

**Untersuchung des Elektrokardiogramms
bezüglich eines Zusammenhanges zwischen
Herzaktivität und Schlaf**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Halil Özer

Kiel 2010

- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| 1. Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Heute |
| 2. Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Abdulnasir Hossen |
| 3. Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz |

Datum der mündlichen Prüfung: 30. April 2010

Arbeiten über Digitale Signalverarbeitung

Band 35

Halil Özer

**Untersuchung des Elektrokardiogramms
bezüglich eines Zusammenhanges zwischen
Herzaktivität und Schlaf**

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.: Kiel, 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 978-3-8322-9184-6

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

Danksagung

Ich möchte hier die Gelegenheit nutzen, den Personen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, zu danken. Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Netzwerk- und Systemtheorie der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ulrich Heute bin ich zu großem Dank verpflichtet. Er mir hat durch sein Angebot, Mitarbeiter bei ihm zu sein, sein Vertrauen geschenkt. Diese Arbeit ist Ausdruck und Ergebnis seines Vertrauens. Er hat mir die Promotion durch seine unermüdliche Unterstützung ermöglicht. Neben der Unterstützung mit seiner fachlichen Kenntnis hat er eine sehr schöne Arbeitsatmosphäre geschaffen, die mir sehr über kleinere „Durststrecken“, die in einem solch langen Projekt immer auftauchen, geholfen hat. Ich bin stolz, Teil seiner Ehemaligentruppe zu sein.

Prof. Dr.-Ing. Abdulnasir Hossen gebührt mein großer Dank. Er stand mir immer mit Rat zur Seite. Unsere fachlichen Diskussionen haben mir sehr geholfen, meine Arbeit einzuordnen. Ich will ihm dafür danken, dass er sich bereit erklärt hat, Berichterstatter meiner Arbeit zu sein. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Werner Rosenkranz für sein Interesse an meiner Arbeit und seine Bereitschaft meine Arbeit zu begutachten.

Zur sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre tragen im Wesentlichen auch die Kollegen bei. Die Zeit mit den Kollegen des Lehrstuhl für Netzwerk- und Systemtheorie und der Arbeitsgruppe Informations- und Codierungstheorie war sehr schön. Unsere Zeit war neben fachlichen Diskussionen mit etlichen privaten Aktivitäten verbunden. Wenn Leute, die tagsüber bei der Arbeit zusammensitzen und nicht müde sind, sich auch Abends und an Wochenenden zu treffen, kann die Chemie ja ganz so schlecht nicht gewesen sein. Ich schätze mich glücklich und bin sehr dankbar dafür, Teil dieser Gruppe gewesen zu sein. Es sind wahre Freundschaften entstanden.

Ich bin den Personen zum Dank verpflichtet, deren Studien-, Diplom- bzw. Masterarbeit ich betreut habe und die wissenschaftliche Hilfskräfte bei mir waren. Teile ihrer Arbeiten sind in diese Arbeit mit eingeflossen.

Ich will mich auch bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken. Sie haben

immer an mich geglaubt. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ich will auch allen Personen, die hier nicht genannt werden, aber durch Diskussionen oder einfach durch Zuhören meine Arbeit geprägt haben, meinen Dank aussprechen.

Kiel, im Mai 2010

Halil Özer

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Notation	x
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Der menschliche Schlaf	5
2.1 Funktion und Regulierung des Schlafes	6
2.2 Die Schlafstadien	9
2.2.1 Biosignale zur Bestimmung der Schlafstadien	9
2.2.2 Bewertung der Schlafstadien und Struktur des Schlafes	13
3 Das Elektrokardiogramm	19
3.1 Das Herz und seine Aktivität	19
3.1.1 Anatomie und Funktion des Herzes	20
3.1.2 Erregungsleitsystem des Herzes	23
3.2 Ableitung des EKGs	24
3.3 Charakterisierung und Nomenklatur der typischen EKG-Form	28
4 Die Datenbasis	31
4.1 Datenbasis des EKGs	31
4.2 Datenbasis des Schlafverlaufes	36
5 Herzratenanalyse	39
5.1 Detektion der EKG-Komplexe	39
5.2 Analyse der Herzratenvariabilität	41
5.2.1 Diskrete FOURIER-Transformation	42
5.2.2 ARMA-Modellierung	50

5.2.3	Wavelet-Analyse	67
5.2.4	Detrended Fluctuation Analysis	82
5.3	Zusammenfassung	87
6	Analyse des EKG-Zeitsignals	89
6.1	Morphologie des EKGs	90
6.1.1	Parameterextraktion	90
6.1.2	Hauptkomponentenanalyse	96
6.1.3	Generierung eines Gesamtmorphologieparameters	99
6.1.4	Ergebnisse	100
6.1.5	Klassifikation der Schlafstadien	110
6.2	Parametrisierung des EKGs mit der Gauß-Mixtur-Analyse	113
6.2.1	Methode	113
6.2.2	Ergebnisse bezüglich der Gauß-Parameter	118
6.2.3	Klassifikation der Schlafstadien	122
6.3	Wavelet-Analyse	124
6.3.1	Ergebnisse	128
6.3.2	Klassifikation der Schlafstadien	129
6.4	Korrelationsanalyse	132
6.4.1	Visualisierung der Korrelationsmatrix	132
6.4.2	Modell-EKG-Komplexe für jedes Stadium	133
6.5	Zusammenfassung	141
7	Vergleich und Kombination der Methoden	143
7.1	Einordnung der Ergebnisse in den aktuellen Stand der Forschung	143
7.2	Vergleich und Kombination der Methoden	146
7.2.1	Vergleich der Methoden	146
7.2.2	Kombination der Methoden	149
7.3	Zusammenfassung	152
8	Zusammenfassung und Ausblick	155
8.1	Zusammenfassung der Arbeit	155
8.2	Ausblick auf weiterführende Arbeiten	158
A	Klassifikation	161
A.1	Problemstellung	161

A.2	Lösungsansatz	162
A.3	Auswahl der Trainings- und Testdaten	164
B	Klassifikationsergebnisse der Herzratenanalyse	167
B.1	Klassifikation anhand der DFT-Parameter	167
B.2	Klassifikation anhand der AR-Parameter	175
B.3	Wavelet-Analyse	196
C	Klassifikationsergebnisse der EKG-Analyse	201
C.1	Klassifikation anhand der Hauptkomponenten der Morphologieparameter	201
C.2	Klassifikation anhand der Parameter der Gauß-Mixtur-Analyse	207
C.3	Klassifikation anhand der Parameter der Wavelet-Analyse	213
C.4	Klassifikation anhand der Parameter der Korrelationsanalyse	219
D	Ergebnisse der DFA	225
D.1	DFA-Ergebnisse: Graphen	226
D.2	DFA-Ergebnisse: Tabellen	245
E	Hypnogramme	257
F	Leistungsspektren der RR-Folge während der Schlafstadien	269
	Literaturverzeichnis	281

Abkürzungen

AIC	Akaike Information Criterion
AR	Auto-Regressive
ARMA	Auto-Regressive Moving-Average
AV-Knoten	Atrio-Ventrikular-Knoten
DFA	Detrended Fluctuation Analysis
DFT	Diskrete FOURIER-Transformation
EEG	Elektroenzephalogramm
EKG	Elektrokardiogramm
EL	Einschlaflatenz
EMG	Elektromyogramm
EOG	Elektrookulogramm
FPE	Final Prediction Error
HF	High Frequency
HRV	Herzratenvariabilitätsanalyse
IDFT	Inverse Diskrete FOURIER-Transformation
LF	Low Frequency
LS	Leichtschlaf
MA	Moving Average
MDL	Minimizing the Description Length
MRA	Multiresolution Analysis
NREM	Non Rapid Eye Movement Sleep
NMRSE	Normalized Mean Square Error
PCA	Principal Component Analysis
REM	Rapid Eye Movement
RL	REM-Latenz
SE	Schlafeffizienz
SWS	Slow Wave Sleep
STFT	Short Time Fourier Transform
TIB	Time in Bed
TL	Tiefschlaflatenz
TS	Tiefschlaf

TST	Total Sleep Time
VLf	Very Low Frequency
WM	Wachheit während der Messperiode

Notation

Konventionen und Operatoren

$AR(n_{AR})$	AR-Modellierung der Ordnung n_{AR}
$AIC(\cdot)$	Schätzung der AR-Modellordnung mit dem AIC
$cov(\mathbf{x}, \mathbf{y})$	Kovarianz der Vektoren (\mathbf{x}) und (\mathbf{y})
$FPE(\cdot)$	Schätzung der AR-Modellordnung mit dem FPE-Kriterium
$DFA(p)$	DFA-Analyse der Ordnung p
$E\{\cdot\}$	Erwartungswertoperator
$\max\{\cdot\}$	Maximalwertoperator
$\min\{\cdot\}$	Minimalwertoperator
$MDL(\cdot)$	Schätzung der AR-Modellordnung mit dem MDL-Kriterium
$var(\mathbf{x})$	Varianz des Vektors (\mathbf{x})
\mathbf{A}^T	Transponierte der Matrix \mathbf{A}
\bar{x}	Mittelwert des Vektors \mathbf{x}
$r(x_1(k), x_2(k))$	Korrelationskoeffizient zweier Folgen $x_1(k)$ und $x_2(k)$

Formelzeichen

a	Skalierungsfaktor der Wavelet-Transformation
$A(\cdot)$	Nennerpolynom eines ARMA-, AR- bzw. MA-Filters
$a_j(n)$	Approximationskoeffizienten der Wavelet-Analyse
b	Translationsfaktor der Wavelet-Transformation
$B(\cdot)$	Zählerpolynom eines ARMA-, AR- bzw. MA-Filters
C_ν	Amplitudengewichtung der ν 'ten Gauß-Funktion einer Gauß-Mixtur
$d_j(n)$	Detailkoeffizienten der Wavelet-Analyse
d_{Euklid}	Euklidische Distanz
d_{Block}	Block-Distanz
d_{Tschebys}	Tschebyscheff-Distanz
\mathbf{E}	Einheitsmatrix
$EKG(\cdot)$	EKG-Zeitsignal
$EKG(\cdot)^{\text{Median}}$	Median-EKG-Komplex einer Epoche

$EKG(\cdot)^{\text{Std}}$	Standardabweichung zwischen den EKG-Komplexen einer Epoche
$F(K)$	Fluktuationsfunktion der DFA
\mathbf{f}^{Ziel}	Zielvektor bei der Generierung des Gesamtmorphologieparameters
	\mathbf{p}^{ges}
g_i	Reflexionsfaktor
$H_{\text{AR}}(e^{j\Omega})$	Frequenzgang des AR-Filters
$H_{\text{ARMA}}(e^{j\Omega})$	Frequenzgang des ARMA-Filters
$H_{\text{ARMA}}(z)$	Übertragungsfunktion des ARMA-Filters
$H_{\text{MA}}(e^{j\Omega})$	Frequenzgang des MA-Filters
$h_{0_{\text{ARMA}}}$	Impulsantwort eines ARMA-Systems
$h_{0_{\text{AR}}}$	Impulsantwort eines AR-Systems
h_0	Impulsantwort des Tiefpassfilters bei der Filterbankumsetzung der Wavelet-Analyse
h_1	Impulsantwort des Hochpassfilters bei der Filterbankumsetzung der Wavelet-Analyse
$H_0(e^{j\Omega})$	Frequenzgang des Tiefpassfilters bei der Filterbankumsetzung der Wavelet-Analyse
$H_1(e^{j\Omega})$	Frequenzgang des Hochpassfilters bei der Filterbankumsetzung der Wavelet-Analyse
K	Segmentlänge bei der DFA
k	Zeitindex einer Folge $x(k)$
m_{ARMA}	Zählerordnung eines ARMA-Filters
\hat{m}_{ARMA}	Geschätzte Zählerordnung eines ARMA-Filters
m_{MA}	Ordnung eines MA-Filters
\hat{m}_{MA}	Geschätzte Ordnung eines MA-Filters
M_{gauss}	Anzahl der Gauß-Funktionen einer Gauß-Mixtur
n	Epochennummer
n_{AR}	Ordnung eines AR-Filters
\hat{n}_{AR}	Geschätzte Ordnung eines AR-Filters
n_{ARMA}	Nennerordnung eines ARMA-Filters
\hat{n}_{ARMA}	Geschätzte Nennerordnung eines ARMA-Filters
N_{EKG}	Länge des diskreten EKG-Signals
N_{Epochen}	Anzahl der zur Analyse Verfügung stehenden Epochen eines Datensatzes
n_{QRS}	Zeitposition des QRS-Komplexes innerhalb einer Epoche
n_{Klass}	Anzahl der Trainings- bzw. Testepochen bei der Klassifikation der Schlafstadien
n_R	Zeitposition des Maximums der R-Welle innerhalb einer Epoche
N_R	Anzahl der R-Maxima innerhalb einer Epoche
N_{RR}	Anzahl der RR-Abstände innerhalb einer Epoche

P_i	Parameter zur Beschreibung der EKG-Morphologie (Kapitel 6.1)
P_{LF}	Leistung der RR-Folge im LF-Band (0,04 Hz - 0,15 Hz)
P_{HF}	Leistung der RR-Folge im HF-Band (0,15 Hz - 0,4 Hz)
P_{LF}^{AR}	Mit der AR-Modellierung bestimmte Leistung der RR-Folge im LF-Band (0,04 Hz - 0,15 Hz) normiert auf die Gesamtleistung
P_{HF}^{AR}	Mit der AR-Modellierung bestimmte Leistung der RR-Folge im HF-Band (0,15 Hz - 0,4 Hz) normiert auf die Gesamtleistung
P_{VLF}^{AR}	Mit der AR-Modellierung bestimmte Leistung der RR-Folge im VLF-Band (0,033 Hz - 0,15 Hz) normiert auf die Gesamtleistung
P_{LF}^{DFT}	Mit der DFT bestimmte Leistung der RR-Folge im LF-Band (0,04 Hz - 0,15 Hz) normiert auf die Gesamtleistung
P_{HF}^{DFT}	Mit der DFT bestimmte Leistung der RR-Folge im HF-Band (0,15 Hz - 0,4 Hz) normiert auf die Gesamtleistung
P_{VLF}^{DFT}	Mit der DFT bestimmte Leistung der RR-Folge im VLF-Band (0,033 Hz - 0,15 Hz) normiert mit die Gesamtleistung
P_{LF}^{wave}	Mit der Wavelet-Analyse bestimmte Leistung der RR-Folge im LF-Band (0,04 Hz - 0,15 Hz) normiert auf die Gesamtleistung
P_{HF}^{wave}	Mit der Wavelet-Analyse bestimmte Leistung der RR-Folge im HF-Band (0,15 Hz - 0,4 Hz) normiert auf die Gesamtleistung
P_{VLF}^{wave}	Mit der Wavelet-Analyse bestimmte Leistung der RR-Folge im VLF-Band (0,033 Hz - 0,15 Hz) normiert mit die Gesamtleistung
P_{HF}^{norm}	Leistung der RR-Folge im HF-Band (0,05 Hz - 0,15 Hz) normiert auf die Gesamtleistung
$P_i^{diff}(n)$	i 'ter Differenzparameter zur Beschreibung der EKG-Morphologie (Kapitel 6.1) bei der n 'ten Epoche
\mathbf{p}_i^{diff}	Vektor bestehend aus den Differenzparametern P_i^{diff} einer Epoche
\mathbf{P}^{diff}	Matrix bestehend aus den Differenzvektoren \mathbf{p}_i^{diff} für alle Epochen
\mathbf{p}^{gauss}	Parametervektor bestehend aus den Amplitudengewichtsfaktoren C_ν , τ_ν und Δw_ν , $\nu \in \{1, \dots, M_{gauss}\}$
$P_i^{ges}(n)$	Gesamtmorphologieparameter bei der n 'ten Epoche
\mathbf{p}^{ges}	Gesamtmorphologievektor
$P_i^{Haupt}(n)$	Elemente der Hauptkomponentenvektoren \mathbf{p}_i^{Haupt} bei der n 'ten Epoche
\mathbf{p}_i^{Haupt}	Hauptkomponenten
\mathbf{P}^{Haupt}	Matrix bestehen aus den Hauptkomponenten \mathbf{p}_i^{Haupt}
P_i^{WT}	i 'ter Parameter aus der Wavelet-Analyse des EKGs
$P_i^{WT-Diff}$	i 'ter Differenzparameter aus der Wavelet-Analyse des EKGs
$q(k)$	Mittelwertfreies, weißes Rauschen
R_k	Zeitposition des Maximums der R-Welle des k -ten EKG-Komplexes innerhalb einer Epoche
RR_k	k -ter RR-Abstand: Abstand zwischen den Maxima zweier R-Wellen

R^2	Bestimmtheitsmaß bei der Regressionsanalyse
$\mathbf{R}_{\text{Median}}$	Korrelationsmatrix der EKG-Komplex-Mediane $EKG(\cdot)^{\text{Median}}$ aller Epochen
\mathbf{R}_{STD}	Korrelationsmatrix der EKG-Komplex-Standardabweichungen $EKG(\cdot)^{\text{Std}}$ aller Epochen
$V_M(\cdot)$	DFT eines Signal $v(\cdot)$
$\tilde{V}_M(\cdot)^{\text{EKG}}$	DFT des EKG-Signals $EKG(\cdot)$
$\tilde{V}_{RR,1024}(\mu)$	DFT der Folge $\tilde{v}_{RR}(k)$ mit Zeropadding auf 1024 Werte
$v_{RR}(k)$	RR-Folge: Folge der sukzessive aneinandergereihten RR-Abstände
$v_{RR}^{\text{int}}(k)$	Interpolierte RR-Folge
$\tilde{v}_{RR}(k)$	Mittelwertbefreite und interpolierte RR-Folge
$w(t)$	Fensterfunktion der STFT
$x_{\text{ARMA}}(k)$	ARMA-Modell-Schätzung einer Folge $x(k)$
$x(k)$	Zeitfolge
$X(j\omega)$	FOURIER-Transformierte eines Zeitsignal $x(t)$
$X_w(\omega, \tau)$	STFT eines Zeitsignal $x(t)$
$X_\psi(a, b)$	Wavelet-Transformierte eines Zeitsignal $x(t)$
α	Fluktuationsexponent bei der DFA
α_{LS}	Fluktuationsexponent während des Leichtschlafes
α_{REM}	Fluktuationsexponent während des REM-Stadiums
α_{SWS}	Fluktuationsexponent während des Tiefschlafes
$\boldsymbol{\alpha}$	Koeffizientenvektor der AR-Filterparameter
α_ν	Filterparameter eines ARMA- bzw. AR-Modells
β_ν	Filterparameter eines ARMA- bzw. MA-Modells
$\boldsymbol{\gamma}$	Vektor mit den Linearkombinationsfaktoren der Hauptkomponenten $\mathbf{p}_i^{\text{Haupt}}$ zum Gesamtmoorphologieparameter \mathbf{p}^{ges}
γ_i	Linearkombinationsfaktoren, Elemente des Vektors $\boldsymbol{\gamma}$
Δf	Frequenzauflösung bzw. Unschärfe der STFT
Δt	Zeitauflösung bzw. Unschärfe der STFT
Δw_ν	Varianz der ν 'ten Gauß-Funktion einer Gauß-Mixtur
κ	Parameter des <i>Nearest-Neighbor</i> -Algorithmus zur Klassifikation
λ_i	Eigenwerte der Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_P$
$\boldsymbol{\lambda}_i$	Eigenvektoren der Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_P$
$\boldsymbol{\Lambda}$	Matrix aus den Eigenvektoren der Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_P$
σ_q	Varianz des mittelwertfreien, weißen Rauschens $q(k)$
$\boldsymbol{\Sigma}_P$	Kovarianzmatrix der Parametervektoren $\mathbf{p}_i^{\text{diff}}$
τ_ν	zeitliche Verschiebung der ν 'ten Gauß-Funktion einer Gauß-Mixtur
$\varphi_{xx}(\lambda)$	Autokorrelationsfolge einer Folge $x(k)$

$\varphi_{qx}(\lambda)$	Kreuzkorrelationsfolge der Folgen $q(k)$ und $x(k)$
$\Phi_{xx\text{ARMA}}(e^{j\Omega})$	Von einem ARMA-Modell geschätztes Leistungsdichtespektrum
$\Phi_{qq}(e^{j\Omega})$	Leistungsdichtespektrum des mittelwertfreien, weißen Rauschens $q(k)$
$\phi(\cdot)$	Skalierungsfunktion der Wavelet-Transformation
φ_{xx}	Autokorrelationsvektor einer Folge $x(k)$
Φ_{xx}	Autokorrelationsmatrix einer Folge $x(k)$
$\psi(t)$	Basiswavelet/ Mutterwavelet
$\psi_{a,b}(t)$	Mit dem Faktor a skaliertes und um den Faktor b zeitlich verschobenes Basiswavelet
$\psi_{\text{Haar}}(t)$	Haar-Wavelet
$\Psi(j\omega)$	FOURIER-Transformiert des Basiswavelets
Ω	normierte Frequenz ($\Omega = 2\pi \frac{f}{f_A}$)
ω_ψ	Mittelfrequenz von $\Psi(j\omega)$

