

A small white square icon followed by the name Michael Krystek.

Michael Krystek

Filterung von Messdaten in der industriellen Messtechnik

Filterung von Messdaten in der industriellen Messtechnik



Michael Krystek

Filterung von Messdaten in der industriellen Messtechnik

1. Auflage 2021

Herausgeber:
DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

© 2021 Beuth Verlag GmbH
Berlin · Wien · Zürich

Am DIN-Platz
Burggrafenstraße 6
10787 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0
Telefax: +49 30 2601-1260
Internet: www.beuth.de
E-Mail: kundenservice@beuth.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

© für DIN-Normen DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden von Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Titelbild: © Pixel_B, Benutzung unter Lizenz von stock.adobe.com

Satz: Michael Krystek

Druck: Plump Druck & Medien GmbH, Rheinbreitbach

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706

ISBN 978-3-410-30773-0

ISBN (E-Book) 978-3-410-30774-7

Geleitwort

Schlägt man in einem Lexikon – egal ob elektronisch oder gedruckt und gebunden – das Wort „Filter“ nach, erhält man eine beeindruckend große Liste von möglichen Bedeutungen aus den unterschiedlichsten Gebieten. Übergreifend erscheint alle Bedeutungen zu verbinden, dass ideelle oder physische Objekte durch die Filterung anhand von Merkmalen sortiert und getrennt werden sollen.

Das vorliegende Buch von Dr. Krystek bezieht sich natürlich auf eine konkrete Filterung, nämlich die von geometrischen Messdaten zur Beurteilung von Werkstücken. Auch hier geht es um das Separieren, im Sinne des Trennens unterschiedlicher Informationsanteile aus gemessenen Rohdaten. Das übergeordnete Ziel dieser Filterung ist es, für die Fertigungsmesstechnik störende Komponenten aus den Messdaten herauszufiltern und auch Anteile unterschiedlicher Skalengrößen – hier im Sinne von Ortsfrequenzen – voneinander zu trennen. Das Buch ist eine überarbeitete Fassung der von Herrn Dr. Krystek im Jahre 2014 an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau eingereichten und erfolgreich verteidigten Habilitationsschrift, die wiederum aus überarbeiteten Publikationen des Autors entstand. Ergebnis ist ein umfassender Überblick über die in der Fertigungsmesstechnik verwendeten Filter wie GAUSS-Filter, Spline-Filter und Wavelets als lineare Filter, aber auch über nichtlineare, morphologische Filter.

An wen richtet sich das Buch? Vornehmlich richtet es sich zweifellos an Theoretiker und Praktiker in der dimensionellen Messtechnik und geometrischen Produktspezifikation, aber auch an Studierende und Lehrende in messtechnischen Vertiefungsrichtungen von Ingenieurstudiengängen.

Für die Leserinnen und Leser sehr erfreulich ist die Kombination aus theoretischem Hintergrund zu den Filterprinzipien und -wirkungen sowie den Eigenschaften, Problemen und Vorteilen bei der praktischen Anwendung der genannten Filter. Ergänzt wird das Buch jeweils durch eine historische Sicht und die Einordnung in die (damals) jeweils geltenden technischen Limitierungen, aber auch auf die aufeinander aufbauenden Entwicklungen. Sehr klare Skizzen von Beispielen illustrieren sehr anschaulich die zugrunde liegenden Fragestellungen der Separation der Formanteile und die Wirkung der unterschiedlichen Filter. Für Praktiker werden auch Referenzimplementierungen als getesteter, erprobter und laufzeitoptimierter C-Code angegeben, was einerseits schnelle Test und Kreuzvergleiche oder Validierungen mit eigenen Implementierungen erlaubt, aber auch wertvolle Einsichten in die Algorithmen selbst gestattet.

Ilmenau, im Juni 2021

Thomas Fröhlich

Vorwort

In den vergangenen fünfundzwanzig Jahren seit der Gründung des ISO/TC 213 *Geometrical Productspecification and -verification (GPS)* hat eine Gruppe internationaler Experten eine Reihe von Normen für geometrische Filter erarbeitet. Diese Arbeit wurde durch den dringenden Bedarf der Industrie motiviert, neue Konzepte und Methoden zu definieren, die geeignet sind, Messdaten so aufzubereiten, dass sie zur Beurteilung von Werkstücken bezüglich der Einhaltung ihrer Spezifikationen und Toleranzen geeignet sind. Dabei wurden sowohl lineare Filter, wie z. B. GAUSS-Filter, Spline-Filter und Wavelets, als auch die nichtlinearen morphologischen Filter in die Betrachtung mit einbezogen.

Die Normungsarbeit im ISO/TC 213 wurde durch die Forschungsarbeiten des Autors aktiv unterstützt. Ein Teil der dabei entstandenen Publikationen wurde in bearbeiteter Fassung reproduziert. Bei der Auswahl der Themengebieten wurde nach Möglichkeit den deutschsprachigen Publikationen der Vorzug gegeben. Englischsprachige Publikationen wurden übersetzt. Die bei der Bearbeitung im Text und in den Gleichungen festgestellten Fehler wurden korrigiert. Alle Abbildungen wurden neu erstellt und falls erforderlich korrigiert oder ergänzt.

Im ersten Teil „Allgemeiner Überblick“ wird in zwei Kapiteln eine ausführliche Zusammenfassung über den Stand der Forschung und der Normung gegeben, wobei das erste Kapitel nur eine nicht mathematische Einführung gibt, während das zweite Kapitel detailliertere Informationen enthält.

Der zweite Teil „Klassische Filterverfahren“ besteht aus zwei Kapiteln. Das erste beschäftigt sich mit einer Korrektur des früher für die Rundheitsmessung genormten phasenkorrekten 2RC-Filters, während das zweite einen schnellen Algorithmus zur Implementierung des GAUSS-Filters beschreibt. Die ebenfalls eigentlich hierher gehörende Monographie: „M. Krystek, *Die digitale Implementierung des Profilfilters nach DIN EN ISO 11562*, Beuth Verlag, Berlin, 2004“¹ wurde wegen ihres Umfangs unberücksichtigt gelassen.

Im dritten Teil „Spline-Filter“ wird in vier Kapiteln ausführlich auf die vom Autor entwickelten Spline-Filter eingegangen. Hier werden alle wesentlichen Einzelheiten dieser Filter mathematisch ausführlich behandelt.

Der letzte Teil „Einfluss der Messunsicherheit“ beschäftigt sich in zwei Kapiteln mit der Fortpflanzung der Messunsicherheit bei der Filterung von Profilen. Der Inhalt des ersten dieser beiden Kapitel ist bereits publiziert worden und behandelt das genormte GAUSS-Filter, während das zweite, bisher unveröffentlichte Kapitel, eine Verallgemeinerung des ersten Kapitels auf beliebige lineare Profilfilter darstellt.

¹ Diese Monographie gibt es auch in englischer Sprache: „M. Krystek, *The implementation of the Gaussian filter for Dimensional Metrology*, Beuth Verlag, Berlin, 2011“

VIII

Da es sich bei den Inhalten der einzelnen Kapitel überwiegend um bearbeitete Reproduktionen bereits veröffentlichter Arbeiten handelt, waren teilweise Wiederholungen gewisser Sachinhalte und Abbildungen unvermeidlich. Bei der Auswahl der Arbeiten wurde aber darauf geachtet, dass derartige Wiederholungen nicht störend wirken, sondern eher dabei helfen, das Verständnis der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kapiteln zu erleichtern und zu vertiefen.

Um dem Leser den Zugang zu den relevanten Normen zu erleichtern, wurden die zitierten Normen in allen Kapiteln auf den neuesten Stand gebracht, wobei aber fast ausschließlich die deutschen Übersetzungen berücksichtigt wurden.

Berlin, im Juni 2021

Michael Krystek

Inhaltsverzeichnis

I Allgemeiner Überblick 1

1	ISO-Filter für die Fertigungsmesstechnik	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Historische Entwicklung	4
1.3	Grenzen des GAUSS-Filter	10
1.4	Spline-Filter	17
1.5	Spline-Wavelets	22
1.6	Robuste Spline-Filter	31
1.7	Morphologische Filter	34
1.8	Skalenraum-Verfahren	44
1.9	Zusammenfassung	53
1.10	Literatur	54
2	Filterverfahren für die Formmessung	59
2.1	Einleitung	59
2.2	GAUSS-Filter	61
2.3	Spline-Filter	67
2.4	Wavelets	72
2.5	Morphologische Filter	80
2.6	Literatur	86

II Klassische Filterverfahren 89

3	Systematische Abweichungen bei der phasenkorrekten 2RC-Filterung	91
3.1	Einleitung	91
3.2	Die systematische Abweichung	92
3.3	Abweichung der Übertragungsfunktion	95
3.4	Korrektur der systematischen Abweichung	98
3.5	Literatur	99

4	Ein schneller GAUSS-Filteralgorithmus für die Rauheitsmessung	101
4.1	Einleitung	101
4.2	Der Algorithmus	103
4.3	Implementierung des Algorithmus	104
4.4	Beispiel	105
4.5	Literatur	107

III Spline-Filter **109**

5	Anwendung von Spline-Filtern in der Oberflächenmesstechnik	111
5.1	Spline-Filter	111
5.2	Robuste Spline-Filter	115
5.3	Zusammenfassung	118
5.4	Literatur	119
6	Formfilterung durch Splines	121
6.1	Einleitung	121
6.2	Natürliche kubische Splines	124
6.3	Numerische Behandlung	127
6.4	Beispiele	131
6.5	Literatur	134
7	Anwendung diskreter L-Spline-Filter in der Rundheitsmessung	135
7.1	Einleitung	135
7.2	Diskrete periodische L-Splines	138
7.3	Übertragungsfunktionen	140
7.4	Approximation des 2RC-Filter	142
7.5	Numerische Behandlung	144
7.6	Beispiel	147
7.7	Zusammenfassung	148
7.8	Anhang	149
7.9	Literatur	150
8	Übertragungsfunktionen von Spline-Filtern	151
8.1	Einleitung	151
8.2	Diskrete periodische Polynom-Splines	152
8.3	Übertragungsfunktionen	154
8.4	Impulsantwortfunktion	156

8.5	Beispiel	157
8.6	Literatur	159

IV Einfluss der Messunsicherheit 161

9	Einfluss des Wellenfilters auf die Unsicherheit eines Messergebnisses	163
9.1	Einleitung	163
9.2	GAUSS-Filter	164
9.3	Erwartungswert, Unsicherheit und Korrelation	165
9.4	Anwendung	169
9.5	Literatur	171
10	Fortpflanzung der Messunsicherheit durch lineare Profilfilter	173
10.1	Einleitung	173
10.2	Der Filterprozess	174
10.3	Erwartungswert und Messunsicherheit	175
10.4	Das genormte GAUSS-Filter	179
10.5	Matrixdarstellung	181
10.6	Spline-Filter	182
10.7	Literatur	183

11 Liste der verwendeten Publikationen 185

Teil I

Allgemeiner Überblick

1 ISO-Filter für die Fertigungsmesstechnik

Filter werden in der Fertigungsmesstechnik dazu verwendet, um störende Komponenten in den Messdaten zu unterdrücken, um bei taktilen Messungen die angestastete Oberfläche zu rekonstruieren oder um Anteile unterschiedlicher Skalengröße voneinander zu trennen. Der Einsatz dieser Filter umfasst dabei ein weites Gebiet, nämlich im Wesentlichen die Koordinatenmesstechnik, die Form- und Konturenmesstechnik, sowie die Oberflächenmesstechnik. In der Vergangenheit wurden in diesem Bereich fast ausschließlich die in DIN EN ISO 11562 [1] genormten GAUSS-Filter eingesetzt. Seit einigen Jahren gibt es nun aber die neue Normenreihe DIN EN ISO 16610, in der neben dem weiterhin zur Verfügung stehenden GAUSS-Filter [2] weitere Filter für den Bereich der geometrischen Produktspezifikation und -verifikation festgelegt werden. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die neuen ISO-Filter und vergleicht sie mit den früher verwendeten Filtern.

1.1 Einleitung

Die heute eingesetzten linearen Mittellinienfilter stammen historisch aus der Rauheitsmessung, wobei in den älteren Geräten noch vorhandene elektrische Filter in den computergestützten Geräten neuerer Bauart durch Digitalfilter ersetzt wurden, die zunächst die elektrischen Analogfilter simulierten, später aber in ihrem Verhalten verbessert wurden, um unerwünschte Eigenschaften der älteren Filter zu vermeiden. Mangels geeigneter Alternativen wurden die in der Rauheitsmessung eingeführten Filter auch zunehmend in der Formmessung zur Trennung der Gestaltabweichungen eingesetzt. Es zeigte sich aber sehr schnell, dass eine solche kritiklose Übertragung der Filter auf ein Gebiet, für das sie ursprünglich nicht entwickelt wurden, zu Problemen führte. Schließlich machte auch die Verwendung von Messdaten zur Bildung von Bezügen ein Umdenken bei den Erfassungs- und Filtermethoden notwendig, da die vorhandenen Verfahren im Widerspruch zur Forderung des anliegenden Elements¹ waren.

Auf der Gründungssitzung des ISO/TC 213 am 14. Juni 1996 in Paris wurde die Beratungsgruppe ISO/TC 213/AG 9, *GPS extraction techniques* (Techniken der Gewinnung von Informationen zur geometrischen Produktspezifikation und

¹ siehe dazu DIN EN ISO 1101:2017 [3]

-verifikation) eingerichtet. Ihre Aufgabe war es, neue Techniken zur Gewinnung von Oberflächen- bzw. Profilinformatoren zu erarbeiten. Der Zweck dieser Untersuchungen sollte im Einzelnen sein, das mögliche Anwendungsfeld zu bestimmen, Verbesserungen der bekannten Filterverfahren zu finden, Ergänzungen existierender Abtastverfahren zu erarbeiten und die Möglichkeiten einer Normung der neuen Verfahren aufzuzeigen. Dabei sollten die folgenden Methoden diskutiert werden: Splines, Wavelets, robuste Filterung, morphologische Filter, optimale Abtastverfahren (möglicherweise auch nicht äquidistant) und Erkennung und gegebenenfalls Beseitigung von Ausreißern. Das Ergebnis dieser inzwischen weitgehend abgeschlossenen Arbeit ist eine Reihe von Dokumenten der Normenreihe ISO 16610, die zurzeit aus vierundzwanzig Teilen² besteht. Die Arbeit an der Normenreihe ISO 16610 wird heute durch die vor einigen Jahren neu geschaffene Arbeitsgruppe ISO/TC 213/WG 15 geleistet, die als Nachfolgerin der Beratungsgruppe ISO/TC 213/AG 9 anzusehen ist und deren Arbeit fortführt, erweitert und gegebenenfalls neuen Erfordernissen anpasst. Darin zeigt sich deutlich, welchen Stellenwert die Datenerfassung und -filterung innerhalb der geometrischen Produktspezifikation und -verifikation heute hat.

Ziel der Normenreihe ISO 16610 war es, die Anwender der GPS-Normen mit neuen Verfahren vertraut zu machen, die auf modernen mathematischen Methoden und Algorithmen beruhen. Viele Gerätehersteller haben diese neuen Methoden im Laufe der Zeit zunächst als Optionen in ihre Messgerätesoftware integriert, um damit den Anwendern Gelegenheit zum Einsatz der neu geschaffenen Werkzeuge zu geben, sodass diese damit Erfahrungen sammeln konnten. Heute sind in vielen Messgeräten Implementierungen der neuen Filterverfahren für den Anwender weitestgehend verfügbar und die neuen Verfahren sind in die Normung übernommen worden.³ Einige der in ISO 16610 behandelten Methoden haben Einfluss auf die seitdem im ISO/TC 213 neu erarbeiteten Normen gehabt. Der Anwender tut also gut daran, vor den neuen Techniken nicht die Augen zu verschließen, sondern sich damit so bald wie möglich zu beschäftigen.

1.2 Historische Entwicklung

Ursprünglich stammen die linearen Profilfilter aus der Rauheitsmessung. Sie wurden und werden dort verwendet, um gemessene Profile in langwellige (niederfrequente) und kurzwellige (hochfrequente) Anteile zu zerlegen (siehe Abb. 1.1),

² Der erste Teil der Normenreihe gibt einen Überblick und beschreibt grundlegende Konzepte, zwölf Teile beschreiben Profilfilterverfahren und elf Teile beschreiben Flächenfilterverfahren.

³ Das Dokument ISO/TS 16610-32 [4] über das robuste Spline-Filter wurde bedauerlicherweise vom ISO/TC 213 im Jahre 2015 zurückgezogen und nicht in eine Norm überführt.

wobei der kurzwellige Profilanteil (in Abb. 1.1 mit $r(x)$ gekennzeichnet) als Rauheitsprofil bezeichnet wird, während der langwellige Profilanteil (in Abb. 1.1 mit $w(x)$ gekennzeichnet) Mittellinie des Profils genannt wird. Später wurden lineare Profilfilter auch in der Formmessung (z. B. in der Rundheitsmessung) eingeführt. Hier ist der interessierende kurzwellige Profilanteil in der Regel die Welligkeit und der langwellige Profilanteil die Form.

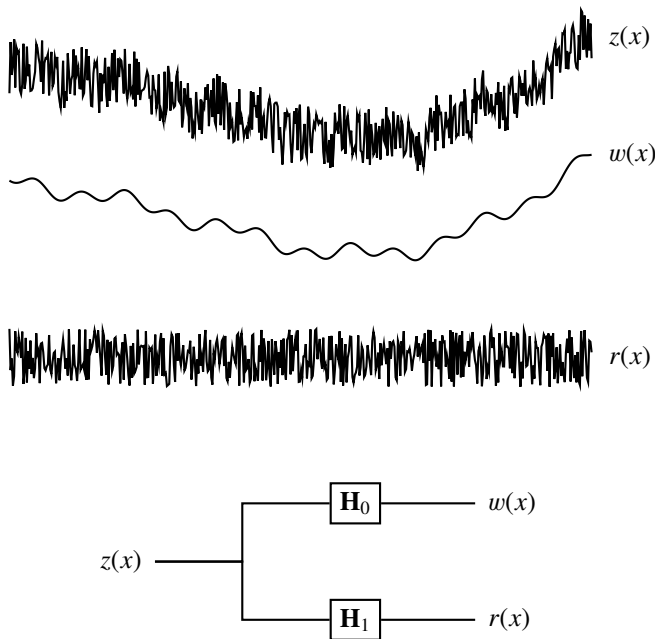


Abbildung 1.1: Zerlegung eines Primärprofils $z(x)$ durch ein Profilfilter in einen langwelligen Profilanteil $w(x)$ und einen kurzwelligen Profilanteil $r(x)$. Der durch H_0 gekennzeichnete Übertragungspfad des Filters wird als Tiefpass bezeichnet und der durch H_1 gekennzeichnete Übertragungspfad als Hochpass.

Die in der Rauheitsmessung verwendeten Profilfilter wurden erstmals in der heute nicht mehr gültigen Norm DIN 4768-1 [5] standardisiert.⁴ Die darin beschriebenen Wellenfilter waren elektrische zweistufige RC-Filter (RC-Filter sind aus Widerständen (R) und Kondensatoren (C) aufgebaute elektrische Netzwerke, die ge-

⁴ Die Norm DIN 4768-1 wurde inzwischen durch die Norm DIN EN ISO 4288-1:1998 [6] (Deutsche Fassung von EN ISO 4288:1997) ersetzt.

gebenenfalls noch Trennverstärker enthalten). Filter dieser Art führen zu erheblichen Phasenverschiebungen bei der Übertragung des gemessenen Profils (siehe Abb. 1.2), wodurch asymmetrische Profilverzerrungen auftreten, die sich auf die aus den Profilwerten berechneten Kenngrößen erheblich auswirken können.

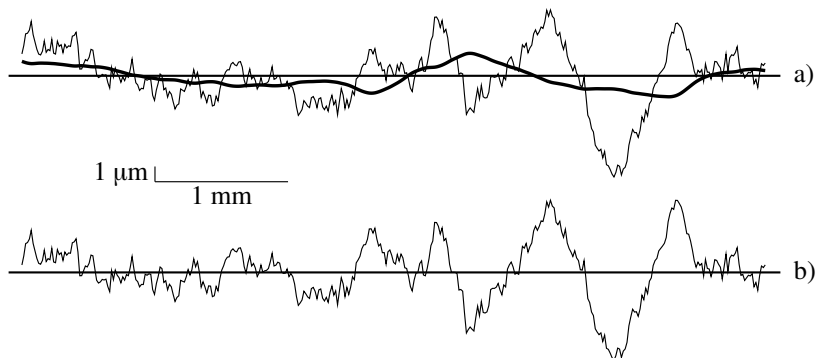


Abbildung 1.2: Beispiel für eine Filterung mit einem elektrischen 2RC-Filter ($\lambda_c = 1,6 \text{ mm}$): a) Phasenverschiebung der Mittellinie (dick) gegenüber dem ungefilterten Profil (dünn), b) Verzerrung des Rauheitsprofils.

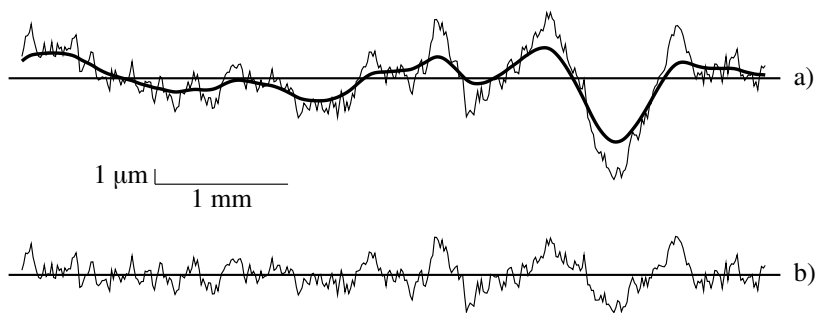


Abbildung 1.3: Beispiel für eine phasenkorrekte 2RC-Filterung ($\lambda_c = 1,6 \text{ mm}$): a) Mittellinie (dick) und ungefiltertes Profil (dünn), b) Rauheitsprofil.

Der Einfluss dieser Profilverzerrungen war zwar bei den Rauheitskenngrößen R_a , R_z und $R_{\max}$ im Allgemeinen vernachlässigbar, solange die in der Norm DIN 4768-1 empfohlenen Grenzwellenlängen (cut-offs, λ_c) angewendet wurden, für die Messung anderer Rauheitskenngrößen und für die Welligkeitsmessung war die Profilverzerrung jedoch nicht hinnehmbar. Daraus folgte, dass das elektrische RC-Filter

durch ein sogenanntes phasenkorrektes Filter ersetzt werden musste, das keine Phasenverschiebungen mehr verursacht, sodass beim Filtern auch keine Profilverzerrungen mehr auftreten.

Der erste Ansatz für ein phasenkorrektes Profilfilter war das sogenannte phasenkorrekte 2RC-Filter. Dieses Digitalfilter wurde dadurch erhalten, dass man die einseitige Gewichtsfunktion des elektrischen RC-Filters an der Ordinate spiegelte, wodurch die Gewichtsfunktion symmetrisch wurde. In der Theorie der FOURIER-Transformationen wird gezeigt, dass für symmetrische Gewichtsfunktionen keine Phasenverschiebung auftreten kann. Somit hatte das neue Filter die gewünschte Eigenschaft, ohne allzu sehr von der analogen Filterfunktion abzuweichen. In der Abb. 1.3 ist gezeigt, dass die vorher aufgetretenen Profilverzerrungen durch diese Änderung behoben werden konnten. Die Mittellinie ist mit dem gemessenen Profil in Phase und das resultierende Rauheitsprofil ist unverfälscht.

Das phasenkorrekte 2RC-Filter lässt sich mit analogen Methoden, d. h. mittels elektrischer Netzwerke, nicht realisieren, da es nicht kausal ist. Eine digitale Implementierung dieses Filters war also erst möglich, nachdem die Messgeräte mit digitalen Prozessoren ausgestattet werden konnten.

Das phasenkorrekte 2RC-Filter fand neben seiner Verwendung in der Rauheitsmessung auch sehr schnell Eingang in die Normung für die Rundheitsmessung (siehe DIN ISO 4291:1987 [7] und DIN ISO 6318:1987 [8]).⁵ Als diese Normen noch gültig waren, sollte in der Rundheitsmessung eigentlich immer noch das phasenkorrekte 2RC-Filter verwendet werden. Die industrielle Praxis ist aber schon damals davon abgewichen und benutzte statt dessen das GAUSS-Filter nach DIN EN ISO 11562:1998 [1].⁶ Der Name dieses Filters kommt daher, dass als Gewichtsfunktion die glockenförmige GAUSS-Funktion gewählt wurde.

Das GAUSS-Filter wurde erstmals im Mai 1990 in DIN 4777 genormt. Diese Norm basierte auf dem seinerzeit vorliegenden Beratungsergebnis der zuständigen ISO-Arbeitsgruppe ISO/TC57/SC1. Die Herausgabe eines entsprechenden ISO-Norm-Entwurfes verzögerte sich jedoch aus organisatorischen Gründen, sodass auf nationaler Ebene die Veröffentlichung einer DIN-Norm beschlossen wurde, um den gerätetechnisch längst vollzogenen Wandel von den elektrischen RC-Filtern zum phasenkorrekten GAUSS-Filter auch in der Normung festzuschreiben. Im Jahre 1996 erschien dann schließlich die entsprechende internationale Norm ISO 11562:1996. Dieser folgte 1997 die europäische Fassung EN ISO 11562:1997 und im April 1998 die deutsche Norm DIN EN ISO 11562:1998, welche die Norm DIN 4777 schließ-

⁵ Die Normen DIN ISO 4291:1987 und DIN ISO 6318:1987 sind heute nicht mehr gültig. Sie wurden durch die Normen DIN EN ISO 12181-1 [9] und DIN EN ISO 12181-2 [10] ersetzt.

⁶ Die Norm DIN EN ISO 11562:1998 ist heute nicht mehr gültig. Sie wurde inzwischen durch die Norm DIN EN ISO 16610-21 [2] ersetzt.

lich ersetzte. Im September 1998 erschien noch eine korrigierte Fassung, die eine Formel berichtigte.

Der Inhalt der Norm DIN EN ISO 11562:1998 war praktisch mit dem Inhalt der nationalen Norm DIN 4777:1990 identisch, bis auf die neu aufgenommenen Anhänge. Außerdem wurden die Abschnitte 1 bis 4 dem neuesten Stand der ISO-Normung angepasst und redaktionell überarbeitet, ohne jedoch den technischen Inhalt der Festlegung des phasenkorrekten Filters zu verändern.

Bei der Erarbeitung der Norm ISO 11562 wurden die folgenden Gesichtspunkte berücksichtigt:

1. Die bei den früheren elektrischen zweistufigen RC-Filtern auftretenden Phasenverschiebungen führten insbesondere bei den durch moderne Fertigungsverfahren hergestellten Oberflächen, wie z. B. plateauartige Oberflächen mit Riefen zur Aufnahme von Schmierstoffen, zu Messwertverfälschungen aufgrund der auftretenden Profilverzerrungen. Das neue Filter sollte daher phasenkorrekt sein, um die Profilwiedergabe deutlich zu verbessern. Da sich derartige Filter nicht durch elektrische Schaltkreise realisieren lassen, war die Umstellung auf eine rechnergestützte digitale Messdatenverarbeitung unumgänglich.
2. Die Filtercharakteristiken für das Tiefpassfilter (zur Unterdrückung kurzer Wellenlängen) und das Hochpassfilter (zur Unterdrückung langer Wellenlängen) sind zueinander komplementär, d. h., sie ergänzen sich zu eins. Daher war es sinnvoll, die Grenzwellenlänge so zu definieren, dass die Amplitude einer Sinuswelle gleicher Wellenlänge gerade durch beide Filter zu jeweils 50 % übertragen wird (bei den elektrischen RC-Filtern war die Grenzwellenlänge noch so definiert, dass die Amplitude einer Sinuswelle gleicher Wellenlänge durch das Tiefpassfilter zu 75 % übertragen wurde).
3. Das neue Filter sollte mit den in früheren nationalen und internationalen Normen festgelegten zweistufigen elektrischen RC-Filtern insoweit kompatibel sein, dass innerhalb der natürlichen Streuung von Rauheitsmesswerten (diese betragen üblicherweise einige Prozent) vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können.

Die genannten Bedingungen wurden durch das in der Norm festgelegte GAUSS-Filter erfüllt. Wegen seiner symmetrischen Gewichtsfunktion ist dieses Filter ebenfalls ein phasenkorrektes Filter. Die Abb. 1.4 zeigt daher erwartungsgemäß, dass mit dem GAUSS-Filter vergleichbare Ergebnisse zu denen bei der Verwendung des phasenkorrekten 2RC-Filters erhalten werden konnten.