

DIN EN ISO 16610-31



ICS 17.040.20; 17.040.40

Entwurf

Einsprüche bis 2023-12-27
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 16610-31:2017-03

**Geometrische Produktspezifikation (GPS) –
Filtration –
Teil 31: Robuste Profilfilter: Gaußsche Regressionsfilter
(ISO/DIS 16610-31:2023);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 16610-31:2023**

Geometrical product specifications (GPS) –
Filtration –
Part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters (ISO/DIS 16610-31:2023);
German and English version prEN ISO 16610-31:2023

Spécification géométrique des produits (GPS) –
Filtrage –
Partie 31: Filtres de profil robustes: Filtres de régression gaussiens
(ISO/DIS 16610-31:2023);
Version allemande et anglaise prEN ISO 16610-31:2023

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-10-27 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 natg@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 Technische Grundlagen (NATG), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Es wird gebeten, mit den Kommentaren zu diesem Entwurf jegliche relevanten Patentrechte, die bekannt sind, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 55 Seiten

DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 16610-31:2023) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 213 „Dimensional and geometrical product specifications and verification“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 290 „Geometrische Produktspezifikationen und -prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von Kürzel des Normungsinstitutes (AFNOR) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 152-03-03 AA „Oberflächen“ im DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG).

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.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 8015	siehe	DIN EN ISO 8015
ISO 14253-1	siehe	DIN EN ISO 14253-1
ISO 14638	siehe	DIN EN ISO 14638
ISO 16610-1:2015	siehe	DIN EN ISO 16610-1:2015-11
ISO 16610-20:2015	siehe	DIN EN ISO 16610-20:2015-12
ISO 16610-21	siehe	DIN EN ISO 16610-21
ISO 16610-30:2015	siehe	DIN EN ISO 16610-30:2017-04

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 16610-31:2017-03 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Dieses Dokument definiert ideale kontinuierliche Gaußsche Regressionsfilter für offene Profile und für geschlossene Profile, beispielhaft angewandt auf Rundheitsprofile;
- b) es wird eine normative iterative Lösung für den idealen kontinuierlichen Gaußschen Regressionsfilter angegeben.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 8015, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Grundlagen — Konzepte, Prinzipien und Regeln*

DIN EN ISO 14253-1, *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) — Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen — Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen*

DIN EN ISO 14638, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Matrix-Modell*

DIN EN ISO 16610-1:2015-11, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Filterung — Teil 1: Überblick und grundlegende Konzepte (ISO 16610-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-1:2015*

DIN EN ISO 16610-20:2015-12, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Filterung) — Teil 20: Lineare Profilfilter: Grundlegende Konzepte (ISO 16610-20:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-20:2015*

DIN EN ISO 16610-21, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Filterung — Teil 21: Lineare Profilfilter: Gauß-Filter*

DIN EN ISO 16610-30:2017-04, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Filterung — Teil 30: Robuste Profilfilter: Grundlegende Konzepte (ISO 16610-30:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16610-30:2017*

– *Entwurf* –

E DIN EN ISO 16610-31:2023-12

– Leerseite –

**Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Filterung – Teil 31: Robuste Profilfilter:
Gaußsche Regressionsfilter (ISO/DIS 16610-31:2023)**

Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters (ISO/DIS 16610-31:2023)

Spécification géométrique des produits (GPS) – Filtrage – Partie 31: Filtres de profil robustes: Filtres de régression gaussiens (ISO/DIS 16610-31:2023)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Merkmale des robusten Gaußschen Regressionsfilters für ein offenes Profil	9
4.1 Allgemeine Informationen	9
4.2 Bestimmung des langwelligen Anteils für ein offenes Profil	9
4.3 Bestimmung des kurzwelligen Anteils für ein offenes Profil	10
4.4 Übertragungsfunktionen für ein offenes Profil	11
5 Merkmale des robusten Gaußschen Regressionsfilters für ein geschlossenes Profil	11
5.1 Allgemeine Informationen	11
5.2 Bestimmung des langwelligen Anteils für ein geschlossenes Profil	11
5.3 Bestimmung des kurzwelligen Anteils für ein geschlossenes Profil	12
5.4 Übertragungsfunktionen für ein geschlossenes Profil	13
6 Empfehlungen und Anforderungen	13
6.1 Empfohlene Reihe von Nesting-Index-Werten für offene und geschlossene Profile	13
6.2 Regressionsgrad p	13
6.3 Iterative Lösung	13
7 Filterkennzeichnung	14
Anhang A (normativ) Lineares Gaußsches Regressionsfilter	15
A.1 Allgemeine Informationen	15
A.2 Gewichtsfunktion des linearen Gaußschen Regressionsfilters	15
A.3 Übertragungsfunktion des langwelligen Anteils des linearen Gaußschen Regressionsfilters	16
Anhang B (informativ) Beispiele für die Anwendung des robusten Gaußschen Regressionsfilters	18
B.1 Allgemeine Informationen	18
B.1.1 Auf einem geschliffenen Profil angewendetes Gaußsches Regressionsfilter	18
B.1.2 Auf gedrehte Profile angewendetes Gaußsches Regressionsfilter	19
B.1.3 Auf plateauartige Profile mit Kerben angewendetes Gaußsches Regressionsfilter	21
Anhang C (informativ) Bezug zum Filter-Matrix-Modell	24
C.1 Allgemeines	24
C.2 Position im Filter-Matrix-Modell	24
Anhang D (informativ) Bezug zum GPS-Matrix-Modell	25
D.1 Allgemeines	25
D.2 Informationen über dieses Dokument und seine Anwendung	25
D.3 Position im GPS-Matrix-Modell	25
D.4 Verwandte Internationale Normen	26
Literaturhinweise	27

Bilder

Bild A.1 — Gewichtsfunktion eines linearen Gaußschen Regressionsfilters für ein offenes Profil	16
Bild A.2 — Langwellige Übertragungsfunktion eines linearen Gaußschen Regressionsfilters für ein sinusförmiges offenes Profil	17
Bild B.1 — Beispiel 1: Vergleich des linearen Gauß-Filters (ISO 16610-21) mit dem robusten Gaußschen Regressionsfilter (dieses Dokument)	19

Bild B.2 — Beispiel 2: Vergleich des linearen Gauß-Filters (ISO 16610-21) mit dem robusten Gaußschen Regressionsfilter (dieses Dokument)	20
Bild B.3 — Beispiel 3: Vergleich des linearen Gauß-Filters (ISO 16610-21) mit dem robusten Gaußschen Regressionsfilter (dieses Dokument)	21
Bild B.4 — Beispiel 4: Vergleich des linearen Gauß-Filters (ISO 16610-21) mit dem robusten Gaußschen Regressionsfilter nach diesem Dokument	22
Bild B.5 — Beispiel 5: Vergleich des linearen Gauß-Filters (ISO 16610-21) mit dem robusten Gaußschen Regressionsfilter (dieses Dokument)	23

Tabellen

Tabelle C.1 — Bezug zum Filter-Matrix-Modell	24
Tabelle D.1 — Position im GPS-Matrix-Modell	25

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 16610-31:2023) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 213 „Dimensional and geometrical product specifications and verification“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 290 „Geometrische Produktspezifikation und -prüfung“ erarbeitet, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 16610-31:2016 ersetzen.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 16610-31:2023 wurde von CEN als prEN ISO 16610-31:2023 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC Directives, Teil 1, beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC Directives, Teil 2, erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 213, *Dimensional and geometrical product specifications and verification*, in Zusammenarbeit mit dem Europäischen Komitee für Normung (CEN), Technisches Komitee CEN/TC 290, *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung*, in Übereinstimmung mit der Vereinbarung zur technischen Zusammenarbeit zwischen ISO und CEN (Wiener Vereinbarung) erarbeitet.

Diese Ausgabe von ISO 16610-31 ersetzt die Ausgabe ISO 16610-31:2016, die technisch überarbeitet wurde.

Die wesentlichen Änderungen sind folgende:

- dieses Dokument definiert ideale kontinuierliche Gaußsche Regressionsfilter für offene Profile und für geschlossene Profile am Beispiel von Rundheitsprofilen;
- es wird eine normative iterative Lösung für die idealen kontinuierlichen Gaußschen Regressionsfilter angegeben.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 16610 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

Dieses Dokument ist eine Norm für die geometrische Produktspezifikation (GPS) und ist als eine allgemeine GPS-Norm anzusehen (siehe ISO 14638). Es beeinflusst Kettenglied C aller Normenketten.

Das in ISO 14638 angegebene ISO-GPS-Matrix-Modell gibt einen Überblick über das ISO-GPS-System, von dem dieses Dokument ein Teil ist. Für dieses Dokument gelten die in ISO 8015 angegebenen grundlegenden ISO-GPS-Regeln, und die in ISO 14253-1 angegebenen standardmäßigen Entscheidungsregeln gelten für die in Übereinstimmung mit diesem Dokument festgelegten Spezifikationen, falls nichts anderes angegeben ist.

Weitere Informationen zur Beziehung zwischen diesem Dokument und dem Filter-Matrix-Modell sind in Anhang C enthalten.

Für ausführlichere Informationen zur Beziehung zwischen diesem Dokument und anderen Normen zum GPS-Matrix-Modell siehe Anhang D.

Dieses Dokument erarbeitet die Terminologie und ein Konzept für robuste Gaußsche Regressionsfilter für Profile. Sie trennen die langwelligen und kurzwelligen Anteile eines Oberflächenprofils in einer solchen Art und Weise, dass das Oberflächenprofil unverändert rekonstruiert werden kann. Das robuste Gaußsche Regressionsfilter für Profile verringert den Einfluss von hervorstehenden Tälern und Hügeln.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt robuste Gaußsche Regressionsfilter für die Filterung von Oberflächenprofilen fest. Es legt insbesondere fest, wie langwellige und kurzwellige Anteile eines Oberflächenprofils mit hervorstechenden Tälern und Hügeln zerlegt werden.

Die für geschlossene Profile dargestellten Konzepte sind für den Fall der Rundheitsfilterung anwendbar. Diese Konzepte können gegebenenfalls auf verallgemeinerte geschlossene Profile erweitert werden, besonders für Profile mit Wiederholungsmerkmalen.

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).

ISO 16610-1:2015, *Geometrical product specifications (GPS) — Filtration — Part 1: Overview and basic concepts*

ISO 16610-20:2015, *Geometrical product specifications (GPS) — Filtration — Part 20: Linear profile filters: Basic concepts*

ISO 16610-21, *Geometrical product specifications (GPS) — Filtration — Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters*

ISO 16610-30:2015, *Geometrical product specifications (GPS) — Filtration — Part 30: Robust profile filters: Basic concepts*

ISO/IEC Guide 99, *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 16610-1, ISO 16610-20, ISO 16610-21, ISO 16610-30, ISO/IEC Guide 99 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

3.1

Oberflächenprofil

Kurve, die sich durch den Schnitt zwischen einem Oberflächenanteil und einer idealen Ebene ergibt

[QUELLE: ISO 16610-1:2015, 3.1.2, modifiziert — Anmerkung 1 zum Begriff und Anmerkung 2 zum Begriff wurden gestrichen.]

3.1.1

offenes Profil

Oberflächenprofil endlicher Länge mit zwei Enden

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Oberflächenprofil überschneidet sich nicht selbst.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein offenes Profil hat einen kompakten Träger, d. h. innerhalb eines bestimmten Intervalls können die Höhenwerte eines offenen Profils jede reelle Zahl einnehmen. Außerhalb des Intervalls sind die Höhenwerte eines offenen Profils gleich null.

[QUELLE: ISO 16610-1:2015, 3.7, modifiziert — Anmerkung 2 zum Begriff wurde hinzugefügt.]

3.1.2

geschlossenes Profil

verbundenes Oberflächenprofil endlicher Länge ohne Enden

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Oberflächenprofil überschneidet sich nicht selbst, d. h. es ist eine einfache geschlossene Kurve oder Jordan-Kurve.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein geschlossenes Profil ist periodisch mit der endlichen Periodenlänge L .

Anmerkung 3 zum Begriff: Ein typisches Beispiel für ein geschlossenes Profil ist ein Profil aus einer Rundheitsmessung.

[QUELLE: ISO 16610-1:2015, 3.8, modifiziert — Anmerkung 2 zum Begriff und Anmerkung 3 zum Begriff wurden hinzugefügt.]

3.2

lineares Profilfilter

Profilfilter, das Oberflächenprofile in langwellige und kurzwellige Anteile zerlegt und eine lineare Funktion ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Wenn F eine Funktion ist und X und Y Profile sind, dann ist F eine lineare Funktion, wenn $F(aX + bY) = aF(X) + bF(Y)$ gilt.

[QUELLE: ISO 16610-20:2015, 3.1]

3.3

robustes Profilfilter

Profilfilter, das Profile in langwellige und kurzwellige Anteile zerlegt und gegenüber bestimmten Phänomenen in den Eingangsdaten unempfindlich ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein robustes Profilfilter ist ein nicht-lineares Filter.

Anmerkung 2 zum Begriff: Siehe auch ISO 16610-1:2015, 3.9.

Anmerkung 3 zum Begriff: Ausreißer, Kratzer und Stufen sind Beispiele für bestimmte Phänomene. Weitere Einzelheiten können ISO 16610-30:2015 entnommen werden.

Anmerkung 4 zum Begriff: Besonders das in diesem Dokument festgelegte robuste Gaußsche Regressionsfilter verringert den Einfluss besonderer Phänomene wie hervorstehende Täler und Hügel. Beispiele für Profile sind in Anhang B dieses Dokuments angegeben.

3.4

Biweight-Funktion nach Beaton und Tukey

bei der M-Schätzung verwendete Funktion, die Ordinatenwerte $\Delta z(x)$ nach ihren Amplituden gewichtet und durch Gleichung (1) festgelegt ist

$$\delta(\Delta z(x), c) = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{\Delta z(x)}{c}\right)^2\right)^2 & \text{für } |\Delta z(x)| \leq c \\ 0 & \text{für } |\Delta z(x)| > c \end{cases} \quad (1)$$

wobei $\Delta z(x)$ Ordinatenwerte sind und c eine Skalenkonstante ist.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Biweight-Funktion $\delta(\Delta z(x), c)$ nach Beaton und Tukey ist für Ordinatenwerte $\Delta z(x) \ll c$ nahezu konstant. Bei ansteigenden Ordinatenwerten $\Delta z(x)$ nähern sich die Gewichtungen an null.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Biweight-Funktion nach Beaton und Tukey hängt mit der Einflussfunktion $\psi(\Delta z(x))$ (siehe ISO 16610-30:2015), die bei der M-Schätzung verwendet wird, wie folgt zusammen: $\psi(\Delta z(x)) = \Delta z(x) \delta(\Delta z(x), c)$.

Anmerkung 3 zum Begriff: Siehe auch ISO 16610-30:2015 und Literaturhinweis [4].

3.5

Regressionsfilter

Profilfilter, das auf der lokalen polynomialen Modellierung der langwelligen Anteile eines Oberflächenprofils beruht

3.6

robustes Gaußsches Regressionsfilter

Regressionsfilter, das auf der Gaußschen Gewichtsfunktion und der Biweight-Funktion nach Beaton und Tukey beruht

3.7

Wellen je Umdrehung

UPR, en: undulations per revolution

ganze Zahl sinusförmiger Wellen in einem geschlossenen Profil

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Dokument ist UPR eine Frequenz und wird mit $\tilde{N}$ bezeichnet.

4 Merkmale des robusten Gaußschen Regressionsfilters für ein offenes Profil

4.1 Allgemeine Informationen

In diesem Abschnitt wird die ideale Filterung eines offenen Profils betrachtet. Siehe 6.3 für eine iterative Lösung für das robuste Gaußsche Regressionsfilter.

Da das robuste Gaußsche Regressionsfilter nicht-linear ist und keine Übertragungsfunktion mithilfe der Fourier-Transformation angegeben werden kann, wird die allgemeine Benennung Nesting-Index statt Grenzwellenlänge für die Filterkenngröße verwendet. In vielen Anwendungsfällen sind aber auch die Werte der Grenzwellenlänge, wie sie bei der linearen Filterung verwendet werden, für einen Nesting-Index bei der robusten Filterung geeignet.

4.2 Bestimmung des langwelligen Anteils für ein offenes Profil

Zur Bestimmung des langwelligen Anteils eines offenen Profils wird das robuste Gaußsche Regressionsfilter mit Grad p durch Gleichung (2) festgelegt:

$$w(x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \left(\int_{\Omega} X_p^T(x, u) X_p(x, u) s(x, u) du \right)^{-1} \int_{\Omega} z(u) X_p^T(x, u) s(x, u) du \quad (2)$$

Dabei ist

Ω das endliche Intervall, angegeben als eine Reihe, in der das offene Profil jede reelle Zahl annehmen kann;

x die angegebene x -Koordinate mit $x \in \Omega$;

- u die Integrationsvariable entlang der x -Achse mit $u \in \Omega$;
- $z(u)$ das offene Profil in Abhängigkeit von u ;
- $X_p(x, u)$ der Vektorraum der Polynome bis zum p -ten Grad in Abhängigkeit von x und u ;
- $X_p^T(x, u)$ die Transponierte von $X_p(x, u)$;
- $s(x, u)$ die modifizierte Gaußsche Gewichtsfunktion in Abhängigkeit von x und u ;
- $w(x)$ der langwellige Anteil in Abhängigkeit von x .

Der Vektorraum $X_p(x, u)$ ist durch Gleichung (3) festgelegt:

$$X_p(x, u) = \begin{pmatrix} 1 & (x - u) & \cdots & (x - u)^p \end{pmatrix} \quad (3)$$

Die modifizierte Gaußsche Gewichtsfunktion $s(x, u)$ ist durch Gleichung (4) festgelegt:

$$s(x, u) = \delta(z(u) - w(u), c) \frac{1}{\gamma N_i} e^{-\pi \left(\frac{x-u}{\gamma N_i} \right)^2} \quad (4)$$

Dabei ist

- δ die Biweight-Funktion nach Beaton und Tukey entsprechend 3.4;
- N_i der Nesting-Index;
- γ die Filterkonstante in Abhängigkeit vom Grad p des Polynoms;
- c die Skalenkonstante, die sich aus Gleichung (5) ergibt.

$$c = \frac{3}{\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(0,5)} \operatorname{median}_{u \in \Omega} |z(u) - w(u)| \approx 4,4478 \operatorname{median}_{u \in \Omega} |z(u) - w(u)| \quad (5)$$

Die Definition der Skalenkonstante c entspricht der dreifachen Standardabweichung, wenn $z(u) - w(u)$ eine Gaußsche Amplitudenverteilung aufweist.

Für $p = 0,1,2$ ist die Filterkonstante γ durch Gleichung (6) festgelegt:

$$\gamma = \begin{cases} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \approx 0,4697 & \text{für } p = 0,1 \\ \sqrt{\frac{-1 - W_{-1}\left(-\frac{1}{2e}\right)}{\pi}} \approx 0,7309 & \text{für } p = 2 \end{cases} \quad (6)$$

ANMERKUNG 1 erf^{-1} ist die inverse Fehlerfunktion.

ANMERKUNG 2 W_{-1} ist die Lambertsche W-Funktion mit Ast -1 (siehe Literaturhinweise [6]).

ANMERKUNG 3 Die mittlere absolute Abweichung $|z(u) - w(u)|$ wird mit MAD bezeichnet (siehe ISO 16610-30:2015, 3.5.2).

4.3 Bestimmung des kurzwelligen Anteils für ein offenes Profil

Der kurzwellige Anteil für ein offenes Profil wird durch Subtrahieren des langwelligen Anteils von dem offenen Profil nach Gleichung (7) bestimmt.

$$r(x) = z(x) - w(x) \quad (7)$$

Dabei ist

- x die angegebene x -Koordinate;
- $z(x)$ das offene Profil in Abhängigkeit von x ;
- $w(x)$ der langwellige Anteil in Abhängigkeit von x ;
- $r(x)$ der kurzwellige Anteil in Abhängigkeit von x .

4.4 Übertragungsfunktionen für ein offenes Profil

Die modifizierte Gaußsche Gewichtsfunktion des robusten Gaußschen Regressionsfilters ist von den Oberflächenprofilhöhen und der Lage auf der x -Achse des offenen Profils abhängig. Deshalb kann keine Übertragungsfunktion mithilfe der Fourier-Transformation angegeben werden.

5 Merkmale des robusten Gaußschen Regressionsfilters für ein geschlossenes Profil

5.1 Allgemeine Informationen

In diesem Abschnitt wird die ideale Filterung von geschlossenen Profilen mit endlicher Periodenlänge L , die auf Rundheitsprofile angewendet wird, betrachtet. Siehe 6.3 für eine iterative Lösung für das robuste Gaußsche Regressionsfilter.

Da das robuste Gaußsche Regressionsfilter nicht-linear ist und keine Übertragungsfunktionen mithilfe der Fourier-Transformation angegeben werden können, wird die allgemeine Benennung Nesting-Index in UPR statt Grenzfrequenz in UPR für die Filterkenngröße verwendet. In vielen Anwendungsfällen sind aber auch die Werte der Grenzfrequenz in UPR, wie sie bei der linearen Filterung verwendet werden, für einen Nesting-Index in UPR bei der robusten Filterung geeignet.

5.2 Bestimmung des langwelligen Anteils für ein geschlossenes Profil

Zur Bestimmung des langwelligen Anteils eines geschlossenen Profils wird das robuste Gaußsche Regressionsfilter mit Grad p durch Gleichung (8) festgelegt:

$$\tilde{w}(x) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \int_{x-\frac{L}{\tilde{N}_i}}^{x+\frac{L}{\tilde{N}_i}} X_p^T(x,u) X_p(x,u) \tilde{s}(x,u) du \\ \int_{x-\frac{L}{\tilde{N}_i}}^{x+\frac{L}{\tilde{N}_i}} \tilde{z}(u) X_p^T(x,u) \tilde{s}(x,u) du \end{pmatrix}^{-1} \int_{x-\frac{L}{\tilde{N}_i}}^{x+\frac{L}{\tilde{N}_i}} \tilde{z}(u) X_p^T(x,u) \tilde{s}(x,u) du \quad (8)$$

Dabei ist

- x die angegebene x -Koordinate;
- u die Integrationsvariable entlang der x -Achse;
- L die Periodenlänge des geschlossenen Profils;
- $\tilde{N}_i$ der Nesting-Index in Wellen je Umdrehung;
- $\tilde{z}(u)$ das geschlossene Profil in Abhängigkeit von u ;

$X_p(x, u)$ der Vektorraum der Polynome bis zum p -ten Grad in Abhängigkeit von x und u ;

$X_p^T(x, u)$ die Transponierte von $X_p(x, u)$;

$\tilde{s}(x, u)$ die modifizierte Gaußsche Gewichtsfunktion in Abhängigkeit von x und u ;

$\tilde{w}(x)$ der langwellige Anteil in Abhängigkeit von x .

Der Vektorraum $X_p(x, u)$ ist durch Gleichung (9) festgelegt:

$$X_p(x, u) = \begin{pmatrix} 1 & (x - u) & \cdots & (x - u)^p \end{pmatrix} \quad (9)$$

Die modifizierte Gaußsche Gewichtsfunktion $\tilde{s}(x, u)$ ist durch Gleichung (10) festgelegt:

$$\tilde{s}(x, u) = \delta(\tilde{z}(u) - \tilde{w}(u), \tilde{c}) \frac{\tilde{N}_i}{\gamma L} e^{-\pi \left(\frac{(x-u) \tilde{N}_i}{\gamma L} \right)^2} \quad (10)$$

Dabei ist

δ die Biweight-Funktion nach Beaton und Tukey entsprechend 3.4;

γ die Filterkonstante in Abhängigkeit vom Grad p des Polynoms;

$\tilde{c}$ die Skalenkonstante, die sich aus Gleichung (11) ergibt.

$$\tilde{c} = \frac{3}{\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(0,5)} \operatorname{median}_{x \leq u < x+L} |\tilde{z}(u) - \tilde{w}(u)| \approx 4,4478 \operatorname{median}_{x \leq u < x+L} |\tilde{z}(u) - \tilde{w}(u)| \quad (11)$$

Die Definition der Skalenkonstante $\tilde{c}$ entspricht der dreifachen Standardabweichung, wenn $\tilde{z}(u) - \tilde{w}(u)$ eine Gaußsche Amplitudenverteilung aufweist.

Für $p = 0, 1, 2$ ist die Filterkonstante γ durch Gleichung (12) festgelegt:

$$\gamma = \begin{cases} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \approx 0,4697 & \text{für } p = 0, 1 \\ \sqrt{\frac{-1 - W_{-1}(-\frac{1}{2e})}{\pi}} \approx 0,7309 & \text{für } p = 2 \end{cases} \quad (12)$$

ANMERKUNG 1 erf^{-1} ist die inverse Fehlerfunktion.

ANMERKUNG 2 W_{-1} ist die Lambertsche W-Funktion mit Ast -1 (siehe Literaturhinweise [6]).

ANMERKUNG 3 Die mittlere absolute Abweichung $|\tilde{z}(u) - \tilde{w}(u)|$ wird mit MAD bezeichnet (siehe ISO 16610-30:2015, 3.5.2).

ANMERKUNG 4 Die Beziehung zwischen dem Nesting-Index $\tilde{N}_i$ in Wellen je Umdrehung und dem Nesting-Index N_i ergibt sich aus $N_i = L/\tilde{N}_i$, wobei L die Periodenlänge des geschlossenen Profils ist.

5.3 Bestimmung des kurzwelligen Anteils für ein geschlossenes Profil

Der kurzwellige Anteil für ein geschlossenes Profil wird durch Subtrahieren des langwelligen Anteils von dem geschlossenen Profil nach Gleichung (13) ermittelt:

$$\tilde{r}(x) = \tilde{z}(x) - \tilde{w}(x) \quad (13)$$

Dabei ist

- x die angegebene x -Koordinate;
- $\tilde{z}(x)$ das geschlossene Profil in Abhängigkeit von x ;
- $\tilde{w}(x)$ der langwellige Anteil in Abhängigkeit von x ;
- $\tilde{r}(x)$ der kurzwellige Anteil in Abhängigkeit von x .

5.4 Übertragungsfunktionen für ein geschlossenes Profil

Die modifizierte Gaußsche Gewichtsfunktion des robusten Gaußschen Regressionsfilters ist von den Oberflächenprofilhöhen und der Lage auf der x -Achse des geschlossenen Profils abhängig. Deshalb kann keine Übertragungsfunktion mithilfe der Fourier-Transformation angegeben werden.

6 Empfehlungen und Anforderungen

6.1 Empfohlene Reihe von Nesting-Index-Werten für offene und geschlossene Profile

Für offene Profile und wenn keine anderen Festlegungen getroffen wurden, wird die Verwendung eines Nesting-Indexes empfohlen, der größer ist als die dreifache Elementbreite im Oberflächenprofil-Datensatz und der aus der folgenden Wertereihe stammt:

$$n_i = \dots; 2,5 \mu\text{m}; 8 \mu\text{m}; 25 \mu\text{m}; 80 \mu\text{m}; 250 \mu\text{m}; 0,8 \text{ mm}; 2,5 \text{ mm}; 8 \text{ mm}; 25 \text{ mm}; \dots$$

Für geschlossene Profile (Rundheitsprofile) und wenn keine anderen Festlegungen getroffen wurden, wird die Verwendung eines Nesting-Indexes in Wellen je Umdrehung empfohlen, der kleiner ist als die dreifache Elementbreite in Wellen je Umdrehung im Oberflächenprofil-Datensatz und der aus der folgenden Wertereihe stammt:

$$f_i = 5; 15; 50; 150; 500; 1\,500; 5\,000; \dots$$

6.2 Regressionsgrad p

Sofern nicht anders festgelegt, muss $p = 2$ verwendet werden. In diesem Fall folgt das Filterergebnis lokal einem Polynom 2. Grades und ist in der Lage, sich dem Vorhandensein einer nominalen Gestalt im Profil anzunähern. Der Grad $p = 0,1$ darf für Oberflächenprofile nach der F-Operation verwendet werden. Der Grad $p = 0,1$ erhöht die Robustheit von Oberflächen mit hervorstehenden Tälern und Hügeln an den Profilgrenzen.

6.3 Iterative Lösung

Gleichung (2) und Gleichung (8) sind nicht-linear und müssen iterativ gelöst werden. Dieser Iterationsprozess ist am Beispiel eines offenen Profils in Gleichung (2) festgelegt. Für geschlossene Profile müssen Gleichung (2) und Gleichung (5) durch Gleichung (8) und Gleichung (11) in dem folgenden Iterationsprozess ersetzt werden:

- i) Es wird $\delta = 1$ angesetzt und die Anzahl der Iterationen wird mit $n_{\text{iter}} = 0$ angesetzt.
- ii) Die langwelligen Anteile $w(x)$ werden mit Gleichung (2) berechnet. Die Anzahl der Iterationen n_{iter} wird um 1 erhöht. Der zuerst mit $\delta = 1$ berechnete Anteil $w(x)$ entspricht einer linearen Gaußschen Regressionsfilterung, für die eine Gewichtsfunktion und eine Übertragungsfunktion festgelegt werden können. Dies ergibt die Filterkonstanten γ nach Gleichung (6) bzw. Gleichung (12). Siehe Anhang A für Einzelheiten.
- iii) Die Skalenkonstante c wird nach Gleichung (5) berechnet und c wird als c_{old} gespeichert.
- iv) Die Wichtungen $\delta(z(u) - w(u), c)$ werden nach Gleichung (1) berechnet.