

Multikriteriell evolutionär optimierte Anpassung
von unscharfen Modellen zur Klassifikation und
Vorhersage auf der Basis hirnelektrischer
Narkose-Potentiale

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Informatik und Automatisierung
der Technischen Universität Ilmenau

von
Dipl.-Ing. (FH) Christian Walther
geboren am 30.04.1982 in Weimar

Gutachter:

1. PD Dr.-Ing. habil. Peter Otto (TU Ilmenau)
2. Prof. Dr. sc. nat. Dr.-Ing. Rudolf Baumgart-Schmitt (FH Schmalkalden)
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Pu Li (TU Ilmenau)

Tag der Einreichung: 26.09.2011
Tag der öffentlichen wissenschaftlichen Aussprache: 29.05.2012

Berichte aus der Medizinischen Informatik und Bioinformatik

Christian Walther

Multikriteriell evolutionär optimierte Anpassung von unscharfen Modellen zur Klassifikation und Vorhersage auf der Basis hirnelektrischer Narkose-Potentiale

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1245-3

ISSN 1432-4385

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

Meiner Familie gewidmet

Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt die Modellierung unscharfer Regelwerke, welche zur Klassifikation von Signalmustern eingesetzt werden. Zur Optimierung der Regelwerke werden multi-kriterielle Evolutionäre Algorithmen eingesetzt. Verschiedene Algorithmen wie der Non-dominated Sorting Algorithm II, der Strength Pareto Evolutionary Algorithm der Version 2 und der Indicator-Based Evolutionary Algorithm werden erprobt, validiert und zur Regelgenerierung genutzt. Die Optimierung wird durch eine Variation der Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen der unscharfen Mengen, die innerhalb der Regeln verwendet werden, umgesetzt. Weiterhin kann die Regelstruktur über die Auswahl der unscharfen Operatoren und die Verwendung der linguistischen Terme beeinflusst werden. Die generierten Regelwerke können anschließend über einen Genetischen Algorithmus zu einer Population zusammengefasst werden, um über eine Konsensentscheidung die Klassifikationsgenauigkeit zu erhöhen. Weiterhin wurde eine kontextbasierte Vorhersagemethodik für das Klassifikationsproblem erarbeitet.

Die multikriteriell optimierten Regelwerke werden in einem Anwendungsfall eingesetzt. Dazu werden frontal und einkanalig aufgezeichnete hirnelektrische Narkosepotentiale bezüglich ihrer Signalstruktur klassifiziert und die Leistungsfähigkeit der Regelwerke validiert. Die automatische Generierung von Narkoseprofilen wird ermöglicht. Dabei ist hervorzuheben, dass ausschließlich das einkanalig erfasste Elektroenzephalogramm zur Klassifikation verwendet wird. Es werden keine weiteren vitalen Parameter oder Angaben über den Patienten berücksichtigt. Auch die verwendeten Anästhetika der Narkoseführung sind den unscharfen Regelwerken unbekannt. Somit wird ein hochdimensionales Klassifikationsproblem definiert. Der Algorithmus zur Generierung unscharfer Regelwerke wurde entsprechend der gegebenen Rahmenbedingungen dieses Anwendungsfalls erarbeitet. Die generierten Populationen unscharfer Regelwerke werden anhand unabhängiger elektroenzephalographischer Datensätze validiert. Dabei wird die Bewertung von intra- und inter-individuellen Daten betrachtet. Als Ergebnis wird festgestellt, dass die multikriteriell optimierten Populationen unscharfer Regelwerke sehr robust hirnelektrische Narkosepotentiale der Klassen *Wach*, *Narkose* und *Asphyxie* unterscheiden können. Zusätzliche patientenspezifische Daten, wie vitale Parameter oder verwendete Anästhetika, werden dabei nicht genutzt. In einem Ausblick wird der Einsatz der Regelwerke als hardware-nahe Implementierung angesprochen.

Abstract

This work deals with the modeling of fuzzy rules, which are used for classification of signal patterns. To optimize the rules multiobjective evolutionary algorithms are implemented. Various algorithms such as the Non-dominated Sorting Algorithm II, the Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 and the Indicator-Based Evolutionary Algorithm are tested, validated and used to control the generation of fuzzy rules. The optimization is implemented by varying the parameters of membership functions of fuzzy sets that are used by the rules. Furthermore, the structure is influenced by the choice of fuzzy operators and the use of linguistic terms. The generated population of fuzzy rules can then be optimized with a genetic algorithm to increase the classification accuracy. Furthermore, a context-based prediction methodology was developed for the classification problem. The multi-criteria optimized fuzzy rules are validated in an application process. Head-on and single-channel recorded brain electrical potentials with respect to anesthesia are classified. Their signal structure is classified by the fuzzy rules. The automatic generation of profiles of anesthesia is possible. It should be emphasized that only one channel recorded the electroencephalogram is used for classification. There are no more considered vital parameters or details about the patient. Also, the use of anesthetic drugs are unknown to the fuzzy rules. Thus, a high-dimensional classification problem is defined. The algorithm for generating fuzzy rules has been prepared in accordance with the circumstances of this use case. The populations of generated fuzzy rule sets are validated against independent electroencephalographic records. The valuation of intra- and inter-individual data is considered. The populations of multicriteria optimized fuzzy rules are classifying brain electrical potentials of anaesthesia very robust. The anaesthetic classes of *Wake*, *Anesthesia* and *Asphyxia* are distinguished. Additional patient-specific data such as vital signs or administered anesthetics are not used for classification. Finally the use of the generated populations of fuzzy rule sets as a hardware-related implementation is addressed.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Neuroinformatik der Fakultät Elektrotechnik an der Fachhochschule Schmalkalden. Die Forschungsgruppe wird durch Herrn Prof. Dr. sc. nat. Dr.-Ing. Rudolf Baumgart-Schmitt geleitet. Ihm gilt mein besonderer Dank, da er mir die Möglichkeit anbot, meine wissenschaftliche Tätigkeit aufzunehmen und fortzuführen und sich für die Betreuung der vorliegenden Arbeit bereit erklärte.

Insbesondere möchte ich mich ebenfalls bei Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Peter Otto der Technischen Universität Ilmenau bedanken. Ohne seine Betreuung wäre die Umsetzung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Dipl. med. Klaus-Peter Sturm und Dr. med. Thomas Günther des Kreiskrankenhauses Schmalkalden gGmbH und Herrn Dipl. med. Uwe Jäger der Praxis für ambulante Anästhesie und Notfallmedizin Steinbach-Hallenberg und Zella-Mehlis. Neben der Datengrundlage für diese Arbeit ermöglichten sie einzigartige Einblicke in das medizinische Hintergrundwissen.

Ebenfalls danke ich allen ehemaligen und aktiven Mitarbeitern der Forschungsgruppe Neuroinformatik und der Fachhochschule Schmalkalden für die interessanten Diskussionen und Anregungen und die angenehme Zusammenarbeit. Dank an: Dr.-Ing. Andreas Wenzel, Dr.-Ing. André Wenzel, Dipl.-Ing. (FH) Karsten Backhaus, Dipl.-Ing. (FH) René Reichenbach, Dipl.-Ing. (FH) Ronny Hildebrandt, Dipl.-Ing. (FH) Markus Greulich, Dipl.-Ing. (FH) Maria Trommer, Dipl.-Ing. (FH) Daniel Trommer und M.Sc. Christoph Menz.

Ilmenau, im Sommer 2011

Christian Walther

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemformulierung und Zielstellung	2
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Evolutionbasierte Modellbildung mittels multikriterieller Optimierung	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Evolutionäre Algorithmen	6
2.2.1	Motivation	6
2.2.2	Eigenschaften und Ablauf eines Evolutionären Algorithmus	7
2.2.2.1	Eigenschaften eines Evolutionären Algorithmus	7
2.2.2.2	Ablauf eines Evolutionären Algorithmus	12
2.2.3	Einteilung Evolutionärer Algorithmen	15
2.3	Multikriterielle Evolutionäre Algorithmen	17
2.3.1	Techniken von multikriteriellen Evolutionären Algorithmen	18
2.3.1.1	Rangzuweisung auf Basis von Dominanzbeziehungen	21
2.3.1.2	Sharing Function Model (<i>Fitness Sharing</i>)	24
2.3.1.3	Crowding und Crowding Distance Sorting	27
2.3.2	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	28
2.3.3	Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2	33
2.3.4	Indicator-Based Evolutionary Algorithm	36
2.3.5	Validierung der eingesetzten multikriteriellen Evolutionären Algorithmen	38
2.3.5.1	Annäherung an ein globales Optimum	39
2.3.5.2	Annäherung einer Pareto-optimalen Front	41
2.3.6	Vor- und Nachteile der erprobten multikriteriellen Evolutionären Algorithmen	42
3	Klassifikationsbezogene Modellierung durch unscharfe Regelwerke	45
3.1	Einleitung	45
3.2	Unschärfe Logik	47
3.2.1	Fuzzifizierung	48
3.2.2	Regel- und Inferenzsystem	50
3.2.3	Defuzzifizierung	53
3.3	Optimierung unscharfer Regelwerke mittels multikriterieller Evolutionärer Algorithmen	55
3.3.1	Optimierungsmodell	56

3.3.2	Optimierungsphase	62
3.3.2.1	Parametereinstellung	63
3.3.2.2	Regelformulierung	64
3.3.2.3	Populationsreduzierung	64
3.3.2.4	Kontextbasierte Vorhersage	66
3.3.3	Anwendungsphase	68
4	Klassifikation hirnelektrischer Narkosepotentiale	71
4.1	Einleitung	71
4.1.1	Durchführung der Anästhesie	71
4.1.2	Einteilung von Narkosestadien auf Basis der Äthernarkose	74
4.1.3	Einteilung von Bewusstseinszuständen anhand von Bewertungsskalen	76
4.1.4	Patientenspezifische Parameter	78
4.1.5	Probleme und Risiken während der Narkose	78
4.1.6	Parameter des Elektroenzephalogramms	79
4.2	Einteilung elektroenzephalographischer Signalmuster	81
4.2.1	<i>Wach</i>	85
4.2.2	A1 - <i>Sedierung</i>	85
4.2.3	A2 - <i>Chirurgische Toleranz</i>	86
4.2.4	A3 - <i>Tiefe Narkose</i>	87
4.2.5	A4 - <i>Burst Suppression</i>	88
4.2.6	Spezielle Störungen des EEG während der Narkose	88
4.2.6.1	Technische Artefakte	89
4.2.6.2	Biologische Artefakte	90
4.3	Anwendung unscharfer Regelwerke	90
4.3.1	Datenbasis	90
4.3.2	Methodik	91
4.3.2.1	Ziele	91
4.3.2.2	Randbedingungen	92
4.3.2.3	Vergleich der Klassifikationsleistung	97
4.3.3	Ergebnisse und Interpretation zur Optimierung	98
4.3.4	Ergebnisse und Interpretation zur intra-individuellen Klassifikation	101
4.3.5	Ergebnisse und Interpretation zur inter-individuellen Klassifikation	102
4.3.6	Ergebnisse und Interpretation zur Populationsreduzierung	104
4.3.7	Ergebnisse und Interpretation zur kontextbasierten Vorhersage	105
4.3.8	Zusammenfassung zur Interpretation der Ergebnisse	108
5	Umsetzung von Soft- und Hardwarekomponenten	111
5.1	Programmbibliothek zur multikriteriellen Optimierung	111
5.1.1	Grundfunktionen	111
5.1.2	Abgeleitete Programme	113
5.1.2.1	Validierung Multikriterieller Evolutionärer Algorithmen	113
5.1.2.2	Individuenextrahierung aus der Pareto-Front	113
5.1.2.3	Betrachter für elektroenzephalographische Daten	113
5.2	Programm zur Generierung unscharfer Regelwerke	113

5.3 EEG-Analysekomponenten zur Erfassung und Verarbeitung hirnelektrischer Potentiale	116
6 Zusammenfassung und Ausblick	119
6.1 Zusammenfassung	119
6.2 Ausblick	122
A Testergebnisse der Multikriteriellen Algorithmen	125
B Erfassung des Elektroenzephalogramms	127
C Narkoseaufzeichnungen	129
D Verwendete Merkmale des Zeit- und Frequenzbereichs	135
E Einstellungen zur Klassifikation und Vorhersage	139
F Ergebnisse zur Optimierung	143
G Ergebnisse zur intra-individuellen Klassifikation	145
H Ergebnisse zur inter-individuellen Klassifikation	149
I Ergebnisse zur Vorhersage	151
J Ergebnisse zur Populationsreduzierung	153
K Automatische Bewertungen	155
L Linguistische Interpretation der Regelwerke	161
M Inhalt der erstellten Programmbibliothek	163

Abkürzungsverzeichnis

A1	EEG-Signalmuster <i>Sedierung</i>
A2	EEG-Signalmuster <i>Chirurgische Toleranz</i>
A3	EEG-Signalmuster <i>Tiefe Narkose</i>
A4	EEG-Signalmuster <i>Burst-Suppression</i>
AS	EEG-Signalmuster <i>Asphyxie</i> (entspricht A4)
ASA	American Society of Anesthesiologists
CoG	Center-of-Gravity
EA	Evolutionäre Algorithmen
EEG	Elektroenzephalogramm
EP	Evolutionäre Programmierung
ES	Evolutionäre Strategien
GA	Genetische Algorithmen
IBEA	Indicator-based Evolutionary Algorithm
KNN	Künstliche Neuronale Netze
LoM	Largest-of-Maximum
mEEGv	Multi EEG Viewer
MoM	Mean-of-Maximum
MOEA	Multi-objective Evolutionary Algorithm
NA	EEG-Signalmuster <i>Narkose</i> (A2 und A3)
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
NSGAI	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

OAA/S	Observer's Assessment of Alertness and Sedation (OAAS) Scale
OpenMP	Open Multi Processing
SEF	Spektrale Eckfrequenz
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
SPEA2	Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2
SoM	Smallest-of-Maximum
SVM	Support Vector Machine
W	EEG-Signalmuster <i>Wach</i>
WA	EEG-Signalmuster <i>Wach</i> (W und A1)

Symbolverzeichnis

\bar{A}	Komplementärmenge von A
κ	IBEA Parameter
λ	Sharing Verlauf
eeg	EEG-Vektor
e	Vektor mit Werten zur Gewichtung von vk
ph	Parametervektor
q	Vektor mit Gütekriterien
SP	Strafpunktematrix
UE	Übergangsmatrix
vk	Vektor mit vergangenen Klassifikationen
wa	Vektor mit Klassifikationswahrscheinlichkeiten
$\Phi()$	Funktion zur iterativen Berechnung von $Ac()$
σ	Sharing Parameter
ζ	Breite der Gauß-Funktion
a, b	allgemeine Indices
A, B, C	unscharfe Mengen
$Ac()$	Schwellwertfunktion zur Berechnung der Approximativen Entropie
$Ad()$	Distanzfunktion zur Berechnung der Approximativen Entropie
aea	Werteanzahl von eeg
aed	Dimension der zu vergleichenden EEG-Abschnitte
aei	Index innerhalb von eeg
aej	Index innerhalb von eeg

<i>ael</i>	Index innerhalb von eeg
<i>aes</i>	Schwellwert innerhalb der Berechnung der Approximativen Entropie
<i>AppEn()</i>	Approximative Entropie
<i>Bp()</i>	Akkumulierte Produkte der Leistungsdichteanteile
<i>Br()</i>	BetaRatio
<i>Cd()</i>	Crowding-Distanz
<i>d</i>	diskreter Zeitpunkt
<i>Ed()</i>	Euklidische Distanz
<i>eva</i>	Anzahl der Eingangsvariablen
<i>f</i>	Fitness eines Individuums
<i>F_{IBEA}()</i>	IBEA Fitness
<i>F_{SPEA}()</i>	SPEA Fitness
<i>fi</i>	Frequenzindex
<i>gf()</i>	Gewichtungsfunktionen
<i>i, j</i>	Indices von Individuen
<i>Ind()</i>	IBEA Indikator
<i>Ind()</i>	IBEA Indikator
<i>Ist</i>	Anzahl der korrekt erkannten Datenobjekte
<i>k</i>	Index der Gütekriterien
<i>kla</i>	Klassenanzahl
<i>kli</i>	Klassenindex
<i>l</i>	Populationsgröße innerhalb eines EA
<i>Lds()</i>	Anteile des Leistungsdichtespektrums
<i>m</i>	Anzahl der Merkmale
<i>n</i>	Anzahl der Gütekriterien
<i>Nc()</i>	Nischenzähler
<i>opa</i>	Anzahl der unscharfen Operatoren
<i>P_A(d)</i>	Arbeitspopulation

p_{d1}, p_{d2}, p_{d3}	Parameter der Dreiecks-Funktion
$P_E(d)$	Elitepopulation
p_g	Parameter der Gauß-Funktion
$P_{Nische}(d)$	Nischenpopulation
p_s	Parameter der Singlet on-Funktion
$p_{t1}, p_{t2}, p_{t3}, p_{t4}$	Parameter der Trapez-Funktion
$P_T(d)$	temporäre Population
$Pfs()$	PowerFastSlow
ph	Element des Parametervektors
$ph_{u,max}$	maximaler Wert von ph_u
$ph_{u,min}$	minimaler Wert von ph_u
pka	Anzahl der Parameterkonfigurationen
$Pms()$	Produkt der Leistungsdichteanteile
pza	Prozessorkernanzahl
q_1, q_2, q_3, q_4, q_5	Gütekriterien
rea	Regelanzahl
rea_{op}	Regelanzahl bei Operatorenvariation
rei	Index über alle Regeln
rka	Anzahl der Regelwerkkonfigurationen
rwa	Regelwerkanzahl
$s()$	s-Norm
$S_{SPEA}()$	SPEA Stärke
$Sfs()$	SynchFastSlow
$Sh()$	Sharing Function
$Soll$	Anzahl der zu klassifizierenden Datenobjekte
Sp	Summe aller Strafpunkte
sp	Element der Strafpunktematrix
$t()$	t-Norm

tea	Anzahl der linguistischen Terme
U	unscharfe Menge
u	Index innerhalb des Parametervektors
ue	Element der Übergangsmatrix
v	letzter Index innerhalb des Parametervektors
vka	Anzahl der vergangenen Klassifikationen
y	Wertebereich mit $y \in \mathbb{R}$
y_{res}	resultierender Wert der Defuzzifizierung
$\mu_U(x)$	Zugehörigkeit zu U

Abbildungsverzeichnis

2.1	Allgemeiner Ansatz der Optimierung eines Modells	5
2.2	Prinzipieller Ablauf eines Evolutionären Algorithmus	7
2.3	Generationenprinzip mit aussterbender Elterngeneration	14
2.4	Eliteprinzip mit überlebender Elterngeneration	14
2.5	Prinzipielle Einteilung Evolutionärer Algorithmen	15
2.6	Konvergenz und Diversität	18
2.7	Grundtechniken zur Fitnesszuweisung auf multikriterieller Basis	19
2.8	Beispielhafte Darstellung einer Pareto-optimalen Front	23
2.9	Darstellung konvexer Pareto-optimaler Fronten	24
2.10	Stärke und Fitness des Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2	25
2.11	Verlauf der Sharing Funktion	26
2.12	Ablauf des Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	30
2.13	Ablauf des Non-dominated Sorting Genetic Algorithm der zweiten Version	31
2.14	Crowding Distance Sorting innerhalb des NSGAII-Algorithmus	33
2.15	Ablauf des erweiterten Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2	34
2.16	Ablauf des Indicator-Based Evolutionary Algorithm	37
2.17	Bimodale Testfunktion zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von EA	40
2.18	Testfunktionen nach Schaffer et. al [Sch85]	41
3.1	Eingangsgrößen, Klassifikation und Ausgangsgrößen	45
3.2	Fuzzy-System nach Mamdani	48
3.3	Beispiele typischer Zugehörigkeitsfunktionen	49
3.4	Konjunktive und disjunktive Verknüpfungen	53
3.5	Defuzzifizierungsmethoden	54
3.6	Möglichkeiten der Optimierung unscharfer Regelwerke	55
3.7	Prinzipielle Einteilung von Lern- und Validierungsdatensätzen	57
3.8	Optimierungsmodell der Anpassung unscharfer Regelwerke	58
3.9	Genetische Kodierung der Merkmalsauswahl und der unscharfen Mengen	59
3.10	Zusammenspiel zwischen den Optimierungsstufen I und II	65
3.11	Individuum der Populationszusammenstellung	66
3.12	Gewichtungsfunktionen für Klassifikationen der Vergangenheit	67
4.1	Systematische Einteilung der Anästhesiestrategien	72
4.2	Prinzipieller Ablauf einer Narkose	72
4.3	Prinzipieller Ansatz zur Klassifikation hirnelektrischer Potentiale	81
4.4	EEG-Signalmuster der Klassifikation zu <i>Wach</i>	85
4.5	EEG-Signalmuster der Klassifikation zu <i>A1-Sedierung</i>	86

4.6	EEG-Signalmuster der Klassifikation zu <i>A2-Chirurgische Toleranz</i>	87
4.7	EEG-Signalmuster der Klassifikation zu <i>A3-Tiefe Narkose</i>	87
4.8	EEG-Signalmuster der Klassifikation zu <i>A4-Burst Suppression</i>	88
4.9	Einteilung von elektroenzephalografischen Artefakten	89
4.10	Boxplots der Gütekriterien zur Optimierung	100
4.11	Boxplots zu den McNemar-Tests	100
4.12	Boxplots der Gütekriterien zur intra-individuellen Validierung	102
4.13	Boxplots der Gütekriterien zur inter-individuellen Validierung	104
4.14	Boxplots der Gütekriterien zur Populationsreduzierung	106
4.15	Boxplots der Gütekriterien zur Vorhersage	107
5.1	Struktur der Umsetzung der MOEA	112
5.2	Abgeleitete Klassen Rekombination und Mutation	112
5.3	Betrachtung von EEG-Daten mittels <i>mEEGv</i>	114
5.4	Betrachtung von Merkmalsdaten mittels <i>mEEGv</i>	115
5.5	Parallele Güteberechnung der unscharfen Regelwerke	116
5.6	Entwickeltes Versuchsmuster der Forschungsgruppe Neuroinformatik	117
6.1	Anpassung der Übergangswahrscheinlichkeiten in der Narkose	123
B.1	EEG-Ableitungspunkte nach dem 10-20-System	128
C.1	Leistungsspektren der Lerndaten	131
C.2	Leistungsspektren der Validierungsdaten	133
D.1	Akkumulation der Produktmatrix	136
K.1	Verläufe des Datensatzes DS0216	156
K.2	Verläufe des Datensatzes DS0219	157
K.3	Verläufe des Datensatzes DS0220	158

Tabellenverzeichnis

2.1	Einteilung Evolutionärer Algorithmen	16
2.2	Auflistung der verschiedenen Varianten der Evolutionären Programmierung	17
2.3	Auflistung der Dominanzbeziehungen	22
2.4	Eigenschaften der verwendeten MOEA	39
2.5	Parameter der MOEA zum bimodalen Testproblem	40
2.6	Vor- und Nachteile Evolutionärer Algorithmen	42
3.1	Auflistung der Klassifikationsanforderungen	46
3.2	Grundstruktur einer unscharfen Regel	48
3.3	Gleichungen unscharfer Operatoren	52
3.4	Auflistung der variierbaren Modellparameter	59
3.5	Vergleich von Soll- und Ist-Klassifikation	60
3.6	Einteilung der Optimierungsstufen	62
3.7	Eigenschaften der Evolutionären Algorithmen der Optimierungsstufen	63
4.1	Einteilung der verschiedenen Risikogruppenzuordnungen	73
4.2	Tabelle der Stadien der Äthernarkose	75
4.3	Observer's Assessment of Alertness and Sedation Scale	77
4.4	Ramsay-Score	77
4.5	Ursachen intra-operativer Wachheit	79
4.6	Folgen der Über- und Untersedierung	80
4.7	Bezeichnung von spektralen Bändern	81
4.8	Einteilung von EEG-Mustern unter Narkose	84
4.9	Intra- und interindividuelle Unterschiede	91
4.10	Einteilung der Belehrungs- und Validierungsmethodik	93
4.11	Zusammenfassung der EEG-Signalmuster	93
4.12	Gegenüberstellung zweier Stichproben	98
4.13	Medianmatrizen zum Ende der Optimierung	99
4.14	Medianmatrizen zur intra-individuellen Validierung	101
4.15	Medianmatrizen zur inter-individuellen Validierung	103
4.16	Medianmatrizen zur Populationsreduzierung	105
4.17	Medianmatrizen zur Vorhersage	107
A.1	Mittelwerte zum Testproblem nach Abschnitt 2.3.5.1	125
A.2	Standardabweichungen zum Testproblem nach Abschnitt 2.3.5.1	126
A.3	Mittelwerte zum Testproblem nach Abschnitt 2.3.5.2	126
A.4	Standardabweichungen zum Testproblem nach Abschnitt 2.3.5.1	126

C.1	Lern- und intra-individuelle Validierungsdaten	130
C.2	Inter-individuelle Validierungsdaten	132
D.1	Innerhalb der Optimierung verwendete Merkmale	137
D.2	Nicht innerhalb der Optimierung verwendete Merkmale	138
E.1	Einstellungen der EA zum Anwendungsfall	139
E.2	Einstellungen der unscharfen Logik zum Anwendungsfall	140
E.3	Klassenspezifische Merkmalsvoreinstellung zum Anwendungsfall	140
E.4	Einstellungen der Populationsreduzierung zum Anwendungsfall	140
E.5	Einstellung der Kontextgewichtung zum Anwendungsfall	141
E.6	Einstellungen der Übergangsmatrix zum Anwendungsfall	141
F.1	Untere und obere Quartile zum Ende der Optimierung	143
F.2	McNemar-Tests zum Ende der Optimierung	144
G.1	Untere und obere Quartile zur intra-individuellen Validierung	146
G.2	McNemar-Tests zur intra-individuellen Validierung	147
H.1	Untere und obere Quartile zur inter-individuellen Validierung	149
H.2	McNemar-Tests zur inter-individuellen Validierung	150
I.1	Untere und obere Quartile zur Vorhersage	151
J.1	Untere und obere Quartile zur Populationsreduzierung	153
K.1	Nummerierung der Vitaldaten	155
K.2	Informationen zum Ablauf der Narkoseführung	159