

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik



**Verbesserung des Ortsfrequenzfilterverfahrens zur  
kamerabasierten Messung der translatorischen  
Geschwindigkeit bewegter Objekte**

DISSERTATION

zur  
Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von  
ARNO BERGMANN  
Gelsenkirchen

Bochum, 31. Mai 2010

Dissertation eingereicht:  
Referent:  
Korreferent:  
Tag der mündlichen Prüfung:

31. Mai 2010  
Prof. Dr.-Ing. H. G. Göckler  
Prof. Dr.-Ing. G. Schmitz  
25. Oktober 2010

Schriftenreihe Digitale Signalverarbeitung

Band 6

**Arno Bergmann**

**Verbesserung des Ortsfrequenzfilterverfahrens  
zur kamerabasierten Messung der translatorischen  
Geschwindigkeit bewegter Objekte**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9698-8

ISSN 1617-2221

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit innerhalb des Förderprojektes „Entwicklung eines miniaturisierten optischen Sensors für die industrielle Messung von Längen und Geschwindigkeiten.“ bei der INTACTON GmbH in Dortmund und Köln sowie der nachfolgenden Promotion, betreut durch Herrn Professor Göckler von der Arbeitsgruppe Digitale Signalverarbeitung am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Mein Dank gilt Herrn Professor H. G. Göckler für seine Bereitschaft zu dem Wagnis und den Mühen dieses Projektes, für offene und ehrliche Rückmeldungen und angenehme persönliche Gespräche. Ich denke, durch diese Zusammenarbeit wichtige Dinge gelernt zu haben.

Herrn Professor Georg Schmitz vom Lehrstuhl für Medizintechnik der Ruhr-Universität Bochum danke ich für die Übernahme des Korreferats, wichtige fachliche Hinweise und seinen fördernden Zuspruch.

Meinen Kollegen von der INTACTON GmbH danke ich für eine spannende Zeit, insbesondere Herrn Doktor Siegfried Wienecke und Herrn Doktor Ingo Mönch, die mich in zahlreichen Diskussionen zu meiner Arbeit moralisch und inhaltlich unterstützt haben. Herrn Dipl.-Ing. Marcus Staszewski danke ich für lange Gespräche auf ungezählten Autofahrten und seine schnelle und gleichzeitig sorgfältige Durchsicht der finalen Version.

Für wertvolle Beiträge in meinem privaten Umfeld bin ich Herrn Doktor F.-J. Reich sowie Herrn Doktor Bernhard Brendel ausgesprochen verbunden.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Diplomanden Dipl.-Ing. Christian Jak-schies und Dipl.-Ing. Benjamin Degener für angenehme Zusammenarbeit, gute Leistungen und wichtige Ergebnisse bedanken.

Herrn Dipl.-Ing. Peter Meyer vom Ingenieurbüro Peter Meyer danke ich neben einer hervorragenden Umsetzung einer Ortsfrequenzfilterbank für wertvolle Hinweise zur Implementierung und viele gemeinsamen Stunden im Labor.

Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern Dagmar und Rolf, meiner Lebensgefährtin Susanne und meiner Tochter Franziska für die liebevolle Unterstützung vor, während und nach dieser Promotion, ohne die es auch diese Arbeit nicht gegeben hätte.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Notation</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Messaufgabe . . . . .	1
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik . . . . .	2
1.3 Ziel der vorliegenden Arbeit . . . . .	5
1.4 Aufbau und Gliederung der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Das Ortsfrequenzfilterverfahren</b>	<b>7</b>
2.1 Einführung in das Ortsfrequenzfilterverfahren . . . . .	7
2.2 Darstellung der Ortsfrequenzfilterung im Ortsfrequenzraum . . . . .	11
2.2.1 Eigenschaften des Ortsfrequenzfilters . . . . .	16
2.2.2 Einfluss des Transmissionsverlaufs des Ortsfrequenzfilters . . . . .	19
2.2.3 Ortsfrequenzfiltersystem mit digitaler Zeilenkamera . . . . .	28
2.2.4 Örtlich diskretisiertes Ortsfrequenzfilter . . . . .	29
2.2.5 Fensterung des Ortsfrequenzfilters . . . . .	33
2.3 Richtungserkennung und Stillstandsmessung . . . . .	40
2.4 Zusammenfassung . . . . .	41
<b>3 Ein verbesserter Auswertalgorithmus für Ortsfrequenzfiltersignale</b>	<b>43</b>
3.1 Teilprobleme der Geschwindigkeitsmessung mit Ortsfrequenzfiltersystemen . . . . .	43
3.2 Auswahl eines Verfahrens zur Frequenzschätzung . . . . .	49
3.2.1 Drehzeigerverfahren . . . . .	49
3.2.2 Frequenzschätzung im Zeit- und im Frequenzbereich . . . . .	50
3.2.2.1 Spektralanalyse . . . . .	50
3.2.2.2 Autokorrelationsanalyse . . . . .	57
3.3 Grob-Fein Auswertung zur Anpassung der Messwertauflösung („Coarse2Fine“ Algorithmus) . . . . .	62
3.4 Ergänzung des Ortsfrequenzfilterverfahrens durch Kreuzkorrelation . . . . .	69
3.5 Zusammenfassung . . . . .	72

<b>4</b>	<b>Implementierung des Ortsfrequenzfilter-Algorithmus auf einer DSP/FPGA Plattform</b>	<b>73</b>
4.1	Systemarchitektur . . . . .	74
4.2	Implementierungsstrategie . . . . .	75
4.3	Implementiertes Ortsfrequenzfiltersystem . . . . .	77
<b>5</b>	<b>Teststrategie und Systemtests für Modell und folgende beispielhafte Implementierung</b>	<b>81</b>
5.1	Tests anhand von Framegrabber-Aufnahmen . . . . .	82
5.2	Textursynthese . . . . .	85
5.3	Erstellung einer automatischen Testumgebung . . . . .	88
5.3.1	Teststrategie: Systematische Äquivalenzklassenbildung durch Ursachen-Wirkungs-Analyse . . . . .	89
5.3.2	Beispielhafte Simulationsergebnisse mit automatischem Testfeld	93
5.4	Beispielhafter Einsatz des Systems . . . . .	97
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
6.1	Ausblick . . . . .	105
<b>A</b>	<b>Übertragungsfunktion eines Ortsfrequenzfilters</b>	<b>107</b>
<b>B</b>	<b>Übertragungsfunktionen unterschiedlicher Transmissionsfunktionen</b>	<b>110</b>
B.1	Ortsfrequenzfilterfunktionen mit rechteckförmigem Transmissionsverlauf . . . . .	110
B.1.1	Einfaches Rechteckfilter . . . . .	110
B.1.2	Differentielles Rechteckfilter . . . . .	111
B.2	Ortsfrequenzfilterfunktionen mit sinusförmigem Transmissionsverlauf	112
B.2.1	Einfaches Sinusfilter . . . . .	112
B.2.2	Differentielles Sinusfilter . . . . .	116
B.2.3	Alternative Herleitung des Differentiellen Sinusfilters . . . . .	116
B.2.4	Örtlich abgestuftes differentielles Sinusfilter . . . . .	119
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>122</b>

## Abkürzungen und Notation

### Abkürzungen

ADC	Analog-Digital Converter
AKF	Autokorrelationsfunktion
ASIC	Application Specific Integrated Circuit, kundenspezifische integrierte Schaltung
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DFT	Diskrete Fourier Transformation
DSP	Digitaler Signalprozessor
FFT	Fast Fourier Transformation, Schnelle Fourier Transformation
FPGA	Field Programmable Gate Array, Programmierbarer Logikbaustein
IDE	Integrated Development Environment
LCD	Liquid Crystal Display
LDV	Laser Doppler Velocimetrie (häufig auch: LDA, Laser Doppler Anemometrie)
SFDR	Störungsfreier Dynamikbereich (Spurious Free Dynamic Range)
SFV	Spatial Filter Velocimetry, Ortsfrequenzfilterverfahren
SINAD	Signal to Interference Ratio including Noise and Distortion, Verhältnis von allgemeiner Signalleistung zu Rauschleistung und Leistung nichtlinearer Verzerrungen, Störabstand
STD	Standardabweichung (Standard Deviation)
Xcorr	Kreuzkorrelation

### Notation

$a(t)$	Beschleunigung
$\delta(t)$	Dirac-Impuls
E	Erwartungswertoperator

$f$	Frequenz
$f_0$	Grundfrequenz eines Signals
$f_F$	Bildaufnahmefrequenz, Framerate
$g(t)$	Ortsfilterfunktion
$H(\mu, \nu)$	Fouriertransformierte der Transmissionsfunktion des Ortsfrequenzfilters
$h(x, y)$	Transmissionsfunktion des Ortsfrequenzfilters
$M$	optischer Abbildungsmaßstab
$m$	Anzahl der zur Darstellung einer Ortsfilterperiode $p$ verwendeten Pixel
$\mu$	Ortsfrequenz zu Ortskoordinate $x$
$N$	Anzahl der Abtastwerte eines Signals
$n$	Anzahl der Perioden eines Ortsfrequenzfilters
$\nu$	Ortsfrequenz zu Ortskoordinate $y$
$P$	Leistung
$p$	Periodenlänge (pitch) einer Ortsfrequenzfilterperiode
$R_x$	Autokorrelation der Funktion $x(t)$
$s(x, y)$	Bestrahlungsstärkeverteilung auf dem Ortsfrequenzfilter
$T$	Periodendauer einer Grundschiwingung eines Signals
$\tau_T$	Transitzeit
$T_F$	Bildaufnahmezeit, Framezeit $T_F = \frac{1}{f_F}$
$v(t)$	Geschwindigkeit
$w$	Breite eines durchlässigen Segmentes des Ortsfilters
$X$	Ausdehnung des Ortsfrequenzfilters in $x$ -Richtung
$x$	Ortskoordinate
$x_r$	Ortsverschiebung in $x$ -Richtung (Relocation)
$Y$	Ausdehnung des Ortsfrequenzfilters in $y$ -Richtung
$y$	Ortskoordinate

*Abkürzungen und Notation*

$y_r$	Ortsverschiebung in $y$ -Richtung (Relocation)
$z$	Ortskoordinate

Funktionen werden im Originalbereich durch Kleinbuchstaben dargestellt, die zugehörigen Funktionen im Bildbereich im Regelfall mit den entsprechenden Großbuchstaben. Ausnahmen stellen typische Formelzeichenvereinbarungen, wie beispielsweise  $P$  für die Leistung, dar.

Die in dieser Dissertation vorgestellten Ergebnisse sind Teil eines Förderprojektes des „NRW / EU-Ziel 2-Programms 2000-2006 “ mit dem Titel:

„Entwicklung eines miniaturisierten optischen Sensors für die industrielle Messung von Längen und Geschwindigkeiten.“ (PTJ-Aktenzeichen: Z0305MW02)



**Abbildung 0.1:** Europäisches Emblem (Wikipedia)

Die Förderung erfolgte durch die Europäische Union und wurde durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklungen (EFRE) kofinanziert.

Die Durchführung des Projektes erfolgte unter Leitung der INTACTON GmbH in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Mikrostrukturtechnik (AGMST) der Universität Dortmund.