 888 553 696 6	–3,975 439 152 644 416 8
0,995 903 722 138 424 15	0,991 824 223 769 167 57

— Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 0,707$ m (Butterworth, 8. Ordnung)

Zähler	Nenner
2,145 298 015 770 21*10 ^{–6}	1
17,162 384 126 161 69*10 ^{–6}	–5,724 222 620 802 568 6
60,068 344 441 565 91*10 ^{–6}	14,581 450 313 281 04
120,136 688 883 131 82*10 ^{–6}	–21,537 527 317 629 245
150,170 861 103 914 77*10 ^{–6}	20,139 632 615 427 132
120,136 688 883 131 82*10 ^{–6}	–12,191 803 302 114 604
60,068 344 441 565 91*10 ^{–6}	4,660 802 537 247 655 6
17,162 384 126 161 69*10 ^{–6}	–1,027 805 161 100 119 3
2,145 298 015 770 21*10 ^{–6}	0,100 022 131 982 745 2

— Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 2,828$ m (Butterworth, 8. Ordnung)

Zähler	Nenner
68,701 805 53*10 ^{–12}	1
549,614 444 23*10 ^{–12}	–7,430 608 559 657 2169
1 923,650 554 82*10 ^{–12}	24,175 130 708 312 153
3 847,301 109 64*10 ^{–12}	–44,978 754 448 661 576
4 809,126 387 05*10 ^{–12}	52,341 837 840 524 1
3 847,301 109 64*10 ^{–12}	–39,010 781 619 345 6
1 923,650 554 82*10 ^{–12}	18,184 703 074 245 409
549,614 444 23*10 ^{–12}	–4,847 163 860 473 862 9
68,701 805 53*10 ^{–12}	0,565 636 882 644 256 16

— Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 2,828$ m (Butterworth, 7. Ordnung)

Zähler	Nenner
$1,279\,776\,187\,8 \cdot 10^{-9}$	1
$8,958\,433\,314\,61 \cdot 10^{-9}$	-6,500 807 423 877 749 8
$26,875\,299\,943\,83 \cdot 10^{-9}$	18,128 343 066 119 079
$44,792\,166\,573\,05 \cdot 10^{-9}$	-28,110 145 384 619 13
$44,792\,166\,573\,05 \cdot 10^{-9}$	26,175 397 507 756 664
$26,875\,299\,943\,83 \cdot 10^{-9}$	-14,636 485 035 235 95
$8,958\,433\,314\,61 \cdot 10^{-9}$	4,550 495 491 654 505 3
$1,279\,776\,187\,8 \cdot 10^{-9}$	-0,606 798 057 986 066 12

— Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 11,312$ m (Butterworth, 7. Ordnung)

Zähler	Nenner
$93,556\,24 \cdot 10^{-15}$	1
$654,893\,67 \cdot 10^{-15}$	-6,875 193 377 837 474 5
$1\,964,681\,02 \cdot 10^{-15}$	20,258 931 436 785 097
$3\,274,468\,37 \cdot 10^{-15}$	-33,166 446 092 752 317
$3\,274,468\,37 \cdot 10^{-15}$	32,580 346 116 749 226
$1\,964,681\,02 \cdot 10^{-15}$	-19,203 775 331 356 002
$654,893\,67 \cdot 10^{-15}$	6,288 799 768 552 883 6
$93,556\,24 \cdot 10^{-15}$	-0,882 662 520 129 438 13

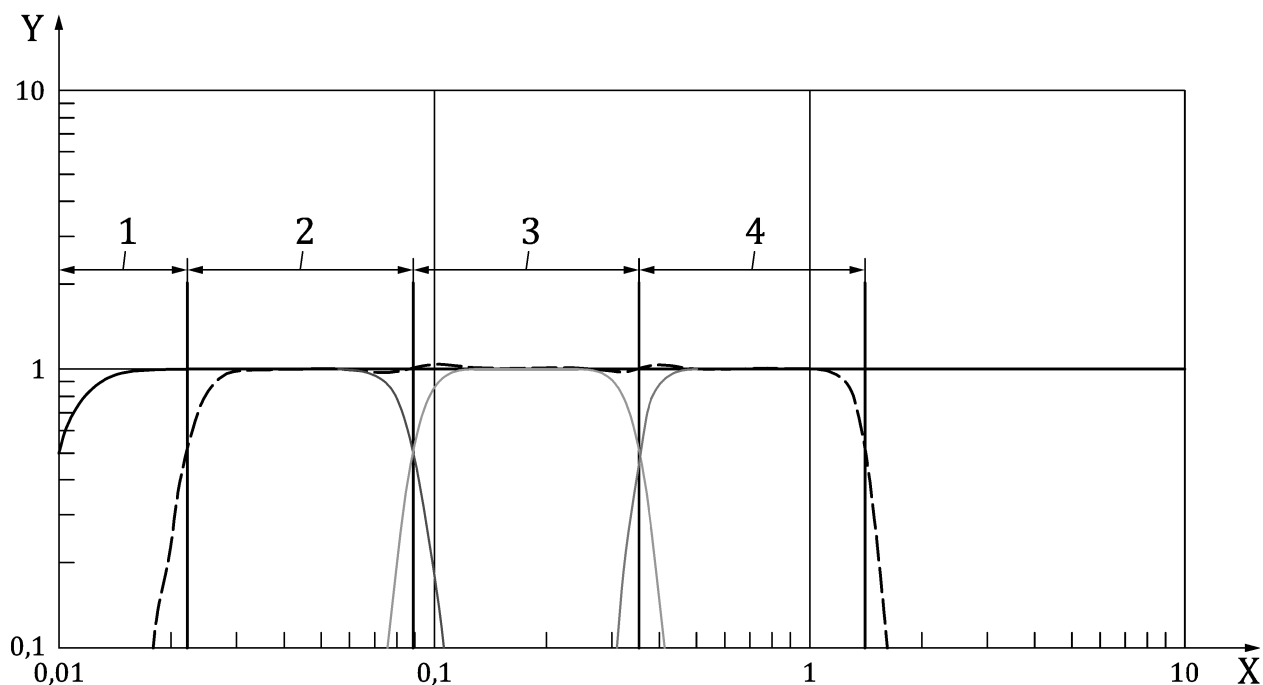
— Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 11,312$ m (Butterworth, 6. Ordnung)

Zähler	Nenner
$6,797\,451\,49 \cdot 10^{-12}$	1
$40,784\,708\,94 \cdot 10^{-12}$	-5,892 697 087 887 219 4
$101,961\,772\,36 \cdot 10^{-12}$	14,469 227 251 620 786
$135,949\,029\,81 \cdot 10^{-12}$	-18,949 743 931 136 801
$101,961\,772\,36 \cdot 10^{-12}$	13,960 843 524 977 586
$40,784\,708\,94 \cdot 10^{-12}$	-5,485 878 761 767 377 7
$6,797\,451\,49 \cdot 10^{-12}$	0,898 249 004 628 063 12

— Tiefpassfilter, begrenzt auf $\lambda = 45,248$ m (Butterworth, 6. Ordnung)

Zähler	Nenner
$1,717\,38 \cdot 10^{-15}$	1
$10,304\,26 \cdot 10^{-15}$	$-5,973\,174\,113\,470\,449\,2$
$25,760\,64 \cdot 10^{-15}$	$14,866\,230\,144\,781\,298$
$34,347\,52 \cdot 10^{-15}$	$-19,733\,176\,391\,096\,528$
$25,760\,64 \cdot 10^{-15}$	$14,733\,889\,456\,574\,856$
$10,304\,26 \cdot 10^{-15}$	$-5,867\,299\,751\,571\,234\,6$
$1,717\,38 \cdot 10^{-15}$	$0,973\,530\,654\,782\,168\,05$

C.6 Antwortkurven der Wellenbandfilter



Legende

- 1 Hochpassfilter (100 m) Butterworth 4. Ordnung
- 2 LW-Filter (11,3 m bis 45,5 m) Butterworth 6. Ordnung
- 3 MW-Filter (2,8 m bis 11,3 m) Butterworth 7. Ordnung
- 4 SW-Filter (0,7 m bis 2,8 m) Butterworth 8. Ordnung
- MW-Filter
- SW-Filter
- LW-Filter

- X Nb Perioden/m
- Y Verstärkung
- Gesamt (SW, MW, LW)
- HP-Filter

Bild C.1 — Antwortkurven für Kurzwellen-, Mittelwellen- und Langwellenbandfilter

C.7 Quadratischer Mittelwert (RMS) der aufbereiteten Profilhöhen je Wellenband

Der quadratische Mittelwert je Wellenband der aufbereiteten Profilhöhen über einen Abschnitt S_{ij} , wobei i bzw. j die jeweiligen Indizes des ersten und letzten Punkts des zu betrachtenden Profils sind, wird wie folgt definiert:

$$WB_{ij} = \sqrt{\frac{1}{j-i+1} \sum_{k=i}^{k=j} z_{wb,k}^2} \quad (C.3)$$

Der Index je Wellenband WB_{ij} kann für jedes der drei wellenbandbegrenzten Profile z_{wb} durch Anwendung der zuvor genannten Gleichung auf die digitalen Dateien bestimmt werden, die durch Filterung des aufbereiteten Profils mit Hilfe der zuvor beschriebenen Bi-Oktavfilter erhaltenen wurden. Beispielsweise für den Kurzwellenbandbereich (0,707 1 m bis 2,828 m) ist der Index SW_{ij} wie folgt definiert:

$$SW_{ij} = \sqrt{\frac{1}{j-i+1} \sum_{k=i}^{k=j} z_{sw,k}^2} \quad (C.4)$$

$SW_{1\,024, 2\,048}$ z. B. ist der quadratische Mittelwert des Kurzwellenbands der aufbereiteten Profilhöhen für die Auswertungslänge, die Profilabtastungen 1 024 bis 2 048 umfasst.

Die Signifikanz und Werte der verschiedenen WB_{ij} hängen von der Aufbereitungslänge auf nichtlineare Art ab; es wird dringend empfohlen, die folgenden Werte zu verwenden:

- 100 m und mindestens 20 m für die SW_{ij} -Werte;
- 100 m und mindestens 50 m für die MW_{ij} -Werte;
- mindestens 100 m für die LW_{ij} -Werte.

C.8 C++-Code für die Berechnung der wellenbandgefilterten Energieprofile

Filtre_Butterworth.h

```
#if !defined(AFX_FILTRE_BUTTERWORTH_H_297458A3_B069_4CA1_9675_B1D2A618399F_INCLUDED_)
#define AFX_FILTRE_BUTTERWORTH_H_297458A3_B069_4CA1_9675_B1D2A618399F_INCLUDED_

#if _MSC_VER > 1000
#pragma once
#endif // _MSC_VER > 1000

class CFiltre_Butterworth
{
public:
    CFiltre_Butterworth();
    virtual ~CFiltre_Butterworth();
    void Coefficients(double *A,double *B);
    int Filtrage(int ordre,double frequence_coupure,int np,double *x,double *y);

protected :
    double *A,*B;
```

```
double *binomial_mult( int n, double *p );
double *trinomial_mult( int n, double *b, double *c );
double *dcof_bwlp( int n, double fcf );
double *dcof_bwbp( int n, double fcf );
double *dcof_bwbp( int n, double f1f, double f2f );
double *dcof_bwbs( int n, double f1f, double f2f );
int *ccof_bwlp( int n );
int *ccof_bwbp( int n );
int *ccof_bwbp( int n );
double *ccof_bwbs( int n, double f1f, double f2f );
double sf_bwlp( int n, double fcf );
double sf_bwbp( int n, double fcf );
double sf_bwbp( int n, double f1f, double f2f );
double sf_bwbs( int n, double f1f, double f2f );
void filter(int ord, double *a, double *b, int np, double *x, double *y);
};

#endif // !defined(AFX_FILTRE_BUTTERWORTH_H__297458A3_B069_4CA1_9675_B1D2A618399F_INCLUDED_)
```

Filtre_Butterworth.cpp

```
#include "stdafx.h"
#include "Filtre_Butterworth.h"
#include <math.h>

#ifdef _DEBUG
#undef THIS_FILE
static char THIS_FILE[]=__FILE__;
#define new DEBUG_NEW
#endif

#define M_PI 3.1415926535898

CFiltre_Butterworth::CFiltre_Butterworth()
{
    A=NULL;
    B=NULL;
}

CFiltre_Butterworth::~CFiltre_Butterworth()
{
    if (A) delete [] A;
    if (B) delete [] B;
}

void CFiltre_Butterworth::Coefficients(double *CA,double *CB)
{
    CA=A;
    CB=B;
}

int CFiltre_Butterworth::Filtrage(int ordre,double frequence_coupure,int np,double *x,double *y)
{
    int i,*ccof;
    double sf,*aux;

    aux = new double[np];
    for (i=0;i<np;i++) aux[i]=x[i];
    A = dcof_bwlp(ordre,frequence_coupure);
    if (A==NULL) return 0;
    ccof = ccof_bwlp(ordre);
    if (ccof==NULL) return 0;
    sf = sf_bwlp(ordre,frequence_coupure);
    B = new double[ordre+1];
    for (i=0;i<=ordre;i++) B[i]=(double)ccof[i]*sf;

    filter(ordre,A,B,np,aux,y);
    /* NOW y=filter(b,a,x); */
    /* reverse the series for FILTFILT */
    for (i=0;i<np;i++) aux[i]=y[np-i-1];
    /* do FILTER again */
    filter(ordre,A,B,np,aux,y);
    /* reverse the series back */
    for (i=0;i<np;i++) aux[i]=y[np-i-1];
    for (i=0;i<np;i++) y[i]=aux[i];
    delete [] aux;
    delete [] ccof;
    return 1;
}
```

/*****
binomial_mult - multipliziert eine Reihe von Binomen und gibt
die Koeffizienten des resultierenden Polynoms zurück.

Die Multiplikation hat die folgende Form:

$$(x+p[0])*(x+p[1])*...*(x+p[n-1])$$

Die Koeffizienten $p[i]$ werden als komplex angenommen und an

die Funktion als ein Zeiger auf ein Array vom Typ Double der Länge $2n$ weitergegeben.

Das resultierende Polynom hat die folgende Form:

$$x^n + a[0]*x^{n-1} + a[1]*x^{n-2} + \dots + a[n-2]*x + a[n-1]$$

Die Koeffizienten $a[i]$ können allgemein komplex sein, sollten sich jedoch in den meisten Fällen als reell erweisen. Die Koeffizienten $a[i]$ werden von der Funktion als ein Zeiger auf ein Array vom Typ double der Länge $2n$ weitergegeben. Der Speicherplatz für das Array wird durch von der Funktion zugeordnet und sollte von dem aufrufenden Programm freigegeben werden, wenn nicht länger benötigt.

Funktionsargumente:

- n - Die Anzahl der zu multiplizierenden Binome
- p - Zeiger auf ein Array vom Typ double, wobei $p[2i]$ ($i=0\dots n-1$) als der Realteil des Koeffizienten des i -ten Binoms angenommen wird und $p[2i+1]$ als der Imaginärteil. Die Gesamtgröße des Arrays ist dann $2n$.

*/

```
double *CFiltre_Butterworth::binomial_mult( int n, double *p )
{
    int i, j;
    double *a;

    a = (double *)calloc( 2 * n, sizeof(double) );
    if( a == NULL ) return( NULL );

    for( i = 0; i < n; ++i )
    {
        for( j = i; j > 0; --j )
        {
            a[2*j] += p[2*i] * a[2*(j-1)] - p[2*i+1] * a[2*(j-1)+1];
            a[2*j+1] += p[2*i] * a[2*(j-1)+1] + p[2*i+1] * a[2*(j-1)];
        }
        a[0] += p[2*i];
        a[1] += p[2*i+1];
    }
    return( a );
}
```

/*****
trinomial_mult - multipliziert eine Reihe von Trinomen und gibt
die Koeffizienten des resultierenden Polynoms zurück.

Die Multiplikation hat die folgende Form:

$$(x^2 + b[0]x + c[0])*(x^2 + b[1]x + c[1])*...*(x^2 + b[n-1]x + c[n-1])$$

Die Koeffizienten $b[i]$ und $c[i]$ werden als komplex angenommen und an

die Funktion als ein Zeiger auf Arrays vom Typ double der Länge $2n$ weitergegeben. Der Realteil der Koeffizienten wird in den geradzahligen Elementen des Arrays gespeichert