

Holger Nobach

Gegen Wavelets & Co.

**Vorteile klassischer Signal- und
Datenverarbeitungsverfahren in der
optischen Strömungsmesstechnik**

Habilitationsschrift

Fachbereich Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt

Diese Arbeit ist entstanden am

Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik, Darmstadt

sowie an der

Cornell University, Ithaca, New York State, USA

Messtechnik und Sensorik

Holger Nobach

Gegen Wavelets & Co.

**Vorteile klassischer Signal- und
Datenverarbeitungsverfahren in der
optischen Strömungsmesstechnik**

D 17 (Habil.-Schr. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Habil.-Schr., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6564-9

ISSN 1610-4773

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meinen Sohn Mikkel

Übersicht

Die statistische Analyse stochastischer Prozesse ist, mit dem Ziel, Korrelationsfunktionen und Leistungsdichtespektren zu bestimmen, fest in der Hand der Fourier-Transformation. Doch sobald zeitlich lokalisierte Signale mit gewissen Modulationsfrequenzen auftreten, muss man mit der Frage rechnen, ob nicht evtl. auch die Wavelet-Transformation als Alternative verwendet werden könne, selbst wenn das vorhandene Verfahren bereits effizient und robust arbeitet.

Das Problem der Bildrekonstruktion aus einem Verlust behaftet komprimierten Datenstrom ist ein sehr aktuelles Beispiel *für* die Anwendung der Wavelet-Transformation, die bei gleichem Datenaufkommen ein ansprechenderes Bild wiederzugeben vermag als z. B. die Kosinus-Transformation. Auch beim Verfolgen von zeitlich veränderlichen Modulationsfrequenzen ist die Wavelet-Transformation sehr verbreitet.

Die sichtbaren Erfolge und die Anschaulichkeit der Wavelet-Transformation erwecken schnell den Eindruck eines idealen Universalwerkzeuges der Signalverarbeitung. Doch sind die *schnellen* Erfolge auch mit ausreichender Zuverlässigkeit und Präzision vereinbar?

An ausgewählten Fallbeispielen der Signal- und Bildrekonstruktion sowie der statistischen Datenanalyse vorwiegend aus der optischen Strömungsmesstechnik treten die Wavelet-Transformation und weitere „moderne“ Kandidaten gegen ihre recht starren „klassischen“ Konkurrenten an. Im Mittelpunkt steht aber nicht der „schönste“ Kurvenverlauf, sondern der Erhalt der Information und der statistischen Eigenschaften. Dabei wird deutlich, dass sich hieraus ganz andere Anforderungen an die Rekonstruktion ergeben als eine „optisch“ ansprechende Kurve.

Vorwort

Das Verstehen unserer Umgebung hängt in zunehmendem Maße von geeigneter Messtechnik ab, die den Zugang zu den physikalischen Messgrößen schafft. Doch erst die Verarbeitung und Analyse der Messdaten ermöglichen deren Interpretation und das Erkennen von neuen Zusammenhängen. Die Verarbeitung von experimentellen Messdaten erfolgt dabei immer mit dem Ziel, Erkenntnisse über den betrachteten Prozess zu gewinnen.

Die Analyse der reinen Messdaten ist dafür nicht ausreichend, denn jedes Messverfahren erlaubt nur einen „gefilterten Blick“ auf die primär interessierende Messgröße. Bei der Analyse der Messdaten muss deshalb immer auch der Einfluss des Messverfahrens auf die statistischen Eigenschaften des Datensatzes gegenüber den Eigenschaften des betrachteten Prozesses berücksichtigt werden.

Genau das war Gegenstand meiner Tätigkeit in den vergangenen Jahren, in denen ich mich mit der Signal- und Datenverarbeitung in der Laser-Doppler-Anemometrie und mit der Bildverarbeitung der Particle Image Velocimetry befasst habe. Mein erklärtes Ziel war immer, systematische Fehler zu vermeiden und zufällige Fehler zu minimieren, also erwartungstreue und effiziente Schätzer zu finden. In dieser Arbeit sind nun einige grundlegende Erkenntnisse zusammengefasst.

Ich möchte allen danken, die mich bei der Vorbereitung und Fertigstellung dieser Arbeit in vielfältiger Weise unterstützt haben. Die Diskussionen mit meinen wissenschaftlichen Partnern waren sowohl anregend als auch gewinnbringend. Besonders danken möchte ich meinen Wegbereitern Prof. Albrecht, Dr. Fuchs, Frau Prof. Müller, Prof. Tropea und Prof. Bodenschatz. Außerdem möchte ich mich ganz herzlich für die Unterstützung durch meine Familie bedanken.

Kleines Randproblem

Spiegel haben den Ruf, Dinge seitenverkehrt darzustellen. Jeder kennt das Problem, geschriebenen Text in „fliribölögisiq?“ zu lesen, bei der *rechts* und *links* vertauscht sind.

Wieso vertauscht ein Spiegel aber gerade *rechts* und *links* und nicht *oben* und *unten*? Woher „weiß“ ein Spiegel, welche Richtungen er zu vertauschen hat, oder was zeichnet die Richtungen *rechts* und *links* gegenüber *oben* und *unten* aus?

Inhaltsverzeichnis

Übersicht	VII
Vorwort	IX
Kleines Randproblem	XI
Abkürzungen und Formelzeichen	XV
1 Einleitung	1
2 Die Kandidaten	7
2.1 Fourier-Transformation	7
2.2 Wavelet-Transformation	9
2.3 Hilbert-Transformation	12
2.4 Quadratursignalanalyse	13
2.5 Lokale Frequenzschätzung	14
2.6 Sample-and-Hold-Rekonstruktion	14
2.7 Whittaker-Rekonstruktion	15
2.8 Spline-Interpolation	16
2.9 Slotkorrelation	16
2.10 ARMA-Modell	17
2.11 Fensterfunktionen	18
2.12 Fraktale	21
2.13 Weitere Kandidaten	21
3 Die Fälle	23
3.1 LDA-Signalanalyse	31
3.1.1 Frequenzbestimmung	31
3.1.2 Frequenzgradient	37
3.2 Zeitreihen-Interpolation und Wiederabtastung	62
3.2.1 Äquidistante Datensätze	63
3.2.2 Nicht äquidistante Datensätze	72
3.3 Modellbasierte Analyse von LDA-Datensätzen	92
3.4 Fensterfunktionen	100
3.5 Bildinterpolation und Wiederabtastung	102
3.5.1 Bestimmung der Teilchenposition	102
3.5.2 Korrelationsbasierte Bestimmung der Teilchenverschiebung	115
3.6 Dyadische Transformation und Rekonstruktion	132

Inhaltsverzeichnis

4 Konsequenzen und Schluss	139
Literaturverzeichnis	143