

KONZEPTE FÜR DIE HOCHAUFLÖSENDE
BLUTFLUSSABBILDUNG MIT
HOCHFREQUENTEM ULTRASCHALL

DISSERTATION

zur
Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs
der
Fakultät für Elektrotechnik
und Informationstechnik
an der Ruhr-Universität Bochum

von
Michael Vogt
Hagen-Haspe

Bochum 2000

Dissertation eingereicht am: 17.05.2000
Tag der mündlichen Prüfung: 11.07.2000
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Ermert
Prof. Dr.-Ing. Werner von Seelen

Bochumer Berichte aus der Biomedizinischen Technik



Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. H. Ermert und Prof. Dr.-Ing. J. Werner

Michael Vogt

Konzepte für die hochauflösende Blutflußabbildung mit hochfrequentem Ultraschall

Aachen 2001

SHAKER
VERLAG

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Vogt, Michael:

Konzepte für die hochauflösende Blutflußabbildung
mit hochfrequentem Ultraschall/Michael Vogt.

Aachen: Shaker, 2001

(Bochumer Berichte aus der Biomedizinischen Technik)

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-9068-6

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9068-6

ISSN 1432-8569

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

Liste häufig verwendeter Formelzeichen	IV
1 Einführung	1
1.1 Ultraschall in der medizinischen Diagnostik	1
1.2 Abbildung der Haut mit hochfrequentem Ultraschall	3
1.3 Kutane Mikrozirkulation	4
1.4 Blutflußabbildung in der Haut mit hochfrequentem Ultraschall	5
1.5 Vorschau auf nachfolgende Kapitel	6
2 Modellbildung für die Ausbreitung von Ultraschall im Gewebe und Blut	9
2.1 Systemtheoretische Beschreibung von Schallausbreitung und Rückstreuung	9
2.1.1 Geometrie des Abbildungsproblems	9
2.1.2 Rückstreuung an einem einzelnen Streuer	12
2.1.3 Modellierung und Optimierung der Systemantwort	22
2.1.4 Rückstreuung an Formationen von Streuern	25
2.1.5 Absorption und Streuung	32
2.2 Strömungsmechanik in Blutgefäßen	36
2.3 Zusammenfassung	38
3 Ultraschallabbildungsverfahren für die Gewebe- und Blutflußabbildung	39
3.1 Ultraschallabbildung als Problem der Systemidentifikation	39
3.2 Puls-Echo-Verfahren	40
3.3 Dauerstrich-Doppler-Verfahren	44
3.4 Pulskompressions- und FMCW-Verfahren	52
3.5 Puls-Doppler-Verfahren	59
3.5.1 Nichtsynchronisiertes System mit kohärentem Träger	63
3.5.2 Synchronisiertes System mit kohärentem Träger	70
3.5.3 System mit inkohärentem Träger	76
3.6 Zusammenfassung	84

4	Konzepte für die Blutflußabbildung	85
4.1	Ortsaufgelöste Blutflußabbildung	85
4.2	Simulationen	87
4.3	Qualitative Blutflußabbildung	91
4.3.1	Wandfilterung	91
4.3.2	Kompensation von Bewegungsartefakten	94
4.4	Schätzung der axialen Geschwindigkeitskomponente	95
4.4.1	Frequenzbereichsanalyse	97
4.4.2	Zeitbereichsanalyse	101
4.4.3	Kombinierte Zeit- und Frequenzbereichsanalyse	103
4.5	Schätzung der transversalen Geschwindigkeitskomponente	105
4.6	Simulationsauswertung	107
4.7	Zusammenfassung	116
5	Realisierung eines hochfrequenten Ultraschallabbildungssystems	117
5.1	Realisierungskonzepte und Systemanforderungen	117
5.1.1	Bildgebung mit einem Einzelelementschallwandler	118
5.1.2	Sendesignalerzeugung und Echosignalabtastung	120
5.1.3	Elektrische Anpassung des Schallwandlers	125
5.1.4	Pulskompressionsfilter	126
5.2	Blockschaltbild des realisierten Systems	128
5.3	Abbildungseigenschaften des realisierten Systems	130
5.3.1	Analyse der Systemantwort	130
5.3.2	Analyse der Schallstrahlcharakteristik	134
5.4	Applikator und Meßaufbau	136
5.5	Zusammenfassung	136
6	Messungen	139
6.1	Messungen an Gewebe- und Flußphantomen	139
6.1.1	Referenzmessungen an Gewebe- und Flußphantomen	139
6.1.2	Puls-Echo-Messungen an Specklephantomen	143
6.1.3	Puls-Doppler-Messungen an künstlichen Gefäßen	145
6.2	Messungen in vivo	155
6.3	Zusammenfassung	159

7 Zusammenfassung und Ausblick	161
Anhang	165
A.1 Einfluß von Gewebedämpfung und Rückstreuung auf die Punktübertragungsfunktion	165
A.2 Pulskompression linear frequenzmodulierter Signale	166
A.3 Linearphasige FIR-Wandfilter	167
A.4 Kleinste-Quadrate-Schätzung der Punktübertragungsfunktion	168
Literaturverzeichnis	171
Danksagung	181
Lebenslauf	183

Liste häufig verwendeter Formelzeichen

Nomenklatur

$x(t)$	Kleinbuchstaben	Signal im Zeitbereich
$X(j\omega)$	Großbuchstaben	Signal im Frequenzbereich
$x_+(t)$	Index +	Analytisches Signal im Zeitbereich
$X_+(j\omega)$	Index +	Analytisches Signal im Frequenzbereich
$\tilde{x}(n)$	Tilde	Zeitdiskretes Signal im Zeitbereich
$\tilde{X}(j\omega_k)$	Tilde	Zeitdiskretes Signal im Frequenzbereich
\vec{r}	Vektorpfeil	Vektor
\bar{x}	Überstrich	Mittelwert
$\dot{x}(t)$	Überpunkt	Zeitliche Ableitung

Griechische Buchstaben

α	Einstrahlwinkel
γ	Öffnungswinkel sphärisch fokussierter Schallwandler
δ_R	Transversale Ortsauflösung (−6 dB), Halbwertsbreite der Punktbildfunktion, Maß für die transversale Ortsauflösung
δ'_R	Transversale Ortsauflösung (−40 dB)
δt	Beobachtungszeit
δv_z	Axiale Geschwindigkeitsauflösung (−6 dB), Halbwertsbreite der Punktbildfunktion, Maß für die axiale Geschwindigkeitsauflösung
δv_{zmin}	Minimale axiale Geschwindigkeitsauflösung
δ_z	Axiale Ortsauflösung (−6 dB), Halbwertsbreite der Punktbildfunktion, Maß für die axiale Ortsauflösung
δ_{zmin}	Minimale axiale Ortsauflösung
λ	Wellenlänge
λ_0	Wellenlänge bei Mittenfrequenz
μ	Viskosität
$\mu(f), \mu'(f)$	Absorptionskoeffizient
$\mu_{x_E x_E}(t)$	Autokovarianzfunktion Echosignal
$\mu_{ x_{E+} x_{E+} }(t)$	Autokovarianzfunktion Hüllkurve Echosignal
$\mu_{ x_{E+} ^2 x_{E+} ^2}(t)$	Autokovarianzfunktion Echosignalintensität
ρ	Dichte
τ_1	Schalllaufzeit zwischen Schallwandler und Streuer
τ_2	Schalllaufzeit zwischen Streuer und Schallwandler
$\varphi_E(t)$	Momentanphase Echosignal
$\varphi_S(t)$	Momentanphase Sendesignal
$\varphi'_S(t)$	Momentanphase virtuelles Sendesignal
φ_0	Nullphasenwinkel
ω	Kreisfrequenz

$\omega(t)$	Momentankreisfrequenz
ω_d	Dopplerkreisfrequenz
ω_n	Normierte Kreisfrequenz
ω_{prf}	Pulswiederholkreisfrequenz
ω'_{prf}	Dopplerverschobene Pulswiederholkreisfrequenz
ω_1, ω_2	Bandgrenzen, Eckkreisfrequenzen
$\Delta a_{dB}(f)$	Dämpfungsänderung Verkleinerung Wasserstrecke
Δt_{mikro}	Auswanderung auf Mikrozeitachse
Δt_p	Pulsdauer
$\Delta t_{PK}(f_d)$	Zeitverschiebung Ausgangssignal Pulscompressionsfilter
Δz	Axiale Positionsänderung
$\Delta \omega_d$	Breite Dopplerspektrum

Lateinische Buchstaben

Variablen

a, a_1, a_2	Zeitliche Skalierungsfaktoren Schallausbreitung
$a_{Np}(f), a_{dB}(f)$	Logarithmische Dämpfung
$a_{str}(R, z)$	Objektfunktion
c	Schallgeschwindigkeit
$c_{h_{axial}h_{axial}}(t)$	Autokorrelationsfunktion axiale Komponente Punktbildfunktion
$c_{p_{str}p_{str}}(z)$	Autokorrelationsfunktion Projektion Objektfunktion
$c_{x_E x_E}(t)$	Autokorrelationsfunktion Echosignal
$d(f)$	Dämpfungsterm
d_{axial}	Tiefenschärfe sphärisch fokussierter Schallwandler
\vec{e}_R	Einheitsvektor radiale Ortskoordinate
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	Einheitsvektoren kartesischen Ortskoordinaten
f	Frequenz
$f(t)$	Momentanfrequenz
f_a	Abtastfrequenz Transientenrekorder
f_{abt}	Abtastfrequenz Spektralanalyse
f_d	Dopplerfrequenz
f_{dmax}	Maximale Dopplerverschiebung
$f_E(t)$	Momentanfrequenz Echosignal
$f_S(t)$	Momentanfrequenz Sendesignal
$f_W(t)$	Wechselanteil Momentanfrequenz Sendesignal
f_0, f_{01}, f_{02}	Mittenfrequenz
f_1, f_2	Eckfrequenzen Sendesignal
$h(t)$	Impulsantwort lineares zeitinvariantes System, Punktbildfunktion
$h'(t)$	Punktbildfunktion gefiltertes Echosignal
$h(t, t')$	Impulsantwort lineares zeitvariantes System

$\tilde{h}_{abt}(m, n)$	Punktbildfunktion demoduliertes Abtastsignal
$h_{abt}(t)$	Punktbildfunktion Abtastsignal
$h_{axial}(t, z')$	Axiale Komponente Punktbildfunktion
$h_{BP}(t)$	Impulsantwort Bandpaßfilter
$h_D(t)$	Punktbildfunktion demoduliertes Signal
$h_{Dm}(t)$	Punktbildfunktion demodulierte Abtastsignale
$h_{Dseq}(t)$	Punktbildfunktion demoduliertes sequentielles Abtastsignal
$h_{DW}(t)$	Punktbildfunktion Dopplersignal
$h_{Eseq}(t)$	Punktbildfunktion hochfrequentes sequentielles Abtastsignal
$h_{Em}(t)$	Punktbildfunktion hochfrequente Abtastsignale
$h_m(t)$	Punktbildfunktion Abtastsignale
$h_{E1}(t, t')$	Impulsantwort Schallaufzeit Streuer, Schallwandler
$h_{E2}(t, z_0)$	Impulsantwort Schallausbreitung, akustoelektrische Wandlung, Empfangselektronik
$\tilde{h}_F(n)$	Zeitdiskrete Impulsantwort Wandfilter
$h_F(t, f_d)$	Ambiguity-Funktion
$h_{inv}(t)$	Impulsantwort inverses Filter
$h_I(t)$	Punktbildfunktion Inphasenkomponente
$h_{mod}(t)$	Modell Punktbildfunktion
$h_{PK}(t)$	Impulsantwort Pulscompressionsfilter
$h_R(t)$	Impulsantwort Rückstreuung
$h_{ref}(t)$	Impulsantwort Referenzmessung
$h_{sys}(t)$	Impulsantwort Systemkomponenten
$h_{S1}(t, z_0)$	Impulsantwort, Sendeelektronik, elektroakustische Wandlung, Schallausbreitung
$h_{S2}(t, t')$	Impulsantwort Schallaufzeit Schallwandler, Streuer
$h_T(t)$	Impulsantwort Filter Trägersignalerzeugung
$h_{TF}(t)$	Impulsantwort Tiefpaßfilter
$h_{trans}(R', z')$	Transversale Komponente Punktbildfunktion
m_0	Konstanter Zeitpunkt auf Mikrozeitachse
$n(t)$	Rauschsignal
$\overline{n^2(t)}$	Rauschleistung
$p(t)$	Niederfrequentes Pulssignal
$p'(t)$	Virtuelles niederfrequentes Pulssignal
P_d	Dopplersignalleistung
$p_{MF}(t)$	Eingprägtes Signal Pulscompressionsfilter
$p_S(t)$	Bandbegrenztes Pulssignal
$p'_S(t)$	Virtuelles bandbegrenztes Pulssignal
$p_{str}(z)$	Projektion Objektfunktion
$p_0(t)$	Niederfrequentes, komplexes Pulssignal
\vec{r}'	Ortsvektor Streuerposition
\vec{r}_0	Ortsvektor Streuerposition zum Zeitpunkt $t = 0$
t	Zeit
$t_{gr}(f)$	Gruppenlaufzeit

t_{mikro}	Mikrozeit
t_{makro}	Makrozeit
t_r	Zeitpunkt, zu dem Rückstreuung erfolgt
t_0, t_{01}, t_{02}	Verzögerungen Schallausbreitung
\vec{v}	Geschwindigkeit Streuer
$v(R)$	Flußgeschwindigkeitsprofil
v_R	Transversale Geschwindigkeitskomponente Streuer
$v_{R\text{max}}$	Maximal meßbare transversale Flußgeschwindigkeit
v_x, v_y, v_z	Geschwindigkeitskomponenten Streuer in kartesischen Ortskoordinaten
v_z	Axiale Geschwindigkeitskomponente Streuer
$\hat{v}_R(m)$	Geschätzte transversale Geschwindigkeitskomponente
v_{R0}	Maximale transversale Flußgeschwindigkeit
$\hat{v}_z(m)$	Geschätzte axiale Geschwindigkeitskomponente
$v_{z\text{max}}$	Maximal meßbare axiale Flußgeschwindigkeit
v_{z0}	Maximale axiale Flußgeschwindigkeit
v_0	Maximale Flußgeschwindigkeit
$w(t)$	Fensterfunktion
x, y, z	Kartesische Ortskoordinaten
x', y', z'	Position Streuer in kartesischen Ortskoordinaten
$\tilde{x}_{\text{abt}}(m, n)$	Zeitdiskretes Abtastsignal
$x_{\text{abt}}(t)$	Abtastsignal
$x_D(t)$	Demoduliertes Signal
$x_{Dm}(t)$	Demodulierte Abtastsignale
$x_{D\text{seq}}(t)$	Demoduliertes sequentielles Abtastsignal
$x_{DW}(t)$	Gefensterteres demoduliertes Signal
$x_E(t)$	Echosignal
$x'_E(t)$	Gefiltertes Echosignal
$x_{Em}(t)$	Hochfrequente Abtastsignale
$x_{E\text{seq}}(t)$	Hochfrequentes sequentielles Abtastsignal
$\tilde{x}_F(n)$	Zeitdiskretes Eingangssignal Wandfilter
$x_F(t)$	Filterausgangssignal
$x_{\text{inv}}(t)$	Ausgangssignal inverses Filter
$x_I(t), x_Q(t)$	Inphasenkomponente, Quadraturkomponente
$x_P(t)$	Pulssignal
$x_S(t)$	Sendesignal
$x'_S(t)$	Virtuelles Sendesignal
$x_{SI}(t), x_{QI}(t)$	Inphasenkomponente, Quadraturkomponente Sendesignal
$x_T(t)$	Trägersignal
$x_{TR}(t)$	Eingangssignal Transientenrekorder
$x_v(t)$	Vorgegebenes Ausgangssignal Wellenformgenerator
$x_{WFG}(t)$	Ausgangssignal Wellenformgenerator
x_0, y_0, z_0	Position Streuer zum Zeitpunkt $t = 0$ in kartesischen Ortskoordinaten
$x_0(t)$	Niederfrequente Pulsfolge
$\tilde{y}_F(n)$	Zeitdiskretes Ausgangssignal Wandfilter

z_f	Fokuslänge sphärisch fokussierter Schallwandler
z_G	Gewebedicke
z_{max}	Eindeutigkeitsbereich
A	Gefäßquerschnitt
$A_{max}(f_d)$	Maximalamplitude Ausgangssignal Pulskompressionsfilter
B, B_1, B_2	Bandbreite (-6 dB)
$C_{nm}(j\omega)$	Leistungsdichtespektrum Rauschsignal
$C_{pstrpstr}(j\omega)$	Leistungsdichtespektrum Projektion Objektfunktion
$C_{xExE}(j\omega)$	Leistungsdichtespektrum Echosignal
D	Gefäßdurchmesser
D'	Virtueller Gefäßdurchmesser
E	Signalenergie
F	F-Zahl sphärisch fokussierter Schallwandler
$H(j\omega)$	Übertragungsfunktion lineares zeitinvariantes System Punktübertragungsfunktion
$H(j\omega, t)$	Übertragungsfunktion lineares zeitvariantes System
$H'(j\omega)$	Punktübertragungsfunktion gefiltertes Echosignal
$H_{abs}(j\omega, z)$	Übertragungsfunktion Dämpfungsterm
$H_{abt}(j\omega)$	Punktübertragungsfunktion Abtastsignal
$H_{axial}(j\omega)$	Axiale Komponente Punktübertragungsfunktion
$H_D(j\omega)$	Punktübertragungsfunktion demoduliertes Signal
$H_{DW}(j\omega)$	Punktübertragungsfunktion Dopplersignal
$\tilde{H}_F(e^{j\omega n})$	Zeitdiskrete Übertragungsfunktion Wandfilter
$H_{inv}(j\omega)$	Übertragungsfunktion inverses Filter
$H_{mod}(j\omega)$	Modell Punktübertragungsfunktion
$H_R(j\omega)$	Übertragungsfunktion Rückstreuung
$H_{ref}(j\omega)$	Punktübertragungsfunktion Referenzmessung
$H_{syst}(j\omega)$	Übertragungsfunktion Systemkomponenten
$H_{trans}(j\omega)$	Transversale Komponente Punktübertragungsfunktion
K	Kompressionsfaktor
$L(v'_z, m_0)$	Normierte Kreuzkorrelationsfunktion
M_1, M_2	Frequenzteilerfaktoren
N, N_2	Frequenzteilerfaktoren
N_m	Anzahl Mittelungen Schätzungen axiale Geschwindigkeitsverteilung
N'	Länge Abtastfolge Schätzung axiale Geschwindigkeitsverteilung
N_F	Ordnung Wandfilter
N_{makro}	Diskrete Makrozeitpunkte
$P_d(m)$	Dopplersignalleistung
R	Radiale Ortskoordinate
R'	Radiale Ortskoordinate Streuerposition
R_a	Aperturradius
R_f	Krümmungsradius sphärisch fokussierter Schallwandler
Re	Reynoldszahl
R_n	Radiale Positionen Schallwandler

R_0	Gefäßradius
\vec{R}_{\parallel}	Anteil radiale Komponente Ortsvektor \vec{R}^i Streuerposition parallel zur radialen Bewegungsrichtung
\vec{R}_{\perp}	Anteil radiale Komponente Ortsvektor \vec{R}^i Streuerposition senkrecht zur radialen Bewegungsrichtung
$S_{HH}(\omega)$	Leistungsdichtespektrum Punktbildfunktion Dopplersignal
$S_{XX}(\omega)$	Leistungsdichtespektrum gefensterter demoduliertes Signal
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
T	Pulswiederholperiode
T_a	Abtastperiode Transientenrekorder
T_{abt}	Abtastperiode Spektralanalyse
T_d	Periodendauer Dopplersignal
T_M	Verzögerungszeit
T_p	Pulsdauer
T_W	Verschiebung Fensterfunktion
T_0	Periodendauer Trägersignal
\dot{V}	Volumenstrom

Funktionen

$\arcsin(x)$	Arcussinusfunktion
$\arg(x)$	Argument einer komplexen Größe
$\delta(t)$	Dirac-Impuls
$J_1(x)$	Besselsche Funktion erster Art der Ordnung Eins
$\text{rect}(x)$	Rechteckfunktion
$\text{sgn}(x)$	Vorzeichenfunktion
$\text{si}(x)$	Si-Funktion
$\tan(x)$	Tangensfunktion

Abkürzungen

ADU	Analog-Digital-Umsetzer
AKF	Autokorrelationsfunktion
AKVF	Autokovarianzfunktion
A-Mode	Amplitude-Mode
A-Scan	Amplitude-Scan
B-Bild	Brightness-Bild
B/D-Scan	Brightness/Depth-Scan
B-Mode	Brightness-Mode, B-Bild-Verfahren
CW-Doppler	Continuous-Wave-Doppler, Dauerstrich-Doppler
DAU	Digital-Analog-Umsetzer
DFT	Diskrete Fouriertransformation
DSO	Digital-Speicher-Oszilloskop

DUX	Duplexer, Sende-Empfangsweiche
FFT	Fast Fourier Transform, Schnelle Fouriertransformation
FIFO	First in-first out-Speicher, Zwischenspeicher
FIR	Finite impulse response, endliche Impulsantwort
FMCW	Frequency modulated continuous wave, frequenzmoduliertes Dauerstrichsignal
IVUS	Intravaskulärer Ultraschall
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
PBF	Punktbildfunktion
PÜF	Punktübertragungsfunktion
PVDF	Poly-Vinyliden-Di-Fluorid
PW-Doppler	Pulsed-Wave-Doppler, Puls-Doppler
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
RADAR	Radio detecting and ranging, Ortung von Gegenständen mit Hilfe elektromagnetischer Wellen
SNR	Signal to noise ratio, Signal-Rausch-Verhältnis
VCO	Voltage controlled oscillator, spannungsgesteuerter Oszillator

Englischsprachige Begriffe

Ambiguity-Funktion	Mehrdeutigkeitsfunktion
Arbitrary function generator	Wellenformgenerator
Chirp	Frequenzmoduliertes Signal
Fast Fourier Transform	Schnelle Fouriertransformation
Finite impulse response	Endliche Impulsantwort
Matched filter	Signalangepaßtes Filter
Monogate-System	Einzelmeßtor-System
Multigate-System	Mehrfachmeßtor-System
Pulse repetition frequency	Pulwiederholfrequenz
Range-Ambiguity-Funktion	Ortsbezogene Mehrdeutigkeitsfunktion
Signal to noise ratio	Signal-Rausch-Verhältnis
Spectral broadening	Spektrale Aufweitung
Specklestruktur	Granulare Bildstruktur aus Rückstreuung kohärenter Signale
Waveform synthesizer	Wellenformgenerator