

Identifikation von Musiknoten

Vom Fachbereich Informatik
der Technischen Universität Darmstadt
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

von
Dipl.-Inf. Martin Schmucker
aus Justingen
geboren am 29. Mai 1972 in Ehingen/Donau

Referent: Prof. Dr.-Ing. José Luis Encarnação
Korreferent: Prof. Dr. phil.-nat. Rüdiger Grimm

Tag der Einreichung: 23. Juni 2006
Tag der mündlichen Prüfung: 29. September 2006

Darmstädter Dissertationen 2006
D17

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Verteilung von Inhalten über das Internet	2
1.2	Verteilung von Musiknoten über das Internet	10
1.3	Das Identifikationsproblem	14
1.4	Inhalt und Aufbau der Arbeit	16
1.5	Zusammenfassung	17
2	Stand der Technik	19
2.1	Die Identifikation digitaler Inhalte	20
2.1.1	Lösungsansätze	20
2.1.2	Anwendungsszenarien	28
2.1.3	Bedeutung für Musiknoten	31
2.2	Wasserzeichenverfahren	32
2.2.1	Grundprinzip	?
2.2.2	Allgemeine Anforderungen	
2.2.3	Wasserzeichenverfahren am Beispiel verschiedener Medientypen	4
2.2.4	Wasserzeichenverfahren für Texte	45
2.2.5	Wasserzeichenverfahren für Notenblätter	47
2.3	Verfahren zur Berechnung digitaler Fingerabdrücke	48
2.3.1	Grundprinzip	48
2.3.2	Allgemeine Anforderungen	51
2.3.3	Fingerabdruckverfahren für verschiedene Medientypen	52
2.3.4	Fingerabdruckverfahren für Notenblätter	56
2.4	Zusammenfassung	56
3	Wasserzeichen für Musiknoten	59
3.1	Einführung	59
3.2	Anforderungen an das entwickelte Verfahren	61

3.2.1	Einbettung in ein digitalisiertes Notenbild	62
3.2.2	Blinde Detektion	63
3.2.3	Inhalt des Wasserzeichens und benötigte Kapazität	64
3.2.4	Wahrnehmbarkeit und Qualitätsänderung	65
3.2.5	Robustheit eines eingebetteten Wasserzeichens	66
3.3	Entwickelte Markierungsverfahren	67
3.3.1	Inhaltsunabhängige Markierungsverfahren	67
3.3.2	Darstellungsabhängiges Markierungsverfahren	73
3.3.3	Notenschlüssel als Informationsträger	82
3.3.4	Notenlinien als Informationsträger	84
3.4	Inhaltsabhängige Markierungsverfahren	87
3.5	Notwendige Teilfunktionalität	89
3.5.1	Vorverarbeitung	90
3.5.2	Detektion von Notenlinien	91
3.5.3	Detektion der Noten und der Notenköpfe	95
3.5.4	Detektion der Notenschlüssel	96
3.5.5	Symbolmodifikationen einzelner Bildpunkte	96
3.5.6	Modifikation der Notenschlüssel	96
3.5.7	Modifikation des Notenbildes durch Warping	99
3.6	Zusammenfassung	101
4	Fingerabdruckverfahren für Musiknoten	105
4.1	Merkmalsbasierte Identifikation	105
4.1.1	Semantische Ähnlichkeit	106
4.1.2	Ähnlichkeit des Notenbildes	109
4.2	Merkmalsselektion	112
4.2.1	Merkmale zweidimensionaler Bildpunkteverteilungen	113
4.2.2	Generierung eindimensionaler Charakteristika	115
4.3	Merkmalsbasierte Identifikation von Musiknoten	120
4.3.1	Reduktion des Merkmalsvektors	120
4.3.2	Symbolextraktion und Normalisierung	121
4.3.3	Bestimmung des Transformationsraums	123
4.3.4	Binarisierung des Merkmalsvektors	126
4.3.5	Fingerabdruckalgorithmus basierend auf der PCA	126
4.3.6	Problematik durch Verwendung der PCA	128
4.3.7	Fingerabdruckalgorithmus basierend auf der OPCA	128
4.3.8	Fingerabdruckalgorithmus basierend auf der ICA	131
4.4	Vergleich und Suche	133
4.4.1	Ähnlichkeitsmodelle	134
4.4.2	Sequentielle Suche	136
4.4.3	Optimierte Suchstrategien	136
4.4.4	Suchstrategien für Musiknoten	137
4.5	Klassifikation durch Hypothesentests	138

4.6	Zusammenfassung	139
5	Analyse und Bewertung	141
5.1	Allgemeine Bewertungskriterien	141
5.1.1	Kriterien für Wasserzeichenverfahren	142
5.1.2	Kriterien für Fingerabdruckverfahren	143
5.2	Qualitätskriterien für Musiknoten	145
5.2.1	Bewertung des Erscheinungsbildes von Musiknoten	145
5.2.2	Bewertung der Auswirkungen auf die Nutzer	149
5.3	Robustheitskriterien für Musiknoten	151
5.3.1	Verarbeitungsoperationen auf Musiknoten	151
5.3.2	Drucken	152
5.3.3	Der Scan-Prozess	153
5.4	Wasserzeichenverfahren für Binärbilder	154
5.4.1	Markieren des gesamten Notenbildes	154
5.4.2	Markieren selektierter Bereiche	157
5.5	Musiksymbole als Informationsträger	158
5.5.1	Horizontaler Abstand von Musiksymbolen	158
5.5.2	Notenköpfe	159
5.5.3	Notenschlüssel	160
5.6	Notenlinien als Informationsträger	161
5.7	Vergleichbare Arbeiten anderer Gruppen	162
5.7.1	Modulation der Notenliniendicke	162
5.7.2	Maskieren von Notenlinienpositionen	164
5.7.3	Verschieben der Symbolposition	165
5.8	Anwendungsszenario Urheberrechtsnachweis	165
5.9	Fingerabdruckverfahren	166
5.9.1	Fingerabdruckverfahren basierend auf der PCA	167
5.9.2	Fingerabdruckverfahren basierend auf der OPCA	170
5.9.3	Fingerabdruckverfahren basierend auf der ICA	170
5.10	Zusammenfassung	170
6	Anwendungen	181
6.1	Standards und Standardisierungsaktivitäten	182
6.1.1	Metainformationen in MPEG-7	183
6.1.2	Erzeugung und Verteilung digitaler Inhalte in MPEG-21	184
6.1.3	Bedeutung für Standards und Standardisierungsaktivitäten	185
6.2	Urheberrechtsschutz und Vervielfältigungen	186
6.3	Aktive Filterknoten	187
6.3.1	Überwachung und Kontrolle des Datenaustausches	187
6.3.2	Überwachung und Kontrolle von Netzwerklaufwerken	188
6.3.3	Überwachung und Kontrolle von Netzwerkendgeräten	189
6.3.4	Überwachung und Kontrolle von Anwendungssoftware	189

Inhaltsverzeichnis

6.4	Beobachtung von Broadcast-Kanälen	190
6.5	Ein offenes und sicheres P2P-System	191
6.5.1	Charakteristika und Systemarchitektur	193
6.5.2	Aufgaben der TTPs	198
6.5.3	Anwendungsfälle	202
6.5.4	Sicherheit	203
6.5.5	Sichere P2P-Systeme	204
6.5.6	Vergleich mit alternativen Konzepten	205
6.6	Suchfunktionalität und Suchdienstleistungen	207
6.6.1	Bibliotheken und Archive	207
6.6.2	Metadaten-Provider	207
6.7	Fingerabdruck- und Wasserzeichenverfahren	208
6.8	Integritätsprüfung	209
6.9	Zusammenfassung	209
7	Zusammenfassung und Ausblick	211
7.1	Zusammenfassung der Beiträge	212
7.2	Grenzen der Entwicklungen	214
7.3	Zukünftige Arbeiten	215
A	Notation	217
A.1	Symbole	217
B	Notenbeispiele	219
C	Abbildungen zu Fingerabdruckverfahren	225
C.1	Entfernen der Notenlinien	225
C.2	Approximation mit dem Ergebnis der PCA	228
D	Akronyme	231
E	Glossar	237
	Index	243
	Literaturverzeichnis	249

Abbildungsverzeichnis

1.1	Geschätzte Datentransfervolumen auf Internet-Backbones in den USA.	3
1.2	Datentransfervolumen an der Universität Waterloo.	5
1.3	Durchschnittliche Anzahl der gleichzeitigen P2P-Benutzer.	7
1.4	Anzahl der Webserver im Internet.	8
1.5	Entwicklung der öffentlichen und privaten Websites.	9
1.6	Logistische Einflüsse in der traditionelle Musiknotendistribution.	11
1.7	Logistische Einflüsse in der digitale Musiknotendistribution.	13
2.1	Verwendung einer Hashfunktion zur Identifikation von Daten.	23
2.2	Prinzip einer wahrnehmungsbasierten Hash-Funktion.	24
2.3	Allgemeine Architektur existierender CBR-Systeme.	25
2.4	Distanzfunktion zur Bestimmung der Ähnlichkeit in CBR.	27
2.5	Klassifikation der Identifikationsarten von Daten.	29
2.6	Allgemeiner Wasserzeicheneinbeter bzw.-enkodierer.	34
2.7	Allgemeiner Wasserzeichenleser bzw.-dekodierer.	34
2.8	Kommunikationsmodell der Signalübertragung nach Shannon.	36
2.9	Analogie zwischen Wasserzeichenverfahren und Signalübertragung.	37
2.10	Wasserzeichen: Abhängigkeit von Qualität, Robustheit und Kapazität.	39
2.11	SysCoP: genutzte Frequenzbänder.	42
2.12	Funktionsweise des Normal Bin Encoding (NBE)-Verfahrens.	44
2.13	Funktionsweise quantisierungsbasierter Wasserzeichenverfahren.	45
2.14	Beispielhafte Einbettung von Informationen in Text durch Formatänderung.	47
2.15	Verarbeitungsschritte eines Fingerabdruckverfahrens.	49
2.16	Berechnen von digitalen Fingerabdrücken für Audiodaten nach [AHH ⁺ 01].	53
2.17	Berechnen von digitalen Fingerabdrücken für Audiodaten nach [HKO01a].	54
2.18	Suchstrategie für Audiofingerabdrücke nach [HKO01a].	54

3.1	Einbettungsprozess: Markieren eines gescanntes Notenbilds.	62
3.2	Einbettungsprozess: Markieren in der Musiknotationssoftware.	63
3.3	Lesen eines Wasserzeichens aus Notenbildern.	64
3.4	Wasserzeichenverfahren für Binärbilder.	70
3.5	Häufigkeit schwarzer Bildpunkte in Notenbildern.	71
3.6	Vorsegmentierung der Binärbilder für den Markierungsprozess.	73
3.7	Originalnotenbild.	80
3.8	Markiertes Notenbild: horizontale Notenverschiebungen.	81
3.9	Schema: Markieren eines Notenschlüssels.	83
3.10	Einzelschritte bei der Markierung des Violinenschlüssels.	83
3.11	Qualitätsstörungen durch die Verwendung von Standardfiltern.	84
3.12	Vergleich: Original- und markierter Violinenschlüssel.	84
3.13	Leeres Notenblatt.	85
3.14	Schema: Detektion der Notenlinien.	93
3.15	Eine Notenzeile zur Visualisierung der Notenliniendetektion.	94
3.16	Initialer LAG.	94
3.17	Linienkandidaten.	94
3.18	Detektierte Notenlinien.	95
3.19	Notengruppe.	95
3.20	Optisch dominierende Komponenten im Violinenschlüssel.	97
3.21	Hough-Transformation des Violinenschlüssels.	97
3.22	Reorientierung des Violinenschlüssels.	98
3.23	Segmentierung des Violinenschlüssels durch den Schwerpunkt.	98
3.24	Erster Segmentierungsschritt des Violinenschlüssels durch Projektionen.	99
3.25	Zweiter Segmentierungsschritt des Violinenschlüssels.	99
3.26	Segmentierte Violinenschlüsselregionen.	100
3.27	Schema: Einbettung in Notenlinien.	100
3.28	Initiales Gitter des Warpingverfahrens für Musiknoten.	101
3.29	Zielgitter des Warpingverfahrens für Notenlinien.	101
4.1	Beispielmelodie.	107
4.2	„Das wohltemperierte Klavier“ von Henle.	110
4.3	„Das wohltemperierte Klavier“ von Edition Peters.	111
4.4	Beispiel: extrahierte Musiksymbole einer Notenzeile.	116
4.5	Beispiel: horizontale Projektion einer Notenzeile.	117
4.6	Beispiel: vertikale Projektion einer Notenzeile.	118
4.7	Beispiel: obere und unter Hüllkurve einer Notenzeile.	119
4.8	Bestimmung der Notenlinien.	122
4.9	Redundanz in den einzelnen Merkmalsvektoren.	124
4.10	Energieverteilung nach der zweiten PCA.	126
4.11	Schema des PCA-basierten Fingerabdruckverfahrens	127
4.12	Schema des ICA-basierten Fingerabdruckverfahrens	133

5.1	Allgemeines Scanner-Modell nach [Smi01b].	153
5.2	Mögliche Kantenverschiebungen.	154
5.3	Häufigkeiten der schwarzen Bildpunkten.	155
5.4	Einbettung in horizontale Notenschlüsselsegmente.	161
5.5	Einbettung in vertikale Segmente	163
5.6	Beispiel „Amplitudenmodulation“ nach [MNS01a].	163
5.7	Bitfehlerverteilung bei verschiedenen Notenblättern.	167
5.8	Beispiel: Notenzeilen mit mehreren kleinen Unterschieden.	168
5.9	Beispiel: Notenzeilen mit wenigen Unterschieden.	169
5.10	Beispiel: Verzerren der Originalnotenzeile.	172
5.11	Verteilung der BERs bei kleinem Warping (für 128 bit).	173
5.12	Verteilung der BERs bei starkem Warping (für 128 bit).	174
5.13	Verteilung der BERs bei kleinem Warping (für 256 bit).	174
5.14	Verteilung der BERs bei starkem Warping (für 256 bit).	175
5.15	ROC-Kurve bei Fingerabdruckgröße von 128 bit.	176
5.16	ROC-Kurve bei Fingerabdruckgröße von 256 bit.	177
5.17	ROC-Kurve bei Fingerabdruckgröße (OPCA) von 128 bit.	178
5.18	ROC-Kurve bei Fingerabdruckgröße (OPCA) von 128 bit.	179
6.1	Anwendungsfälle in CONFUO©O.	197
6.2	CONFUO©Os vereinfachte Architektur.	198
6.3	Kombination eines Fingerabdruck- und eines Wasserzeichenverfahrens.	208
B.1	Beispiel 1: Notensatz in Capella	220
B.2	Beispiel 2: Notensatz in Capella	221
B.3	Beispiel 3: Notensatz in Capella	222
B.4	Beispiel 4: Notensatz in Capella	223
C.1	Vollständiges Notenbild.	226
C.2	Notenbild nach Entfernen der Notenlinien.	227
C.3	Approximation der oberen Hüllkurve.	228
C.4	Beispiel: neue Basisvektoren für die untere Hüllkurve.	229

Tabellenverzeichnis

2.1	Primäre Suchanfragearten bei der inhaltsbasierten Suche.	26
3.1	Einbettungsmöglichkeiten von Informationen in Noten.	60
3.2	Präfixcode der ISMN-Nummer.	65
3.3	Vergleich: Original- und markierte Notenzeilen (Warping)	88
4.1	Eigenschaften von Metriken (nach [BPR04]).	135
5.1	Subjektive Testmethoden nach [Int02b].	147
5.2	ITU-R BT.500 quality and impairment scales (Five-grade scale).	148
5.3	Angepasste Bewertungsskala für Qualitätsbewertung der Musiknoten.	150
5.4	Anzahl markierbarer Blöcke.	156
5.5	Bewertung: Einbettung bei Blockgröße 4×4	156
5.6	Bewertung: Einbettung bei Blockgröße 8×8	157
5.7	Bewertung: selektierte Einbettung bei Blockgröße 4×4	158
5.8	Bewertung: selektierte Einbettung bei Blockgröße 8×8	158
5.9	Bewertung: Einbettung in Symbolabständen	159
5.10	Bewertung: Einbettung in horizontale Notenschlüsselsegmente.	162
5.11	Bewertung: Einbettung in vertikale Notenschlüsselsegmente.	164
5.12	Bewertung Notenlinienmodulation	164
5.13	Bewertung: Notenlinienmaskierung.	165