

Suche in on-line erfassten digitalen Handschriftdokumenten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommen durch die Fakultät für Informatik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von: Dipl.-Inform. Sascha Schimke
geb. am: 31. Juli 1978 in Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Tönnies
Prof. Dr.-Ing. Claus Vielhauer
Prof. Dr. Jean Vanderdonckt

Ort und Datum des Promotionskolloquiums: Magdeburg, 17. Dezember 2008

Sascha Schimke
*Suche in on-line erfassten
digitalen Handschriftdokumenten*
Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg, 17. Dezember 2008

Zusammenfassung

In dieser Arbeit entwickelt und analysiert der Autor neue Techniken und Verfahren, die es ermöglichen, innerhalb von digital erfassten, handschriftlichen Texten zu suchen. Einen entscheidenden Unterschied zu verwandten Arbeiten stellt der Umstand dar, dass für das hier entwickelte Verfahren auf eine inhaltliche, textuelle Erkennung der Handschrift verzichtet wird und stattdessen ausschließlich die geometrische Gestalt des Schriftbildes die Grundlage für die Suche bildet. Dadurch wird es möglich, nicht nur nach handschriftlichen Passagen zu suchen, sondern auch Symbole, Skizzen und Zeichnungen zu berücksichtigen.

Die hier entwickelten Verfahren wurden auf einer eigenen Datenbasis, bestehend aus Handschriftdokumenten in verschiedenen Sprachen und von verschiedenen Autoren, experimentell evaluiert. Für die digitale Erfassung dieser Dokumente kamen drei unterschiedliche Stiftgeräte zum Einsatz. Die Vermessung der Stiftbewegungen erfolgt bei jedem dieser Stifte aufgrund eines anderen physikalischen Phänomens. Die Evaluierung ergab Fehlerraten von zum Teil unter 5 % bei der Suche innerhalb der Handschriftdokumente. Zur Erreichung dieser vergleichsweise geringen Fehlerraten werden erstmals so genannte Fusionsverfahren verwendet, die auch aus dem Bereich der biometrischen Benutzerauthentifikation bekannt sind.

Die vorliegende Arbeit stellt somit einen Beitrag zu den Forschungsgebieten der Handschriftverarbeitung und des Dokument-Retrieval dar. Sie greift dabei zurück auf Techniken aus den Bereichen der Handschrifterkennung, der biometrischen Benutzerauthentifikation, dort insbesondere der Unterschrifterkennung und der biometrischen Fusionierung, sowie der Textalgorithmen, speziell der so genannten unscharfen Suchalgorithmen.

Abstract

In this thesis, we develop and analyze new techniques and methods for searching within digitally captured handwritten text. Unlike related approaches, the new method abstains from performing textual recognition. Instead, the searching procedure is based on the geometrical shape of the handwritten text. Thence it is also possible, to search not only for words and phrases but also for drawn symbols and sketches.

The new handwriting retrieval system was experimentally evaluated using a data set of handwritten documents, written by different authors and in different various languages. These documents were digitally captured using three different pen devices with disparate physical techniques for measuring pen movement during the writing process. These evaluations resulted in error rates of less than 5 % for retrieval in handwritten documents. To achieve these comparatively low error rates, for the first time we adapt so called fusion techniques from biometric authentication for the handwriting retrieval problem.

This thesis is a contribution to, inter alia, the scientific domains of handwriting processing and document retrieval. It draws on ideas and techniques from the fields of handwriting recognition, biometric user authentication, especially signature analysis and biometric fusion, as well as text algorithms, in particular fuzzy string searching.

Danksagung

Diese Dissertation ist während meiner Zeit als Promotionsstipendiat am Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme der Otto-von-Guericke-Universität entstanden. Insbesondere der Arbeitsgruppe Multimedia and Security sowie besonders deren Leiterin, Prof. Jana Dittmann, bin ich zu großem Dank verpflichtet für die Chancen und Möglichkeiten, aber auch für die Freiheiten, die mir im Rahmen meiner Arbeit gewährt wurden.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinem Betreuer Prof. Claus Vielhauer für seine Geduld und konstruktive Kritik. Seine Erfahrungen, Ideen und Ratschläge waren mir eine große Hilfe während der Arbeit an meiner Dissertation, aber auch darüber hinaus bei meiner Forschung.

Ein besonderer Dank gilt dem von der EU geförderten *Network of Excellence SIMILAR* (FP6-507609), einerseits für die Finanzierung meines Forschungsvorhabens und andererseits für die Möglichkeit des Austausches mit Wissenschaftlern aus ganz Europa. Dies gewährte mir interessante Einblicke in fremde Forschungsgebiete und bot Chancen für wertvolle Diskussionen.

Mein Dank gilt auch Prof. Jean Vanderdonckt von der Université catholique de Louvain sowie Prof. Klaus Tönnies vom Institut für Simulation und Grafik für die freundliche Übernahme der Begutachtung meiner Arbeit.

Bedanken will ich mich auch bei meinem Kollegenkreis am Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme und hier ganz besonders bei Tobias, Ingolf und Anke für die Diskussionen und ihre Unterstützung beim Verfassen dieser Arbeit. Gleichfalls bin ich denen zu Dank verpflichtet, die mir bei der zum Teil recht zeitraubenden Sammlung von Hand-schriftdateien behilflich gewesen sind.

Schließlich geht ein großer Dank an meine Freundin Susanne Krüger und an meine Familie. Sie unterstützten mich in jeder Hinsicht während der langwierigen Arbeit an meiner Dissertation und trugen so maßgeblich zu deren Fertigstellung bei.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
Tabellenverzeichnis	xi
Abbildungsverzeichnis	xiii
Algorithmenverzeichnis	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Historische Entwicklung der Schrift	1
1.2 Überblick über Schrift am Computer	2
1.3 Ziel dieser Arbeit	6
1.4 Aufbau dieser Arbeit	6
2 Verwandte Arbeiten	9
2.1 Fremde Suchansätze	9
2.1.1 Rubines Algorithmus	9
2.1.2 ScriptSearch	11
2.1.3 Scribble Matching	12
2.1.4 Scribbler	13
2.1.5 Automatische Indexgenerierung für Handschrift	13
2.1.6 Word-Spotting nach Jain & Namboodiri	14
2.1.7 Suche mittels Texterkennung	14
2.1.8 Stiftbasierte Bildersuche	15
2.1.9 Zusammenfassung	15
2.2 Beispielanwendungen des Pen-Computing	16
2.2.1 Audio Notebook	17
2.2.2 Interaktive Whiteboards	18
2.2.3 E-Book- und digitale Notizsysteme	18
2.2.4 Stiftbasiertes Prototyping	19
2.2.5 Zusammenfassung	19
3 Gerätetypen und Datenformate	21

3.1	Optische Positionsbestimmung	22
3.2	Elektrostatische und elektromagnetische Positionsbestimmung	27
3.3	Akustische Positionsbestimmung	30
3.4	Resistive-Film-Technologie	32
3.5	Elektromechanische Positionsbestimmung	34
3.6	Dateiformate für On-line Handschriftdaten	38
3.6.1	JOT	38
3.6.2	UNIPEN	39
3.6.3	InkML	40
3.6.4	Weitere Standards und Datenformate	42
3.7	Zusammenfassung	43
4	Aufbau des Systems	45
4.1	Auswahl der Handschriftgeräte	45
4.2	Modulbeschreibung	46
5	Merkmalsgewinnung	49
5.1	Datenvorverarbeitung	50
5.1.1	Entfernen doppelter Abtastpunkte	52
5.1.2	Strokesegmentierung	53
5.1.3	Neuabtastung der Handschrift	53
5.2	Gitterbasierte Richtungsmerkmale	56
5.2.1	Quadratische Gitter	56
5.2.2	Dreiecksgitter	63
5.3	Lokale Schriftrichtung	64
5.4	Lokale Schriftkrümmung	67
5.5	Lokale Schriftneigung	68
5.6	Zusammenfassung	69
6	Suche mit Fehlern	71
6.1	Ähnlichkeiten von Zeichenketten	72
6.1.1	Editierabstand	72
6.1.2	Varianten des Editierabstandes	75
6.2	Approximative Stringsuche mittels dynamischer Programmierung	76
6.3	Alternative Suchalgorithmen	81
6.4	Zusammenfassung	82
7	Fusion	83
7.1	Überblick über Biometrie und biometrische Fusion	83
7.2	Fusionsstrategien der Handschriftsuche	90
7.2.1	Multi-Sample-Fusion	91
7.2.2	Multialgorithmische Fusion	94
7.3	Zusammenfassung	97

8	Evaluation	99
8.1	Grundlagen	99
8.2	Datenbank	105
8.3	Vorgehen bei der Evaluation	108
8.3.1	Evaluation der Systemteile ohne Fusion	108
8.3.2	Evaluation der Fusionsstrategien	109
8.3.3	Automatische Bestimmung individueller Schwellwerte	113
8.4	Zusammenfassung	115
9	Diskussion der Resultate	117
9.1	Resultate der Suche ohne Fusion	117
9.1.1	Quadratische Gitter	117
9.1.2	Dreiecksgitter	119
9.1.3	Lokale Schriftrichtung	120
9.1.4	Lokale Schriftkrümmung	122
9.1.5	Lokale Schriftneigung	124
9.2	Resultate für Multi-Sample-Fusion	125
9.2.1	Fusion auf Vergleichsebene	125
9.2.2	Fusion auf Entscheidungsebene	127
9.3	Resultate für multialgorithmische Fusion	129
9.3.1	Fusion auf Merkmalebene	129
9.3.2	Fusion auf Vergleichsebene	130
9.3.3	Fusion auf Entscheidungsebene	131
9.4	Versuch der automatischen Bestimmung individueller Schwellwerte	132
9.5	Resultate verwandter Suchverfahren	133
9.6	Zusammenfassung	135
10	Fazit und Ausblick	137
10.1	Fazit	137
10.2	Erweiterungen und Verbesserungen	138
10.3	Ausblick	139
A	Notation	141
B	Plan zur Schriftdatenerfassung	143
C	Datenbankschema der Evaluationsumgebung	145
D	Resultate – tabellarisch	147
D.1	Ohne Fusion	147
D.2	Multi-Sample-Fusion	152
D.2.1	Fusion auf Vergleichsebene	152
D.2.2	Fusion auf Entscheidungsebene	174
D.3	Multialgorithmische Fusion	186
D.3.1	Fusion auf Merkmalebene	186

D.3.2	Fusion auf Vergleichsebene	186
D.3.3	Fusion auf Entscheidungsebene	187
E	Resultate – grafisch	189
E.1	Ohne Fusion	189
E.2	Multi-Sample-Fusion	200
E.2.1	Fusion auf Vergleichsebene	200
E.2.2	Fusion auf Entscheidungsebene	213
E.3	Multialgorithmische Fusion	224
E.3.1	Fusion auf Merkmalsebene	224
E.3.2	Fusion auf Vergleichsebene	228
E.3.3	Fusion auf Entscheidungsebene	232
F	Zeitaufwand der Merkmalsgewinnung	247
G	Entropie-τ_{EER}-Diagramme	249
	Literaturverzeichnis	253
	Sonstige Quellen	281
	Eigene Veröffentlichungen	285
	Index	287
	Lebenslauf	289

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der durch verschiedene Verfahren und Algorithmen akzeptierten Stifteingaben	16
3.1	Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Gerätetypen sowie ihre technischen Parameter	44
5.1	Übersicht über die fünf in dieser Arbeit untersuchten Merkmalstypen sowie ihrer Parameter	70
8.1	Übersicht der Evaluationsdatenbasis	107
9.1	Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC) und durchschnittliche Suchdauer (Zeit (ms) pro Dokument) für quadratische Gittermerkmale in Abhängigkeit von der Gitterweite w	118
9.2	Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC) und durchschnittliche Suchdauer für Dreiecksgittermerkmale in Abhängigkeit von der Gitterweite w	120
9.3	Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC sowie durchschnittliche Suchdauer) für richtungsbasierte Merkmale in Abhängigkeit von der Resamplingweite w für $q = 8$	121
9.4	Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC sowie durchschnittliche Suchdauer) für richtungsbasierte Merkmale in Abhängigkeit vom Quantisierungsgrad q der Richtungsdaten für $w = 7$	122
9.5	Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC sowie durchschnittliche Suchdauer) für krümmungsbasierte Merkmale in Abhängigkeit von der Resamplingweite w für $q = 8$	122
9.6	Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC sowie durchschnittliche Suchdauer) für krümmungsbasierte Merkmale in Abhängigkeit vom Quantisierungsgrad q der Richtungsdaten für $w = 10$	123
9.7	Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC) und durchschnittliche Suchdauer (Zeit (ms) pro Dokument) für den Merkmalstyp der lokalen Schriftneigung in Abhängigkeit vom Grad q der Quantisierung	124
9.8	F_1 -Werte für quadratische Gittermerkmale bei Multi-Sample-Fusion auf Vergleichsebene sowie die Unterschiede zu den F_1 -Werten für das System ohne Fusion ($n = 0$)	126
9.9	F_1 -Werte für quadratische Gittermerkmale bei Multi-Sample-Fusion auf Entscheidungsebene	128

Tabellenverzeichnis

9.10	F_1 -Werte für die multialgorithmische Fusion auf der Entscheidungsebene sowie Differenzen gegenüber unfusionierten Quadratgittermerkmalen	131
9.11	Vergleich verschiedener Suchverfahren hinsichtlich ihrer Precision und ihres Recalls sowie der Werte F_1 und AUC	134

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vergleich verschiedener Alphabete	4
1.2	Illustration der drei Dimensionen stiftbasierter Systeme (Art der Daten, Art der Erfassung, Zeitpunkt der Verarbeitung)	5
2.1	Merkmalsberechnung nach Dean Rubine	10
2.2	Textpassage aus einem Beispieldokument für Tests in [JN03]	15
2.3	Prototyp des Audio-Notebook-Gerätes	17
2.4	Zwei Beispiele für E-Book-Geräte	19
3.1	Off-line und on-line Schriftprobe	21
3.2	SketchPad-System vom Sutherland und Funktionsweise von Lichtgriffeln	23
3.3	Memo-Pen – Prototyp, schematischer Aufbau und Sicht der Stiftkamera	24
3.4	Anoto-Technologie – Funktionsweise und Punktanordnung	25
3.5	Alternative zur Anoto-Technologie nach [Sek98]	26
3.6	Optisches Stiftgerät i-pen Mouse	26
3.7	Elektrostatische Bestimmung der Stiftposition beim RAND Tablet	27
3.8	Tabletgerät für die Digitalisierung von Zeichnungen	28
3.9	Schematischer Aufbau eines TabletPCs	29
3.10	Ultraschallbasierte Bestimmung der Stiftposition	31
3.11	Bestimmung der Stiftposition mittels Acoustic Pulse Recognition	31
3.12	Bestimmung der Stiftposition mittels Messung des Spannungsabfalls auf einer leitfähigen Oberfläche	32
3.13	Bestimmung der Stiftposition durch Messung des Spannungsabfalls in einer leitfähigen Flüssigkeit	33
3.14	Bestimmung der Stiftposition bei Verwendung zweier paralleler leitfähiger Folien	33
3.15	Aufbau eines Handschriftenerfassungsgerätes mit vier Kraftsensoren unter der Schreiboberfläche sowie vier Beispielsignale dieser Sensoren	34
3.16	Biometric Smart Pen (BiSP), ausgestattet mit Beschleunigungssensoren zur Messung der Schreibbewegung	34
3.17	Druckmessstift <i>MechPen</i>	35
3.18	Detail eines Unterschriftenautomaten	36
3.19	Fernschreibsystem <i>Telautograph</i>	37
3.20	Aufbau eines haptischen Interfacegerätes und Einsatz zur Schrifteingabe	38
3.21	Auszug aus einer einfachen UNIPEN-Datei	40
3.22	Beispiel einer einfachen InkML-Datei sowie die zugehörige grafische Darstellung	41

3.23	Beispiel einer UPX-Datei zur hierarchischen Annotation von InkML-Daten	41
3.24	Beispiel einer einfachen WandaML-WInk-Datei	42
4.1	Schematischer Aufbau des Handschriftsuchsystems	47
5.1	Schematischer Aufbau des Handschriftsuchsystems	49
5.2	Signale der horizontalen und vertikalen Stiftbewegung	51
5.3	Schriftbild der Signale aus Abbildung 5.2	52
5.4	Vergleich von linearer und polynomieller Interpolation sowie stückweise kubischer Splineinterpolation	55
5.5	Grundidee der Kodierung nach Freeman	57
5.6	Anwendung der Gitterkodierung nach Freeman auf ein Handschriftdokument	58
5.7	Unterschiedliche Arten der Gitter-Quantisierung	59
5.8	Darstellung eines quadratischen Gitters sowie der Quantisierungskreise der Gitterknoten	60
5.9	Darstellung eines dreieckigen Gitters sowie des Kodierungsschemas der Nachbarschaftsbeziehung von Knoten	63
5.10	Zusammenhang zwischen Gittern auf Basis von gleichseitigen Dreiecken und Quadraten	64
5.11	Bestimmung der lokalen Schriftrichtung mittels des Sekantenverfahrens	66
5.12	Bestimmung der lokalen Schriftkrümmung mittels des Sekantenverfahrens (links) sowie des Tangentenverfahrens (rechts)	67
5.13	Bestimmung der lokalen Schriftkrümmung mittels Krümmungsradius	68
5.14	Bestimmung der lokalen Schriftneigung	69
6.1	Schematischer Aufbau des Handschriftsuchsystems	71
6.2	Zusammenhang zwischen der Alphabetlänge und der durchschnittlichen Ähnlichkeit zweier Zeichenketten derselben Länge	74
6.3	Beispiel einer Distanzmatrix für die Suche eines Wortes in einem Text	78
6.4	Beispiel einer Distanzmatrix D , dargestellt als Graph und durch Farbwerte	79
7.1	Verarbeitungsschritte beim biometrischen Enrollment, der Verifikation und der Identifikation	85
7.2	Die vier diskutierten Ebenen der biometrischen Fusion	88
7.3	Schematischer Ablauf der Handschriftsuche mit Multi-Sample-Fusion	91
7.4	Grafische Darstellung der Ähnlichkeitsvektoren bei der Suche mittels Multi-Sample-Fusion	93
7.5	Fusion der Ähnlichkeitsvektoren aus Abbildung 7.4 mittels Maximum-, Minimum- und Durchschnittsfunktion	94
7.6	Schematischer Ablauf der Handschriftsuche mit multialgorithmischer Fusion	95
8.1	Precision, Recall und Fallout als Venn-Diagramme	101
8.2	Grafische Darstellung der Precision und des Recalls zweier Retrievalsysteme als Funktionen eines Ähnlichkeitsschwellwertes sowie als Precision-Recall-Diagramm	103

8.3	Berechnung der Fläche unter einer Precision-Recall-Kurve mittels der Trapez- und der Rechteckmethode	104
8.4	Ground-Truth-Manager Modul des Retrievalsystems	107
8.5	Angepasstes Systemschema für die Evaluation der Handschriftsuche	108
8.6	Precision- und Recallwerte, ermittelt für quadratische Gittermerkmale, dargestellt als Funktionen des Ähnlichkeitsschwellwertes und als Precision-Recall-Diagramm	109
8.7	Exemplarische Precision- und Recallflächen bei der multialgorithmischen Fusion zweier Systeme auf der Entscheidungsebene mittels Mengenvereinigung	111
8.8	Exemplarische F_1 -Fläche bei der multialgorithmischen Fusion zweier Systeme auf der Entscheidungsebene mittels Mengenvereinigung	112
8.9	Precision und Recall als Funktion des Ähnlichkeitsschwellwertes, individuell für 13 Personen aus der Testdatenbasis dargestellt	113
8.10	Zusammenhang zwischen den individuellen Ähnlichkeitsschwellwerten τ_{EER} und der Entropie der jeweiligen Merkmalszeichenketten	114
9.1	Precision-Recall-Diagramm für quadratische Gittermerkmale für den Gerätetyp <i>ioPen</i>	118
9.2	Precision-Recall-Diagramm für Dreiecksgittermerkmale für den Gerätetyp <i>ioPen</i>	119
9.3	Precision-Recall-Diagramm für richtungsbasierte Merkmale bei Verwendung von 8 Richtungen (links) sowie bei einer Punktweite von 7 Längeneinheiten (rechts)	121
9.4	Precision-Recall-Diagramm für Merkmale auf Basis der Schriftkrümmung bei Verwendung von 8 Richtungen (links) sowie bei einer Punktweite von 7 Längeneinheiten (rechts)	123
9.5	Qualitätsmaß F_1 als Funktion des Quantisierungsparameters q für den Merkmalstyp der lokalen Schriftneigung	124
9.6	Precision-Recall-Diagramm für quadratische Gittermerkmale für den Gerätetyp <i>ioPen</i> bei Multi-Sample-Fusion auf Vergleichsebene	125
9.7	Precision-Recall-Diagramm für quadratische Gittermerkmale für den Gerätetyp <i>ioPen</i> bei Multi-Sample-Fusion auf Entscheidungsebene	127
9.8	Precision-Recall-Diagramm für die multialgorithmische Fusion von Schrift- richtungs- und -krümmungsmerkmalen auf der Merkmalsebene sowie fusionslose Verwendung von Schriftrichtungsmerkmalen für den Gerätetyp <i>ioPen</i> ($w = 10$)	129
9.9	Precision-Recall-Diagramm für die multialgorithmische Fusion von Schrift- richtungs- und -krümmungsmerkmalen auf der Vergleichsebene sowie fusionslose Verwendung von Schriftrichtungsmerkmalen für den Gerätetyp <i>ioPen</i> ($w = 10$)	130
9.10	τ_{EER} -Entropie-Streudiagramm für Quadratgittermerkmale mit $w_g = 7, 10, 20, 30$	132
9.11	Vergleich verschiedener Suchverfahren hinsichtlich ihrer Precision- und Recallwerte	134

Abbildungsverzeichnis

9.12	Originales Precision-Recall-Diagramm des Verfahrens von <i>Jain</i> und <i>Namboodiri</i> aus [JN03]	135
C.1	Schema der Evaluationsdatenbank	145

Algorithmenverzeichnis

1	Funktion zur Entfernung doppelter Abtastpunkte	53
2	Extraktion von Quadratgittermerkmalen aus Sequenzen von Abtastpunkten mittels Circular Quantisierung	60
3	Vereinfachter Bresenham-Linienalgorithmus	61
4	Verfahren zur Kodierung von Nachbarschaftsbeziehungen in Sequenzen von Gitterpunkten	62
5	Verfahren zur Kodierung von Nachbarschaftsbeziehungen in Sequenzen von Knotenpunkten in Dreiecksgittern	65
6	Implementierung der Suche nach einer Zeichenkette r in einer Menge von l Zeichenketten s_1 bis s_l unter Berücksichtigung des Ähnlichkeitsschwellwertes τ	80

1 Einleitung

Handwriting is civilization's casual encephalogram
(Lance Morrow)

In jüngster Zeit gewinnt mit den so genannten *TabletPCs* eine Klasse von mobilen Computern zunehmend an Bedeutung, welche dem Benutzer die Verwendung von Stiften zur Dateneingabe ermöglichen. Statt den Computer wie bisher nur mit der gewohnten Kombination aus Tastatur und Maus zu bedienen, können nun insbesondere auch handschriftliche und handgezeichnete Eingaben vorgenommen werden. Neben diesen *TabletPCs* existieren weitere Arten von auf Stiften basierenden Computern sowie Computerzubehör, wie etwa *PDA*s (engl. *personal digital assistant*), Digitalisiertablets oder mit speziellen Sensoren ausgestattete papierbasierte Klemmbretter als autonome Geräte.

All diese Geräte gestatten es dem Benutzer, von den Vorteilen der handschriftlichen gegenüber der tastaturbasierten Texterfassung zu profitieren. Insbesondere für Notizen oder Mitschriften in Diskussionen und ähnlichen Situationen kann die Verwendung von Tastaturen als störend empfunden werden. Auch sind die Möglichkeiten, ad hoc grafische Skizzen anzufertigen, mit der Tastatur beschränkt.

Neben den genannten Vorteilen, die stiftbasierte Geräte bieten, existiert eine Reihe von Herausforderungen, die in unterschiedlichem Umfang bereits gelöst wurden, für die zum Teil aber noch keine praktikablen Lösungen existieren. Speziell für die Speicherung und Weitergabe handschriftlicher digitaler Dokumente mussten entsprechende Datenformate entwickelt werden, deren allgemeine Verbreitung mangels Standardisierung bislang nicht umfassend ist. Desweiteren sind Techniken der *Volltextsuche*, wie sie für mit Tastaturen erfasste Dokumente existieren, als Mittel des schnellen Zugriffs innerhalb großer Datenbestände für Handschriftdokumente bisher kaum vorhanden. *Insbesondere dieses zuletzt genannte Problem einer leistungsfähigen Volltextsuche für digital erfasste handschriftliche Dokumente ist Gegenstand dieser Arbeit.*

1.1 Historische Entwicklung der Schrift

Die Erfindung der Schrift vor etwa fünf- bis sechstausend Jahren versetzte den Menschen in die Lage, Wissen in einfacher Weise aufzubewahren und weiterzugeben¹. Insbesondere in

¹A. Meyer erklärt die Schrift zum wichtigsten Kommunikationsmittel überhaupt: »*Communication is possible only when individuals communicate their ideas and visions by writing them down for other people and for other times and places, pointing out the super-personal nature of culture. [. . .] Of all the means of cultural exchange, writing is the most specific and precise, as well as the most flexible.*« [Mey95, S. 47]

R. Plamondon schreibt in [Pla95]: »*Handwriting was invented centuries ago to expand the human memory and to facilitate communication.*«

1 Einleitung

der Verwaltung, etwa der Landwirtschaft in Mesopotamien, kamen frühe Formen der Schrift (Keilschrift) erstmals zum Einsatz, wie archäologische Funde etwa aus Uruk im heutigen Irak belegen.

Aus den figürlichen Darstellungen in den ältesten Schriftsystemen wurden im Laufe der Zeit zuerst abstraktere Zeichen entwickelt, welche anfangs noch für konkrete Worte der jeweiligen Sprache standen. Später entstanden in vielen Sprachen daraus Zeichensysteme (sowohl Silben- als auch Alphabetschriften), durch welche sich die Lautwerte der Worte ausdrücken ließen. Einerseits verringerte sich auf diese Weise der Vorrat an benötigten und zu erlernenden Zeichen drastisch (beispielsweise 22 Zeichen des *phönizischen Alphabetes* im Vergleich zu mehreren tausend *ägyptischen Hieroglyphen*) [Fau80]. Zum anderen wurde es so leichter möglich, neue und unbekannte Worte sowie beliebige Eigennamen schriftlich zu fixieren.

Neben der Schrift wurden im Laufe der Zeit die Techniken zur Schrifterzeugung verfeinert und vereinfacht. Während die Keilschrift dadurch ihre typische Form erhielt, dass die Zeichen mit einem Holzgriffel in noch feuchten Ton gedrückt wurden, ging man später dazu über, Schriftzeichen als Tintenspuren mithilfe von zugespitzten Federkielen auf Papyrus, Pergament oder Papier zu schreiben. Ungefähr im zehnten Jahrhundert wurde mit der chinesischen Erfindung des Buchdruckes die massenhafte Vervielfältigung von Schriftstücken ermöglicht [Tsi86]. Dieses Druckverfahren wurde unter anderem durch *Johannes Gutenbergs* so genannten *Mobilletterndruck* (Buchdruck mit beweglichen Metall-Lettern) weiter vereinfacht. Gewissermaßen als Nachfolger dieser Erfindung kann die moderne Schreibmaschine angesehen werden, deren Idee zumeist *Henry Mill* (1683-1771) zugeschrieben wird und als deren älteste vermarktete Variante die *Skrivekugle* des Dänen *Hans Rasmus Johan Malling Hansen* (1835-1890) ist. Mit den heute allgegenwärtigen Personalcomputern samt zugehörigen Druckern als technologische Nachfahren dieser frühen Schreibmaschine existiert eine große Verbreitung von Drucktechnik.

Jedoch, weder die Erfindung der Schreibmaschine noch die flächendeckende Verbreitung von Personalcomputern und Druckern konnten die Handschrift als Mittel der individuellen Schriftkommunikation gänzlich verdrängen. Im Gegenteil werden mit der aktuellen Vermarktung von stift-basierten PDA-Geräten oder stift-unterstützten Notebooks, so genannten Tablet-PC-Geräten, die Möglichkeiten der Handschrift auch für den Computereinsatz nutzbar gemacht. Daher ist auch zukünftig eine wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Thema Handschrift relevant, auch unter dem Gesichtspunkt aktueller technischer Möglichkeiten.

1.2 Überblick über Schrift am Computer

Die Beschäftigung mit Handschrift aus Sicht der Computerwissenschaft hat eine aus heutiger Sicht vergleichsweise lange Tradition. Bereits 1956 wurde mit dem *RAND Tablet* (siehe Abschnitt 3.2) das erste Zusatzgerät für Computer entwickelt, das dem Benutzer die Dateneingabe mittels Stift ermöglichte. Im Jahr 1957 meldete *Thomas L. Dimond* seinen *Stylator* zum Patent an, ein System zur automatischen Erkennung einzelner handgeschriebener Buchstaben [Dim63]. 1962 veröffentlichte *L. D. Earnest* eine der ersten Arbeiten über die Erkennung kursiv geschriebener Texteingaben [Ear62]. Im folgenden Jahr entwickelte *Ivan Edward Sutherland* in seiner Doktorarbeit das *SketchPad*-System, das eine frühe Form des Lichtgrif-

fels war und das es dem Benutzer gestattete, direkt auf einem Bildschirm zu zeichnen [Sut63]. Im Jahr 1966 beschrieb *G. F. Groner* in [Gro66] ein System auf Basis des *RAND Tablet* zur Erkennung von Zeichen, Symbolen und Stiftgesten. Bereits zwei Jahre zuvor hatte *Teitelman* einen ersten trainierbaren Erkennungsalgorithmus für Stiftgesten vorgestellt [Mye96].

Neben diesen Systemen werden für die automatische Verarbeitung von in Papierform vorliegenden Handschriften seit langem spezielle Verfahren entwickelt. Insbesondere die Erkennung von Adressen auf Briefen sowie von handschriftlichen Daten in Volkszählungsformularen, auf Bankschecks und -überweisungen steht dabei im Vordergrund; im Falle von Bankformularen kommt neben der textuellen Erkennung der Datenfelder auch die Verifikation der Unterschrift als Ziel hinzu [NR77, MGR⁺95]. Desweiteren gibt es Ansätze, die automatischen Erkennungsverfahren auch für die Analyse und Verwaltung historischer Handschriften einzusetzen [GX04, Fel06].

Ein weiterer Bereich der digitalen Analyse handschriftlicher Daten ist die automatische oder computerunterstützte Handschriftforensik, die zum Beispiel die Bestimmung des Urhebers handgeschriebener Dokumente auf der Basis charakteristischer Unterschiede der Schrift umfasst [KP89, SHSS07]. Eine gewisse Verwandtschaft zu diesem Gebiet der Handschriftforensik besitzt der Bereich der biometrischen Unterschriftenanalyse zum Zwecke der Benutzerauthentifikation [LP94, SVD04, Vie06], etwa für Zugangskontrollsysteme.

Dieser exemplarische Überblick über mehr als 50 Jahre der Entwicklung zeigt die Vielfalt der Möglichkeiten sowie die Komplexität der Ziele beim Umgang mit den verschiedensten Arten von Schreibdaten am Computer. Eine gewisse Systematik lässt sich schaffen, wenn folgende Fragen betrachtet werden: Auf welche Weise erfolgt die Erfassung der Handschriftdaten? Um welche Art von Handschriftdaten handelt es sich? Zu welchem Zeitpunkt geschieht die Interpretation der Daten?

Die **Art der Erfassung** der Handschriftdaten wird klassischerweise unterschieden in *off-line* und *on-line* Verfahren. Off-line Verfahren betreffen solche handschriftlichen Daten, die in Form von Bildern der Dokumente vorliegen, welche zumeist mittels Digitalfotografie oder Scannertechnik digitalisiert wurden. Die on-line Verfahren, als Gegensatz zu diesen bildbasierten Verfahren, beruhen auf der Analyse der Daten der Stiftbewegung. Während also im Falle der off-line Verfahren das Resultat eines Schreibvorgangs zentral ist, liegt der Fokus der on-line Verfahren auf der Entstehung von Schreibdaten.

Die Frage nach der **Art der Handschriftdaten** beantwortet sich auf unterschiedliche Weisen für verschiedene Anwendungen und Systeme. Der Begriff der »*Handschriftdaten*« soll im Folgenden nicht zu eng gefasst werden; neben *textuellen Daten* können auch *Stiftgesten*, *gezeichnete Symbole* oder *Skizzen* sowie beispielsweise *Unterschriften* unterschieden werden.

- Unter *textuellen Daten* werden normalerweise Buchstaben, Ziffern und Interpunktion verstanden [SNC⁺95]. Die Art der Eingabe textueller Daten kann weiter unterschieden werden in:
 - spezielle, durch den Benutzer zu lernende und möglichst einfach automatisch erkennbare Alphabete (beispielsweise *Unistroke*, *Graffiti* oder *EdgeWrite*; siehe Abbildung 1.1),
 - separate Zeicheneingabe mittels Standardalphabet (etwa *Graffiti2*; für den deutschen Sprachraum beispielsweise die Schulausgangsschrift), wobei zum Teil die

1 Einleitung

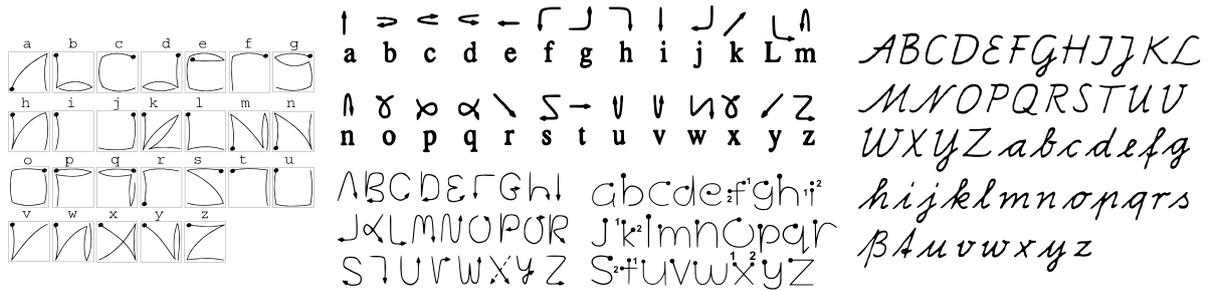


Abbildung 1.1: Vergleich verschiedener Alphabete; links: *EdgeWrite* [Wob06], Mitte oben: *Unistroke* [Xerox], Mitte unten: *Graffiti* und *Graffiti2* [Palm], rechts: eine deutsche *Schulausgangsschrift*

Position der einzelnen Symbole durch Linien oder Kästchen vorgegeben ist,

– Kursivschrift (miteinander verbundene Buchstaben in Worten).

- *Stiftgesten* werden (ähnlich wie Mausgesten) genutzt, um dem Computer Kommandos zu übermitteln. Hierbei kann es sich beispielsweise um das Selektieren oder Löschen von Objekten auf dem Bildschirm durch Einkreisen oder Durchstreichen handeln, aber auch um das Aufrufen einer Hilfe-Funktion eines Programmes oder das Vor- und Zurückspringen innerhalb von Hypertextumgebungen durch die entsprechenden Stiftbewegungen. Stiftgesten hinterlassen, im Gegensatz zu Textdaten, typischerweise keine »Tintenspuren« auf dem Bildschirm.²
- Anders als Stiftgesten ist das Ziel von *Symbolen* und *Skizzen* zumeist nicht das Auslösen einer Aktion, sondern die Eingabe einer tatsächlichen geometrischen Form, welche in interaktiven Anwendungen auch auf dem Bildschirm erscheinen soll. Die Ziele reichen dabei von der Erkennung linguistischer Zeichen beim Korrekturlesen von Dokumenten [Col69, AR99] bis hin zur Interpretation von gezeichneten grafischen Benutzeroberflächen und der automatischen Generierung des entsprechenden Programmcodes [CSVV07] oder der Interpretation und Simulation gezeichneter elektrischer Schaltkreise [Dav07].
- Die Eingabe der *Unterschrift* erfolgt normalerweise mit dem Ziel, diese mit einer bereits im System vorhandenen Referenz zu vergleichen und aufgrund des Grades der Ähnlichkeit die Identität des Schreibers zu überprüfen. Neben der Unterschrift können zum Teil auch beliebige Worte, Wortgruppen und Symbole verwendet werden, da hierbei zumeist nicht der textuelle Inhalt, sondern die geometrische Form und die Art der Schreibausführung (in Hinblick auf den Schreibdruck und die Schreibdynamik) ausgewertet werden [KHH02, SVD07b].

²Unter Umständen können auch die Texteingaben mittels der Graffiti-Technik auf PDA-Geräten des Typs *Palm-Pilot* als Stiftgesten interpretiert werden; eine bestimmte Geste (in Form eines nach unten geöffneten Dreiecks) dient als Kommando, im Text das Zeichen »A« einzufügen; zudem wird die Form der Stifteingabe graphisch nicht dargestellt.

Die dritte Frage ist die nach dem **Zeitpunkt der Verarbeitung** der Handschriftdaten. Hierbei kann unterschieden werden zwischen der *unmittelbaren Erkennung* für interaktive Anwendungen und der *verzögerten Erkennung* (*immediate recognition vs. deferred recognition* [Mey95]). Die unmittelbare Erkennung der Eingaben findet unter anderem bei der Stiftbedienung von PDA-Geräten Anwendung. Ein Beispiel für die verzögerte Erkennung ist die automatische Auswertung von handschriftlich ausgefüllten Papierformularen.

Hinsichtlich dieser drei »Dimensionen« (Art der Daten, Art der Erfassung und Zeitpunkt der Verarbeitung) stellen beispielsweise das bereits erwähnte Szenario der Erkennung von Schrift- und Unterschriftsdaten auf Papierformularen einerseits, sowie die Computerbedienung mittels Stiftgesten andererseits zwei gegenüberliegende Pole im Spektrum der Möglichkeiten und Techniken dar. Zum einen handelt es sich um off-line Text- und Unterschriftendaten, die verzögert verarbeitet werden und zum anderen um on-line erfasste Daten, die zum Zwecke der Benutzerinteraktion unmittelbar nach der Eingabe erkannt werden. Andere Anwendungen, wie etwa biometrische Login-Systeme auf Basis der Unterschrift oder die nachträgliche Erkennung von, am Computer mittels on-line Techniken erfassten, Handschriftdokumenten ordnen sich zwischen diesen beiden Polen ein.

Die Abbildung 1.2 versucht den Zusammenhang zwischen den Dimensionen zu veranschaulichen. Die Eigenschaften möglicher stiftbasierter Systeme sind durch die Position von Quadern dargestellt. Der Fokus der vorliegenden Arbeit richtet sich auf die hervorgehobenen Bereiche, das heißt, auf die verzögerte Verarbeitung von on-line erfassten Text- und Symbolangaben.

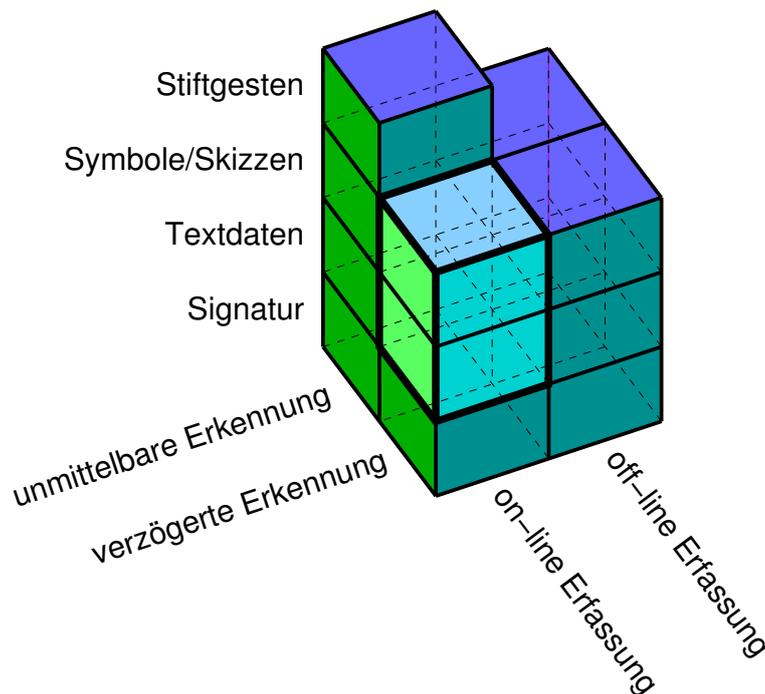


Abbildung 1.2: Illustration der drei Dimensionen stiftbasierter Systeme (Art der Daten, Art der Erfassung, Zeitpunkt der Verarbeitung)

1.3 Ziel dieser Arbeit

Das Thema dieser Arbeit, also die Volltextsuche für digitale Handschriftdokumente, basiert auf *on-line* erfassten Daten, deren Verarbeitung nicht unmittelbar nach der Erfassung, sondern *verzögert* zu einem späteren Zeitpunkt geschieht. Die Daten selbst sind hierbei *textueller* Natur, jedoch können ohne Veränderungen am System im gleichen Maße auch *nicht-textuelle* Daten gesucht werden, da die Art der Daten für die in dieser Arbeit untersuchten und entwickelten Algorithmen vollständig transparent sind – es wird lediglich auf Basis geometrischer Formen der Stifteingaben gearbeitet.

Damit grenzt sich diese Arbeit ebenso von der Suche in Handschriftdokumenten auf Papier ab (beispielsweise Handschriftensammlungen in Archiven und Bibliotheken), welche naturgemäß den Charakter von off-line Daten besitzen, wie auch von den Zielen der klassischen Texterkennung. Gleichwohl wird in dieser Arbeit auf bestimmte Techniken aus dem Gebiet der Texterkennung zurückgegriffen.

Als *wissenschaftliche* Vorarbeit untersucht der Autor in Kapitel 3 relevante technische Systeme und Geräte zur Handschrifterfassung und versucht, diese anhand der ihnen zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien und Wirkungsweisen zu unterscheiden, um so eine entsprechende Klassifikation zu entwickeln.

Neben der *Entwicklung eines Suchsystems* für Handschriftdokumente stellt die *experimentelle Evaluation* der zugrundeliegenden Algorithmen einen wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit dar. Ein weiterer wichtiger Aspekt besteht in dem Versuch, Verfahren der, unter anderem aus dem Bereich der Biometrie bekannten, *Fusion* auf ihre Eignung für die Handschriftverarbeitung zu untersuchen. Diese Verwendung von Fusionsverfahren zielt darauf ab, die Anzahl der Fehler, welche beispielsweise bei der Suche in zum Teil unsauber geschriebenen Dokumenten auftreten können, zu verringern und somit die Suchergebnisse zu optimieren.

1.4 Aufbau dieser Arbeit

Das *Kapitel 2* geht auf verwandte Arbeiten ein und fasst im ersten Teil den Stand der Forschung (engl. *state of the art*) im Bereich der Suche in on-line Handschriftdokumenten zusammen. Im zweiten Teil des Kapitels werden Systeme vorgestellt, die auf verschiedene Weisen mit solchen Handschriftdokumenten in Berührung kommen und die mit dem in dieser Arbeit entwickelten Suchverfahren kombiniert werden können.

Kapitel 3 verschafft dem Leser einen Überblick über die möglichen technischen Realisierungen der on-line Erfassung von Handschrift. Die verschiedenen Techniken werden hierbei hinsichtlich ihrer physikalischen Wirkungsweise strukturiert. Der zweite Teil dieses Kapitels widmet sich aktuell verfügbaren Datenformaten zur Speicherung und Weitergabe von On-line-Handschriftdaten.

Die *Kapitel 4, 5* und *6* beschreiben den globalen Aufbau sowie die eigentlichen Algorithmen des in dieser Arbeit entwickelten Suchsystems und bilden den Kern der vorliegenden Arbeit. Kapitel 4 stellt dabei den globalen Aufbau des Systems vor, Kapitel 5 geht auf die Aspekte der Datenvorverarbeitung sowie die für die Suche nötigen Merkmale ein und im Kapitel 6 wird der konkrete Suchalgorithmus präsentiert.

Das **Kapitel 7** beschreibt Möglichkeiten zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Systemen aus dem verwandten Gebiet der biometrischen Benutzerauthentifikation durch so genannte Fusionsstrategien, das heißt, Kombinationen verschiedener Einzelsysteme. Basierend auf einer aus der Biometrie bekannten Systematik dieser Fusionsstrategien wird im Folgenden eine Adaption für das eigene Suchsystem diskutiert.

Um die Leistungsfähigkeit des Systems zur Suche in Handschriftdokumenten zu bestimmen und mit der verwandter Systeme zu vergleichen, wurden umfangreiche Tests auf Grundlage einer selbst gesammelten Datenbasis durchgeführt. Das Vorgehen bei dieser Evaluation ist in **Kapitel 8** beschrieben. Die Evaluation schließt unter anderem auch die Überprüfung etwaiger Leistungsverbesserungen aufgrund der erwähnten Fusion mit ein.

In **Kapitel 9** werden die bei der Evaluation gewonnenen Resultate ausgewertet und unter Hinzunahme der Resultate verwandter Ansätze diskutiert.

Kapitel 10 schließlich fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten im durch diese Arbeit berührten Bereich.

1 Einleitung

2 Verwandte Arbeiten

I have seen the future and it is spelled P-E-N.
(Edward N. Yourdon, 1991)

In diesem Kapitel sollen im ersten Abschnitt verschiedene verwandte Arbeiten im Bereich der Suche in Handschriftdaten vorgestellt und vom eigenen, in dieser Arbeit entwickelten, System abgegrenzt werden. Im zweiten Abschnitt liegt der Fokus auf der Präsentation von existierenden Pen-Computing-Systemen, die bislang über keine explizite Suchfunktion verfügen und die von dem hier entwickelten System profitieren könnten.

2.1 Fremde Suchansätze

In den folgenden Unterabschnitten finden sich einige wesentliche Verfahren aus der Literatur, die in bestimmter Weise mit dem in dieser Arbeit entwickelten System der Handschriftsuche verwandt oder vergleichbar sind. Dabei handelt es sich zum einen um *Rubines Algorithmus*, ein Verfahren für die Erkennung von Stiftgesten (bestehend aus lediglich einem Stroke) und zum anderen um Verfahren, die explizit für die Suche in handschriftlichen Daten konzipiert sind. Trotz einer gewissenhaften Litraturrecherche durch den Autor kann an dieser Stelle nicht ausgeschlossen werden, dass weitere relevante Verfahren und Ansätze existieren.

2.1.1 Rubines Algorithmus

Große Beachtung erlangte die Arbeit von *Dean Rubine* über die Wiedererkennung von Stift- oder Mausgesten [Rub91a]: *Specifying Gestures by Example*. Das Verfahren von Rubine ist in der Lage, aus mehreren Realisierungen derselben Geste¹ ein Modell zu generieren, mit dem eine Wiedererkennung dieser Geste möglich ist. Hierzu werden für jede Geste die statistischen Merkmale f_1 bis f_{13} aus Abbildung 2.1 bestimmt.

Die eigentliche Wiedererkennung einer Geste g anhand ihrer Merkmale f_1 bis f_{13} wird dadurch erreicht, dass diese Merkmale mit denen aller C ($C \in \mathbb{N}$) dem System bekannten Klassen \hat{c} von Gesten verglichen werden. Dabei wird jenes \hat{c} bestimmt, welches $v_{\hat{c}}$ maximiert² mit

$$v_{\hat{c}} = w_{\hat{c}0} + \sum_{i=1}^{13} w_{\hat{c}i} f_i \quad \text{mit} \quad 0 \leq \hat{c} < C \quad (2.1)$$

¹Der Begriff »Stiftgeste« (oder allgemeiner »Geste«) soll hier für einen einzelnen Linienzug stehen, welcher beispielsweise mit einem Stift geformt wird. Dabei kann es sich um beliebige Symbole oder Buchstaben handeln, die geschrieben werden können, ohne dabei den Stift abzusetzen.

²»Practitioners of pattern recognition will recognize this classifier [eq. 2.1] as the classical linear discriminator.« [Rub91b, S. 53]

2 Verwandte Arbeiten

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \cos \alpha = (x_2 - x_0) / \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \\
 f_2 &= \sin \alpha = (y_2 - y_0) / \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \\
 f_3 &= \sqrt{(x_{max} - x_{min})^2 + (y_{max} - y_{min})^2} \\
 f_4 &= \arctan \frac{y_{max} - y_{min}}{x_{max} - x_{min}} \\
 f_5 &= \sqrt{(x_{p-1} - x_0)^2 + (y_{p-1} - y_0)^2} \\
 f_6 &= \cos \beta = (x_{p-1} - x_0) / f_5 \\
 f_7 &= \sin \beta = (y_{p-1} - y_0) / f_5 \\
 \Delta x_p &= x_{p+1} - x_p \quad \text{und} \quad \Delta y_p = y_{p+1} - y_p \\
 f_8 &= \sum_{p=0}^{P-2} \sqrt{\Delta x_p^2 + \Delta y_p^2} \\
 \theta_p &= \arctan \frac{\Delta x_p \Delta y_{p-1} - \Delta x_{p-1} \Delta y_p}{\Delta x_p \Delta x_{p-1} - \Delta y_{p-1} \Delta y_p} \\
 f_9 &= \sum_{p=1}^{P-2} \theta_p \\
 f_{10} &= \sum_{p=1}^{P-2} |\theta_p| \\
 f_{11} &= \sum_{p=1}^{P-2} \theta_p^2 \\
 \Delta t_p &= t_{p+1} - t_p \\
 f_{12} &= \max_{p=0}^{P-2} \frac{\Delta x_p^2 + \Delta y_p^2}{\Delta t_p^2} \\
 f_{13} &= t_{P-1} - t_0
 \end{aligned}$$

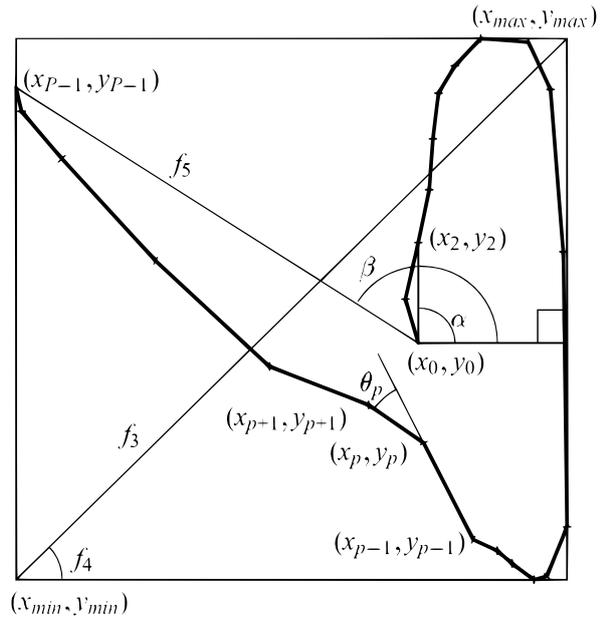


Abbildung 2.1: Merkmalsberechnung nach Dean Rubine [Rub91a]

Hierbei sind $w_{\hat{c}0}$ bis $w_{\hat{c}13}$ die Gewichtungen, die im System für die Gestenklasse \hat{c} gelten. Die Bestimmung dieser Gewichte der einzelnen Klassen erfolgt in der so genannten Trainingsphase. Sei $f_{\hat{c}ei}$ der i -te Merkmalswert ($1 \leq i \leq 13$) der e -ten Beispielrealisierung der Gestenklasse \hat{c} und sei $E_{\hat{c}}$ die Anzahl der Beispiele dieser Klasse ($0 \leq e < E_{\hat{c}}$). Sei weiterhin $\bar{f}_{\hat{c}i}$ der Mittelwert der i -ten Merkmalswerte der Klasse \hat{c} :

$$\bar{f}_{\hat{c}i} = \frac{1}{E_{\hat{c}}} \sum_{e=0}^{E_{\hat{c}}-1} f_{\hat{c}ei} \quad (2.2)$$

Mit diesen Werten wird die Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{c}}$ der Klasse \hat{c} bestimmt³:

$$\Sigma_{\hat{c}ij} = \sum_{e=0}^{E_{\hat{c}}-1} (f_{\hat{c}ei} - \bar{f}_{\hat{c}i})(f_{\hat{c}ej} - \bar{f}_{\hat{c}j}) \quad \text{mit} \quad 0 < i \leq 13, 0 < j \leq 13 \quad (2.3)$$

woraus die gemeinsame Kovarianzmatrix Σ aller Klassen abgeschätzt wird:

$$\Sigma_{ij} = \frac{\sum_{\hat{c}=0}^{C-1} \Sigma_{\hat{c}ij}}{-C + \sum_{\hat{c}=0}^{C-1} E_{\hat{c}}} \quad (2.4)$$

³»For convenience in the next step [eq. 2.4], the usual $1/(E_{\hat{c}} - 1)$ factor has not been included in $\Sigma_{\hat{c}ij}$ « [Rub91a, S. 334]

Die Gewichte $w_{\hat{c}0}$ bis $w_{\hat{c}13}$ werden wie folgt berechnet⁴:

$$w_{\hat{c}j} = \sum_{i=1}^{13} (\Sigma^{-1})_{ij} \bar{f}_{\hat{c}i} \quad \text{mit } 1 \leq j \leq 13 \quad (2.5)$$

$$w_{\hat{c}0} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{13} w_{\hat{c}i} \bar{f}_{\hat{c}i} \quad (2.6)$$

Hierbei ist Σ^{-1} das Inverse der gemeinsamen Kovarianzmatrix aller Klassen.

Rubine gibt in [Rub91a] die Erkennungsgüte seines Systems mit 98 % an bei bis zu 15 verschiedene Klassen von Gesten und mindestens 15 Beispielgesten pro Klasse. Bei 30 Klassen mit jeweils 40 Beispielen erhält er 97 % und mit nur 15 Beispielen 96 % korrekte Erkennungen.

Dieser bereits 1991 veröffentlichte Algorithmus ist auch heutzutage noch relevant. Dies zeigt sich zum einen an der großen Zahl aktueller Veröffentlichungen, die auf Rubines Algorithmus verweisen und zum anderen in seiner weitverbreiteten Verwendung zur Lösung von Problemen der stiftbasierten Mustererkennung [LM01, TBBB02, BC02, Bou02, CMP05, HL06].

2.1.2 ScriptSearch

Der *ScriptSearch*-Algorithmus wurde von *Daniel Lopresti* und *Andrew Tomkins* 1994 in ihrem Aufsatz »*On the Searchability of Electronic Ink*« veröffentlicht [LT94]. Ihr Ziel war unter anderem die Suche nach handgezeichneten und handgeschriebenen Stifteingaben. Die Idee der Suche nach handgezeichneten Eingaben war es, Dateien auf PDA-Geräten mit Piktogrammen anstelle von Dateinamen zu versehen und die Dateien mittels erneuter Eingabe des jeweiligen Piktogramms automatisch wiederzufinden [LT93]. Die Suche nach handgeschriebenen Stifteingaben verfolgte das selbe Ziel wie die vorliegende Arbeit: nämlich die benutzerabhängige Suche nach Textstellen mit einem bestimmten Wortvorkommen.

Im Falle des SkriptSearch-Algorithmus erfolgte eine Zerlegung der Texte in so genannte *Strokes*, die in [LT94] dadurch definiert waren, dass sie durch zwei aufeinanderfolgende vertikale Minima der Stiftbewegung begrenzt sind. Für jeden dieser *Strokes* wurde mittels des Algorithmus von *Rubine* [Rub91a] ein Merkmalsvektor mit 13 Elementen bestimmt (siehe Abschnitt 2.1.1). Der dadurch definierte 13-dimensionale Vektorraum wurde mittels Vektorquantisierung in 64 Cluster aufgeteilt und somit jedem *Stroke* einer dieser Cluster zugewiesen. Auf Basis der Abfolge von Clusterbezeichnungen aller *Strokes* eines Piktogramms oder Wortes wurde die Suche dadurch realisiert, dass die Editierabstände (siehe Abschnitt 6.1) zwischen dem gesuchten Piktogramm und denen im System bestimmt wurden. Für die Suche in Dokumenten, bestehend aus größeren Mengen an Worten, wurde eine Zerlegung der Texte in Zeilen und Worte durchgeführt und die Suche mittels Editierabstand auf Basis der segmentierten Worte durchgeführt.

⁴»[...] it is assumed that all gesture classes are equally likely to occur. The constant term $w_{\hat{c}0}$ may be adjusted if the a priori probabilities of each gesture class are known in advance.« [Rub91b, S. 59]

Die in [LT94] angegebene Genauigkeit des SkriptSearch-Algorithmus bei einer personen-abhängigen Suche lag nur bei etwa 55 bis 60 % sowohl für die *Precision*, als auch den *Recall* (siehe Kapitel 8) bei einer Testmenge von nur *zwei Personen*.

2.1.3 Scribble Matching

Die Suche in Handschriftdaten wurde von *Richard Hull, Dave Reynolds* und *Dipankar Gupta* in [HRG94] am Beispiel eines digitalen Adressbuches entwickelt. Die Idee dieses Adressbuches ist es, Namenseinträge auch handschriftlich zu speichern (als *virtual ink*) und auf die Adressbucheinträge mittels erneuten Schreibens des Namens zuzugreifen. Die Bezeichnung *Scribble* (deut. *Gekritzelt*) bezieht sich auf diese handgeschriebenen Einträge, deren Schreibstil dem Benutzer komplett freigestellt ist.

Für die Suche wurden in [HRG94] drei verschiedene Verfahren verwendet, die teilweise auch miteinander kombiniert wurden. Zwei der drei Verfahren basieren darauf, entlang der Spur der Stiftbewegung so genannte *Knotenpunkte* (engl. *knot points*) zu definieren, jeden dieser Knotenpunkte entsprechend bestimmter lokaler Eigenschaften zu kodieren und somit für eine handschriftliche Eingabe, etwa in Form eines Wortes, eine Abfolge von Kodezeichen zu erhalten. Die Suche wird realisiert durch einen wiederholten Vergleich des Kodewortes der Sucheingabe mit den Kodeworten der Adressbucheinträge mithilfe des Editierabstandes. Als Knotenpunkte werden in [HRG94] jene Positionen definiert, an denen die Schreibgeschwindigkeit ein lokales Minimum besitzt.

Das erste der drei Verfahren (*syntactic matcher*) unterscheidet solche Knotenpunkte, die in *Anfangs-* oder *Endpunkten* von Strokes, *Spitzen*, *offenen Kurven*, *geschlossenen Kurven/Schleifen* oder an sonstigen Stellen der virtuellen Tintenspur liegen sowie zusätzlich *diakritische Zeichen* wie *i-Punkte*. Diese verschiedenen Arten von Knotenpunkten werden weiterhin danach unterschieden, ob etwa eine Spitze eher nach oben, unten, links oder rechts weist.

Im zweiten Verfahren (*word shape matcher*) wird die grobe Form der Worte berücksichtigt, indem Ober- und Unterlängen der Buchstaben an den jeweiligen Stellen bestimmt werden. Dies wird erreicht, indem für jeden Knotenpunkt der relative Abstand zur horizontalen Mittellinie des Wortes bestimmt wird. Hierbei wird zusätzlich eine Normalisierung bezüglich des mittleren Abstandes aller Knotenpunkte von dieser Mittellinie vorgenommen.

Das dritte beschriebene Verfahren (*elastic matcher*) basiert darauf, die ursprünglichen Daten der Stiftbewegung durch Neuabtastung der Strokes zu verringern und für jeden dadurch entstehenden Abtastpunkt die *relative Höhe* h (Verhältnis der y -Koordinate des Punktes zur Höhe der *bounding box* der Stifteingabe) und den *Winkel der Tangente* θ in diesem Punkt zu bestimmen. Statt einer Kodierung dieser Werte in Form diskreter Kodezeichen werden die kontinuierlichen Werte y und θ für den Editierabstand verwendet, dessen Ersetzungsoperation (siehe Abschnitt 6.1) entsprechend angepasst wurde: statt der festen Operationskosten von 1 im Falle der Ersetzung ungleicher Symbole gilt nun die Kostenfunktion $m(y_p - y_q) + n(\theta_p - \theta_q)$ (m und n sind hierbei Gewichte, y_p , y_q , θ_p und θ_q sind die Höhen- und Winkelwerte der zu ersetzenden Abtastpunkte).

Für die Kombination der drei einzelnen Verfahren werden die Einzelergebnisse (Editierabstände) normalisiert zu einem Gesamtergebnis summiert. Getestet wurde das System mit einer Datenbank, bestehend aus *100 Namen in sechs Wiederholungen* (aufgezeichnet von insgesamt

33 Personen in drei über mehrere Wochen verteilten Durchgängen). Die Tests mit dieser auf Adressbucheinträge beschränkten Datenbank ergaben Erkennungsraten von 84,4 bis 99,8 %, wobei durch die Kombination der Einzelverfahren jeweils die besten Ergebnisse erzielt wurden.

2.1.4 Scribbler

Im Jahr 1995 veröffentlichten *Alex Poon*, *Karon Weber* und *Todd Cass* ihren Beitrag *Scribbler: A Tool for Searching Digital Ink* [PWC95]. Der Suchalgorithmus von *Scribbler* war eingebettet in ein System namens *Marquee* [WP94] zur stiftbasierten Annotation von Videoaufzeichnungen. Benutzer von *Marquee* konnten zu ablaufenden Videofilmen digitale Notizen anfertigen, die über eine Synchronisation mit den jeweiligen Zeitpunkten innerhalb der Videofilme verknüpft wurden. Das Ziel war die einfachere Navigation innerhalb der Filme anhand dieser handgeschriebenen Markierungsinformationen. Das System *Scribbler* sollte das spätere Auffinden von relevanten Markierungsinformationen ermöglichen, mittels erneuter Stifteingabe durch den Benutzer und einer Ähnlichkeitssuche innerhalb der gespeicherten Annotationen.

Für die Suche wird für die Stiftdaten der Annotationen sowie der Suchanfrage, das heißt, für die Sequenzen von Abtastpunkten, eine Strokesegmentierung sowie für jeden Stroke eine Neuabtastung durchgeführt, mit dem Ziel, die Abstände aufeinanderfolgender Abtastpunkte zu vereinheitlichen. Anschließend werden Gruppen nahe beieinanderliegender Strokes gebildet, wodurch gewissermaßen eine Wortsegmentierung erreicht wird. Die Sequenz der Abtastpunkte der Suchanfrage wird mit den Sequenzen aller Strokegruppen mittels *Dynamic Time Warping* verglichen; mithilfe eines Schwellwertes werden die Treffer bestimmt.

Das Verfahren wurde für die Suche nach Text sowie nach Symbolen getestet. Die Suchgenauigkeit wurde in [PWC95] angegeben mit 75,2 % für einen ersten Test mit Daten von *sechs Personen*.

2.1.5 Automatische Indexgenerierung für Handschrift

Anders als die zuvor beschriebenen Systeme verfolgt das Verfahren in [UW99] von *Shingo Uchihashi* und *Lynn Wilcox* nicht das Ziel, Ähnlichkeiten zwischen handgeschriebenen Daten zu bestimmen oder solche Daten in handschriftlichen Dokumenten zu finden. Vielmehr ist ihr Ziel, in Handschriftdokumenten solche Worte zu bestimmen, deren Vorkommen auf den Seiten des Dokumentes eher selten ist, um damit einen Index zu schaffen, welcher Verknüpfungen mit den Stellen des jeweiligen Vorkommens im Dokument enthält und somit einen einfachen Zugriff im Dokument ermöglicht.

Nach einer wortweisen Segmentierung der Dokumente erfolgt eine Neuabtastung der Daten der Schreibbewegung mit dem Ziel, eine feste Abtastfrequenz zu erlangen (der Zeitabstand zweier aufeinanderfolgender Punkte ist konstant). Für die Abtastpunkte werden der Tangentenwinkel θ an der Schriftkurve, die erste und zweite Ableitung von θ sowie der Sinus und Cosinus von θ als Merkmale bestimmt. Mittels dynamischer Programmierung wird auf Basis dieser fünf Merkmale die paarweise Ähnlichkeit aller im Dokument vorkommenden Worte berechnet. Mithilfe hierarchischen Clusterings werden solche Worte zusammengefasst, deren Ähnlichkeit einen bestimmten Schwellwert übersteigt. Cluster, die nur eine kleine Anzahl

von Worten enthalten, bilden die potentiellen Indexterme. Mittels statistischer Tests wird überprüft, ob die Verteilung dieser potentiellen Indexterme im gesamten Dokument stark von der Normalverteilung abweicht, was sie zu Indextermen qualifiziert.

Getestet wurde das System mit digitalen handschriftlichen Notizen von *drei Personen*. Dazu wurde bei unterschiedlichen Schwellwerten überprüft, wie oft diese Cluster der Indexterme falsche Worte enthielten, also solche, die ungleich waren zu den restlichen Worten eines Clusters. Dabei ergaben sich im Durchschnitt Precision- und Recallwerte im Bereich von 40 bis 60 %.

2.1.6 Word-Spotting nach Jain & Namboodiri

Die Forscher *A. K. Jain* und *A. M. Namboodiri* beschreiben in [JN03] ein weiteres System für die Wortsuche (engl. *word spotting*) in handschriftlichen Dokumenten. Es basiert, wie die zuvor beschriebenen Verfahren, darauf, aus den Signalen der Schreibbewegung bestimmte charakteristische Merkmale zu extrahieren und die Wortsuche auf Grundlage dieser Merkmale durchzuführen. Wie bei dem Verfahren von *Uchihashi* und *Wilcox* (Abschnitt 2.1.5) erfolgt auch bei *Jain* und *Namboodiri* in einem ersten Verarbeitungsschritt eine Wortsegmentierung der Handschriftdaten. Der Vergleich zweier handschriftlicher Worte geschieht mittels DTW (*dynamic time warping*).

Die Evaluierung ihres Systems führten *Jain* und *Namboodiri* mit zwei Datenbasen durch, bestehend aus *3.872 Worten*, geschrieben von *einer Person*, sowie *6.672 Worten*, geschrieben von *10 Personen*. In Abbildung 2.2 ist beispielhaft eine Textpassage aus der Datenbasis von *Jain* und *Namboodiri* dargestellt. Wie hier zu erkennen ist, sind die einzelnen Textzeilen und die Worte klar voneinander getrennt und damit leicht automatisch segmentierbar. Für die elektronische Erfassung dieser Daten wurde ein *Cross-Pad*-Gerät benutzt, das aus einem Schreibblock besteht, unter dem sich eine elektromagnetische Sensorfläche befindet, welche die Spitze eines speziellen Stiftes erkennen kann (siehe hierzu auch Abschnitt 3.2). Die Autoren geben für den besten Fall eine Precision von 93,2 % und einen Recall von 90 % an.

2.1.7 Suche mittels Texterkennung

Einen gänzlich anderen Ansatz für die Suche in handschriftlichen Dokumenten wählten *Russel*, *Perrone et al.* in [PRZ02, RPCZ02]. Sie stützten sich auf die Ausgaben einer automatischen textuellen Erkennung der Stifteingaben. Statt hier jedoch direkt in den, zum Teil fehlerhaft erkannten, Textdaten nach bestimmten Worten zu suchen, verwendeten sie als Ausgangsdaten die so genannten *N-Best-Listen*. Dies sind die vom Erkennungssystem den einzelnen handschriftlichen Worten zugeordneten potentiellen Bedeutungen, mitsamt dem jeweiligen Wert für die Wahrscheinlichkeit. Durch die Verwendung dieser *N-Best-Listen* werden die Probleme umgangen, die aus den zum Teil sehr hohen Fehlerraten aktueller Handschrifterkennungsalgorithmen bei unsauberem und schwer lesbarem Handschriften resultieren. Für Einzelwortanfragen besitzt dieses System laut [PRZ02] eine Precision und einen Recall von etwa 70 %. Für die Suche nach Wortgruppen anstelle von einzelnen Worten steigen diese Werte in einigen Fällen auf bis etwa 90 %.

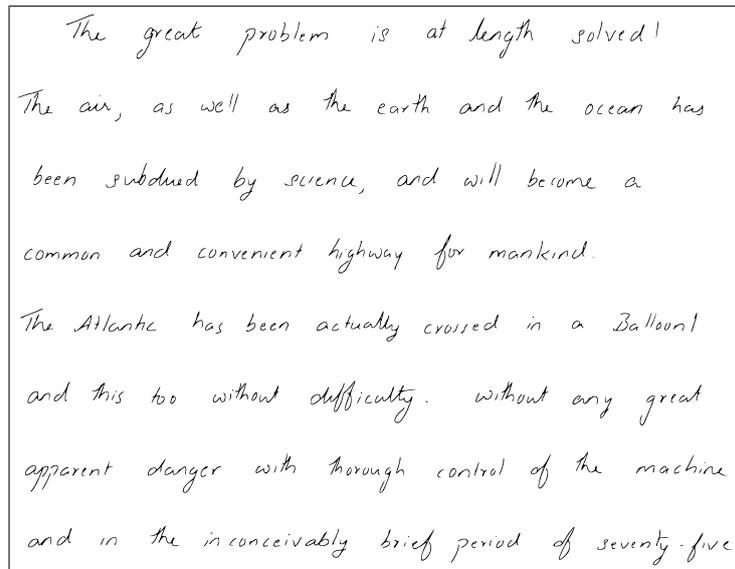


Abbildung 2.2: Textpassage aus einem Beispieldokument für Tests in [JN03]

2.1.8 Stiftbasierte Bildersuche

Während die zuvor beschriebenen Systeme und Verfahren zumeist eine Form der Suche mittels Stifteingaben innerhalb von handgeschriebenen oder -gezeichneten Daten ermöglichen sollen, diskutieren *Fonseca et al.* in [FBRJ04] ein Verfahren für die stiftbasierte Suche nach vektorbasierten ClipArt-Grafiken. Der Benutzer soll die Möglichkeit haben, mit dem Stift ein Bild zu skizzieren, welches mit einer Datenbank von ClipArt-Grafiken verglichen wird. Die Basis dieser Vergleiche ist die Lagebeziehung (Nachbarschaft oder Einschluss) von Bildteilen zueinander. Diese Beziehungen der Bildteile werden für jede Grafik als so genannter Topologiegraph (engl. *topology graph*) beschrieben; die Suche erfolgt durch eine Ähnlichkeitsbestimmung dieser Topologiegraphen.

Ein Verfahren mit sehr ähnlicher Technik, aber für die stiftbasierte Suche nach handgezeichneten Skizzen beschreiben *Leung und Chen* in [LC03]. *Carduff und Egenhofer* beschreiben in [CE07] mit »*Geo-Mobile Query-by-Sketch*« ein System für die mobile stiftbasierte Suche innerhalb von Geodaten, etwa in Karten. Sie erwähnen ebenfalls die Berücksichtigung der Lagebeziehungen von Objekten innerhalb der gezeichneten Eingaben und der Kartendaten, gehen jedoch nicht näher auf das technisch zugrundeliegende System für die Verarbeitung dieser Daten ein.

2.1.9 Zusammenfassung

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren zur Auswertung von handschriftlichen online Daten eignen sich nicht für das in dieser Arbeit entworfene System einer Volltextsuche in handschriftlichen und handgezeichneten Dokumenten. Der Algorithmus von Rubine etwa erlaubt nur die Wiedererkennung von aus einem einzigen Linienzug (engl. *single stroke*) bestehenden Stifteingaben und scheidet damit aus für die Suche nach Worten, die beinahe

zwangsläufig aus mehreren Linienzügen bestehen. Die Verfahren in den Abschnitten 2.1.2 bis 2.1.6 berücksichtigen im Gegensatz dazu zwar die Verarbeitung kompletter Worte, jedoch basieren sie auf einer strikten Segmentierung dieser Worte. Hierdurch ist es nicht möglich, nach Teilen von Worten (im Deutschen insbesondere nach Teilen von zusammengesetzten Worten) oder Wortgruppen zu suchen. Zudem treten Probleme bei der Segmentierung automatisch auf, wenn der Autor eines Dokumentes Worte am Ende einer Zeile trennt; hierdurch entstehen zwei separate Segmente. Verfahren, die auf der Texterkennung beruhen, wie jenes in Abschnitt 2.1.7, sind naturgemäß beschränkt auf die Verarbeitung von textuellen Daten und scheitern an der Erkennung von nicht-textuellen Inhalten, wie etwa Symbolen und Skizzen. Weiterhin sind sie mit dem Problem konfrontiert, dass die Erkennung von Texten außerhalb der Welt der lateinischen, der kyrillischen und der chinesischen Schriftkultur auch heute noch nur mangelhaft unterstützt wird. In Tabelle 2.1 ist eine Übersicht von durch die verschiedenen Verfahren erkennbaren Stifteingaben dargestellt. Es wird deutlich, dass keines der in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren jede mögliche Eingabe verarbeiten kann.

All diesen Problem versucht die vorliegende Arbeit mit der Entwicklung eines Systems zur Handschriftvolltextsuche zu begegnen. Wie die Evaluation des hier entwickelten Systems zeigen wird, gelingt dieser Versuch.

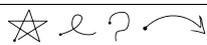
	Rubines Algorithmus	ScriptSearch	Scribble Matching	Scribbler	Jain & Nambodiri	Texterkennung	System dieser Arbeit	
Single-Stroke-Gesten	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
Multi-Stroke-Symbole		✓	✓	✓	✓		✓	
Worte (in unterstützen Schriftsystemen)		✓	✓	✓	✓	✓	✓	<i>convenient</i>
Worte (in nicht unterstützen Schriftsystemen)		✓	✓	✓	✓		✓	<i>Директор</i>
unsaubere Schrift		✓	✓	✓	✓		✓	<i>Multimedial image segmentation</i>
Silbentrennung & Teilwortsuche						✓	✓	<i>Директор - stellvertretен</i>

Tabelle 2.1: Vergleich der durch verschiedene Verfahren und Algorithmen akzeptierten Stifteingaben

2.2 Beispielanwendungen des Pen-Computing

In diesem Abschnitt sollen Systeme sowie Geräte aus der Literatur vorgestellt werden, die dem Bereich des Pen-Computing zugeordnet werden können und die über keine spezielle

Suchfunktionalität verfügen. Diese Systeme sind potentielle Kandidaten für einen Einsatz des in dieser Arbeit entwickelten Suchverfahrens für Handschriftdaten und -dokumente.

2.2.1 Audio Notebook

Das *Audio Notebook* von Lisa Stifelman [Sti96, Sti97, SAS01] ist ein stiftbasiertes Gerät, welches der Navigation in Audiodaten diene. Die Idee hinter dem Audio Notebook war, dass in Vortragssituationen, bei denen eine Audioaufzeichnung stattfindet, Zuhörer Mitschriften, Notizen oder Kommentare schriftlich festhalten und dazu spezielle Geräte verwenden. Durch eine zeitliche Synchronisierung der dabei aufgezeichneten Audio- und Schreibdaten war es möglich, festzustellen, zu welchem Zeitpunkt der Audioaufzeichnung welche Schreibdaten produziert wurden, und umgekehrt. Damit konnte man durch ein Auswählen bestimmter Schreibdaten an die jeweiligen Stellen der Audioaufzeichnung springen. In Abbildung 2.3 ist ein Prototyp dieses Audio-Notebook-Gerätes dargestellt.

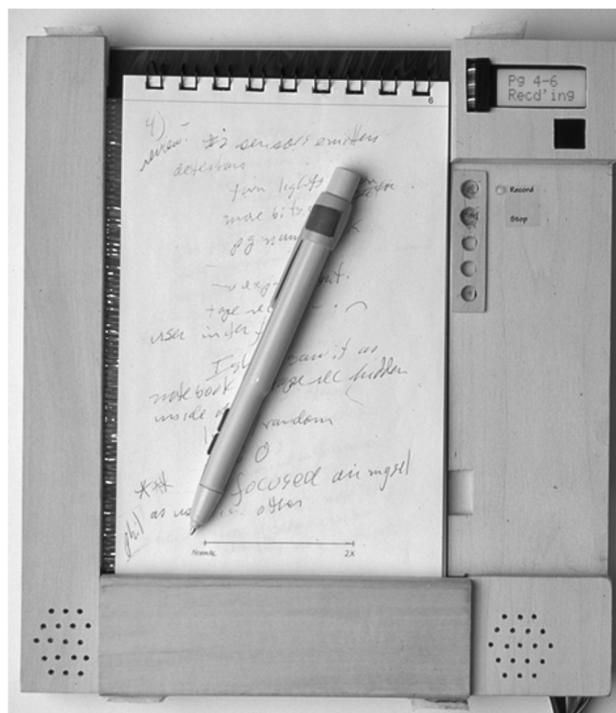


Abbildung 2.3: Prototyp des *Audio-Notebook*-Gerätes [Sti97]

Technisch wurde dieses System realisiert, indem sich unter der Schreiboberfläche ein Sensor, das Digitalisiertablett (siehe Abschnitt 3.2), befand und zum Schreiben ein spezieller Stift verwendet wurde, dessen Position durch das Digitalisiertablett ermittelt werden konnte. Bei Verwendung mehrerer Blätter für die Mitschriften werden die einzelnen Blätter mit einer Art einfachem *Barcodes* versehen, welcher durch optische Bauteile im Gerät erkannt und unterschieden werden.

Ähnliche Handschriftsysteme, die eine Synchronisation zwischen Schreib- und Audio- oder Videodaten verwenden, um dadurch den gezielten Zugriff auf bestimmte Daten zu vereinfachen.

chen, sind etwa das *Marquee*-System (siehe Abschnitt 2.1.4), *Dynamite* [WSS97], das System von *Ozan Cakmakci* und *François Bérard* [CB05] oder der *Smartpen* der Firma Livescribe [Liv07]. Letzteres Gerät ist eine Umsetzung der Anoto-Technologie (siehe Abschnitt 3.1) und integriert die Funktionalitäten für Audioaufzeichnung und Schreibdatenspeicherung direkt im Stift.

2.2.2 Interaktive Whiteboards

Stiftbasierte Systeme, die für Vorträge oder Präsentationen zunehmend an Bedeutung gewinnen, sind die so genannten interaktiven elektronischen Whiteboards. Hierbei handelt es sich gewissermaßen um die elektronischen Nachfolger klassischer Kreidetafeln, wobei die Stifteingaben während des Schreibvorgangs digital erfasst und gespeichert werden können. Geschrieben wird hierbei, abhängig vom verwendeten Gerät, entweder *a*) mit Tintenstiften auf einem klassischen analogen Whiteboard, welches um Sensoren zur Verfolgung der Stiftposition erweitert wird (siehe Abschnitt 3.3), *b*) mit speziellen elektronischen Stiften auf tafelgroßen Bildschirmen (beispielsweise das *Liveboard*-System der Firma Xerox [EBG⁺92]) oder *c*) auf kleineren Digitalisiertablets oder TabletPCs, während die Ausgabe mittels Projektor erfolgt.

Während die Systeme der Gruppe (*a*) lediglich die digitale Erfassung von geschriebenen oder skizzierten Eingaben ermöglichen, ist bei den Geräten der Gruppen (*b*) und (*c*) eine echte Interaktion des Benutzers mit dem System möglich. Das bedeutet etwa, dass Präsentationsfolien ergänzt oder annotiert werden können. Beispiele für solche Anwendungen sind etwa das *Tivoli*-System, welches eine Anwendung des Xerox-Liveboard [PMMH93] ist, oder die Systeme *E-Chalk* [JKRS06], *Lecturnity* der Firma imc Advanced Learning Solutions und *CrePCaR* (**C**reation, **P**resentation, **C**apture and **R**eplay of **F**reehand **W**ritings in **e**-Lecture **S**cenarios) [BMO04].

2.2.3 E-Book- und digitale Notizsysteme

Unter E-Book-Geräten werden tragbare Computersysteme verstanden, deren Hauptzweck es ist, digitale Bücher und ähnliche Dokumente zu speichern und dem Benutzer zu präsentieren⁵. Zumeist verfügen Geräte dieses Typs nicht über vollständige, integrierte Tastaturen, sondern werden mithilfe weniger Tasten sowie insbesondere mittels Stifteingabe bedient. Hierzu zählen beispielsweise die Geräte *Rocket eBook* der Firma NuvoMedia oder *iLiad* der Firma iRex Technologies (siehe Abbildung 2.4). Verwandte Systeme sind in diesem Rahmen auch Tablet-PCs sowie PDA-Geräte, welche ebenfalls in der Lage sind, dem Benutzer entsprechende digitale Dokumente zu präsentieren.

Unter anderem *Götze et al.* haben in [GSS02a, GSS02b, Göt06] mit dem *Intelligent Pen* eine Metapher entwickelt, die einen ähnlichen Umgang mit digitalen E-Books ermöglicht, wie der Benutzer dies von klassischen Büchern kennt. Insbesondere die Möglichkeit, digitale Dokumente mit Markierungen, Unterstreichungen oder Notizen zu versehen, sind wichtige Elemente dieser Metapher.

⁵Vereinzelt werden unter dem Begriff *E-Book* bzw. *E-Buch* die einzelnen Buchdateien anstatt der zu deren Anzeige verwendeten Geräte verstanden.

Ähnliche Ansätze wie der *Intelligent Pen* wurden in der Literatur untersucht, etwa das *XLibris*-System [MPGS99, MPGS01], die Systeme *LiveNotes* und *NotePals* [Lan99, LD99], das *Inkteractors*-System [CTR⁺08] oder die Webseiten-Annotationssysteme von *Ramachandran* und *Kashi* [RK03] sowie von *Hiraki et al.* [HYS05]. Desweiteren existieren Systeme für die Erfassung von Notizen in digitalen Umgebungen, wie etwa das *Virtual Notepad* [PTW98], welches für dreidimensionale Virtual-Reality-Umgebungen konzipiert ist.

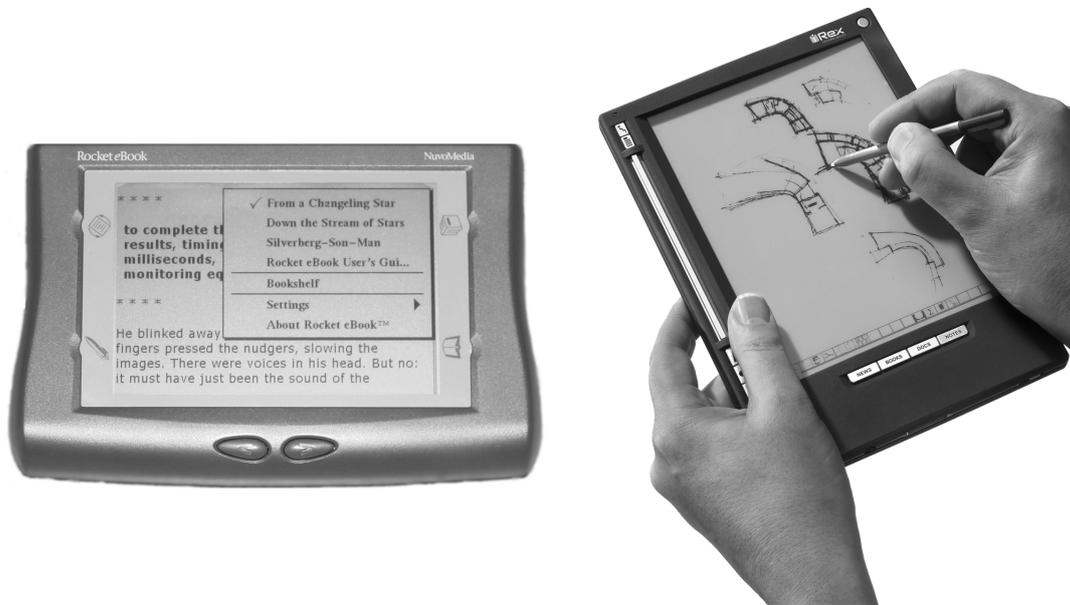


Abbildung 2.4: Zwei Beispiele für E-Book-Geräte, links das *Rocket eBook* [NuvoMedia] und rechts der *iLiad* [iRex Technologies]

2.2.4 Stiftbasiertes Prototyping

Eine weitere Klasse von Systemen nutzt Stifteingaben für das Entwerfen beispielsweise von Internetauftritten, bestehend aus miteinander vernetzten Webseiten [NLHL03] oder von grafischen Benutzerschnittstellen für Computerprogramme [Coy07, CSVV07]. Andere Systeme erlauben die Erkennung und Interpretation von mit dem Stift gezeichneten UML-Diagrammen, analogen elektrischen Schaltkreisen oder chemischen Molekülstrukturen [Dav07]. Einen Überblick der aktuellen Entwicklung in diesem Bereich liefern [PF07, Ren07]. Viele dieser Systeme belassen solche Teile der Stifteingaben, die nicht erkannt werden können, unverändert als eine Art von handschriftlichem Kommentar.

2.2.5 Zusammenfassung

Auch wenn das eigentliche Ziel vieler in diesem Abschnitt erwähnten Systeme und Anwendungen ein anderes ist, so könnten sie doch von den Möglichkeiten der in dieser Arbeit entwickelten Suchfunktionalität für Handschriftdaten profitieren und wären ideale Kandidaten für

2 Verwandte Arbeiten

einen praktischen Einsatz dieser Technik. So ließe sich die stiftbasierte Navigation in Audiiodaten, wie sie etwa durch das *Audio Notebook* realisiert wurde, leicht um eine suchbasierte Navigation erweitern. Hierdurch könnte der schnelle Zugriff auf größeren Datenmengen, wie sie im Laufe der Zeit bei konsequentem Einsatz der entsprechenden Technik zwangsläufig anfallen, verbessert werden. Gleiches gilt auch und gerade für die anderen erwähnten Systeme, wie elektronische Whiteboards, digitale Notizsysteme oder stiftbasierte E-Book-Geräte.

Der Nutzen der Handschriftsuche für die erwähnten Prototypingsysteme aus dem Abschnitt 2.2.4 ist ähnlich. Zum einen könnte nach eventuell vorhandenen handschriftlichen Kommentaren etwa in handgezeichneten Entwürfen für Benutzerschnittstellen gesucht werden. Zum anderen könnte die Suchfunktion auch für die noch uninterpretierten Eingaben selbst, also beispielsweise für gezeichnete Molekülformen oder Diagramme, verwendet werden.

3 Gerätetypen und Datenformate

*Die Feder ist mächtiger als das Schwert, aber nur wenn das Schwert
sehr klein und die Feder besonders groß und spitz ist.*
(Terry Pratchett)

Die digitale Erfassung von Handschriftdaten wird in der Literatur im Wesentlichen unterschieden in die *off-line Erfassung* und die *on-line Erfassung* [TSW90, PS00]. Bei der *off-line Erfassung* wird das Resultat eines Schreibvorgangs, also beispielsweise eine Tintenspur auf Papier, mit einem Scanner digitalisiert und liegt für die weitere Verarbeitung als Farb- oder Helligkeitsverteilung in zwei Dimensionen, das heißt als Bild, vor.

Den Gegensatz zum off-line Ansatz stellt die *on-line Erfassung* dar, bei der nicht das Resultat eines Schreibvorgangs, sondern die Schriftentstehung selbst untersucht wird. Die on-line Erfassung generiert zeitabhängige Daten über die Schreibbewegung – in den meisten Fällen sind dies die Position der Stiftspitze sowie der Stiftdruck auf die Schreiboberfläche zu bestimmten Zeitpunkten. Neben diesen Daten über die Schreibbewegung werden in einigen Fällen zusätzliche oder gänzlich andere Daten bestimmt. Dies können beispielsweise die Kräfte sein [MRMK02, HKS04, KSSS05], die aus verschiedenen Richtungen auf den Stift einwirken, Beschleunigungen [Bis03, JCD03] oder die Stiftneigung [MC97, HYH00, KHH02, KMO03]. All diesen Daten, die bei der on-line Erfassung berücksichtigt werden, ist eigen, dass sie mit fester oder variabler Frequenz *abgetastet* (engl. *sampling*) werden.

In Abbildung 3.1 ist ein Beispiel für die off-line und on-line Erfassung dargestellt. Zu erkennen ist eine Schriftprobe; im oberen Teil als gescanntes Abbild und im unteren Teil als Folge von Abtastpunkten. Der variierende paarweise Abstand aufeinanderfolgender Abtastpunkte resultiert aus einer sich ändernden Stiftgeschwindigkeit während des Schreibprozesses.

Die Erfassung handgeschriebener Daten als Bild ist in solchen Fällen sinnvoll und nötig,

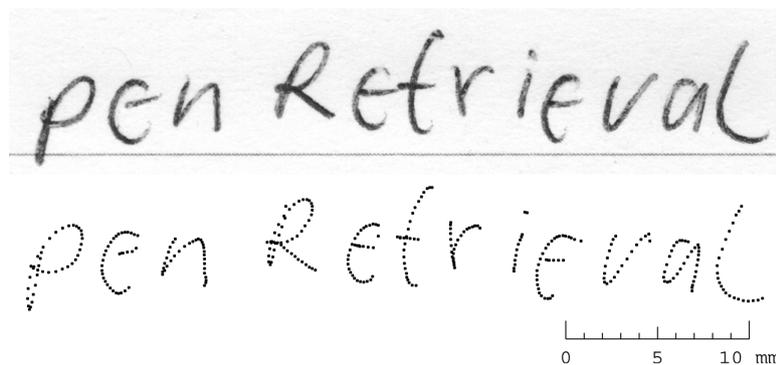


Abbildung 3.1: Beispiele für eine off-line und on-line erfasste Schriftprobe

in denen die Bewegungsdaten nicht vorliegen, also generell *im Nachhinein*. Dies umfasst die digitale Verarbeitung historischer Handschriften [FT01, RKL⁺02, BKD⁺04, Fe106] genauso wie die Erfassung von »Alltagsdokumenten«, beispielsweise Adressen auf Briefen und Postkarten [CHS91, DTLH92, KHP03], oder von handschriftlichen Einträgen in Bankformularen [HBPB⁺97, KG97, KL98], mit dem Ziel der automatischen Verarbeitung dieser Dokumente [Sch01].

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf on-line erfassten handschriftlichen Dokumenten. Die Motivation dafür liegt zum einen in der bereits recht fortgeschrittenen Forschung im Bereich der off-line Verarbeitung, so dass eine Abgrenzung gegenüber existierenden Verfahren schwierig wäre. Eine weitere Motivation ist die zunehmende Verbreitung von entsprechenden Systemen und Geräten für die on-line Erfassung, die eine Suche in solchermaßen aufgezeichneten Handschriftdokumenten relevant machen.

Während im Rahmen der off-line Verarbeitung für den eigentlichen Schreibvorgang lediglich das zum Schreiben übliche »Werkzeug«, das heißt ein herkömmlicher Stift benötigt wird und der Prozess der Digitalisierung erst zeitverzögert technische Geräte (Scanner) erfordert, ist bei der on-line Erfassung bereits zum Schreibzeitpunkt der Einsatz von besonderer Technik nötig, welche die Abtastung der Schreibbewegung realisiert. In den folgenden Abschnitten 3.1 bis 3.5 dieses Kapitels werden die dafür gebräuchlichen technischen Verfahren vorgestellt und erläutert. Das Ziel ist hierbei insbesondere, eine möglichst *allgemeingültige Klassifikation* dieser Verfahren hinsichtlich der ihnen zugrunde liegenden physikalischen Wirkungsweisen aufzustellen. Abschnitt 3.6 beschäftigt sich mit bekannten Datenformaten für die Speicherung und Übermittlung von on-line erfassten Handschriftdaten.

3.1 Optische Positionsbestimmung

Zu den ältesten Varianten der Erfassung von Stiftpositionen zählt die optische Positionsbestimmung, basierend auf so genannten *Lichtgriffeln* (engl. *light pen*). Sie ermöglichen es dem Benutzer, mit dem Stift auf dem Bildschirm Objekte auszuwählen oder einfache Zeichnungen anzufertigen. Lichtgriffel besitzen an der Stiftspitze einen optischen Sensor, also ein elektronisches Bauteil, das bei Lichteinstrahlung ein elektrisches Signal erzeugt. Aufgrund des zeilenweisen Bildaufbaus von Monitoren mit Kathodenstrahltechnik ist es möglich, aus dem genauen Zeitpunkt des elektrischen Signals, welches durch den Lichtsensor erzeugt wird, die aktuelle Position des Kathodenstrahls zu bestimmen [Cot71, NS86]. In Abbildung 3.2 ist der schematische Aufbau sowie das Funktionsprinzip eines Lichtgriffels zu sehen.

Als erste komplexe Anwendung der Lichtstifttechnik gilt das *Sketchpad*-System von *I. E. Sutherland* [Sut63]. Hierbei handelt es sich um ein System zur grafischen Interaktion mit dem Computer, welches es dem Benutzer unter anderem gestattet, auf dem Bildschirm zu zeichnen. Der technologische Vorgänger des Lichtstiftes ist die *Light-Gun*, die für die Bedienung von Radarschirmen des SAGE Systems (*Semi-Automated Ground Environment*) im nordamerikanischen Luftverteidigungssystem NORAD eingesetzt wurde [Aro67, ADD68, Roc00, Ros88, S. 64f]. Dabei handelt sich um ein Gerät mit ähnlicher Technik wie der Lichtstift, lediglich in einem größeren und dadurch unhandlicheren Formfaktor. Dies bedingt, dass sich die Lightgun nicht zum Zeichnen oder Schreiben eignete und primär für Zeige- und Auswahloperationen

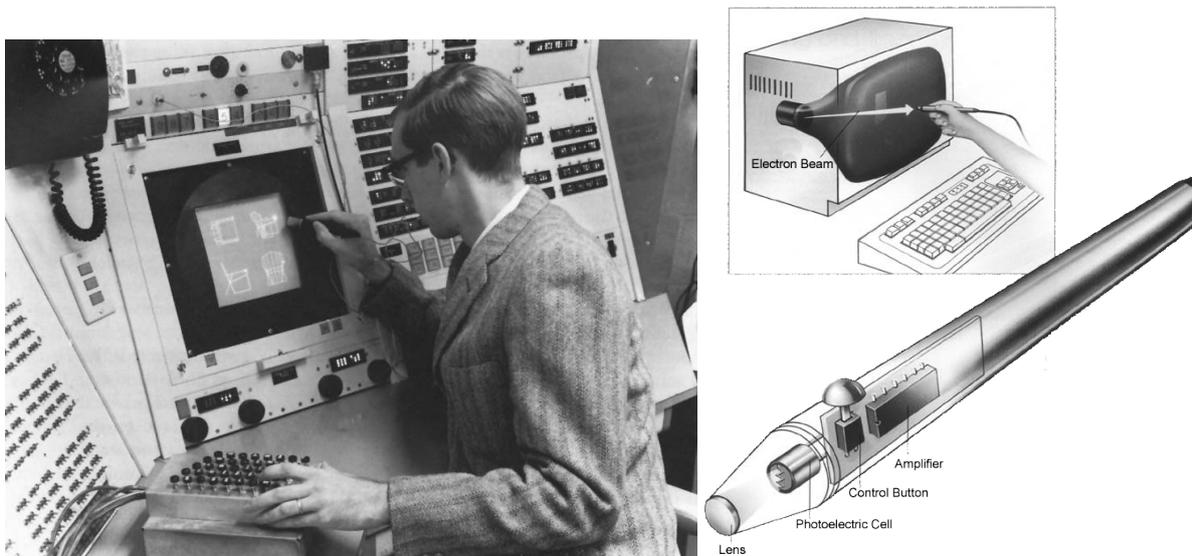


Abbildung 3.2: *Sketchpad*-System von Sutherland [Sut63] und Funktionsweise von Lichtgriffeln [Car03]

auf dem Bildschirm verwendet wurde.

Eine andere Variante der optischen Bestimmung von Stiftpositionen verwendet eine oder mehrere Digitalkameras, die die Schreiboberfläche erfassen. Mittels bilderkennender Verfahren wird in den Videobildern die Stiftspitze oder die beim Schreiben erzeugte Tintenspur vom Hintergrund segmentiert. Aus diesen Daten werden die on-line Bewegungsinformationen berechnet. *Munich* und *Perona* [MP98, MP99, Mun00, MP02] verwenden diese Technik für eine biometrische Personenverifikation mittels Unterschrift. Bei diesem System wird in der Abfolge der Videobilder die Stiftspitze verfolgt. Zur Initialisierung muss der Benutzer den Stift zu Beginn in einem bestimmten Bereich aufsetzen. Einen anderen Ansatz verfolgen *Bunke et al.* [BSYS99], deren Zielstellung die Handschrifterkennung ist. Sie verwenden nicht die Stiftspitze, sondern die Tintenspur als Ausgangspunkt für weitere Verarbeitungsschritte. Im vorgestellten System wird hierfür ein Stift mit möglichst geringem farbllichem Kontrast zur Schreibunterlage verwendet, welcher die optische Unterscheidbarkeit von Stift und Tintenspur verbessern soll. Durch die Verarbeitung der Tintenspur ist es leicht möglich, Positionen zu bestimmen, in denen sich der Stift nicht unmittelbar auf der Schreiboberfläche befand. Diese Erkennung stellt für das Verfahren von *Munich* und *Perona* ein Problem dar. Ein weiteres videobasiertes System zur Stiftverfolgung und Handschrifterkennung wurde von *M. Wienecke* in seiner Doktorarbeit [Wie03] entwickelt, welche Techniken aus der on-line und der off-line Erfassung kombiniert, um dem Problem der zeitweisen Verdeckung der Stiftspitze zu begegnen sowie um die Erkennungsgenauigkeit zu verbessern. Weitere Verfahren zum Einsatz von Videokameras für die Stiftpositionsbestimmung finden sich in [EBG⁺92, Wei93, Rob95, SF96, RSW⁺97, RJ98, LT03, Bér03, Mor05].

Eine gewisse Ausnahme unter den kamerabasierten Geräten zur Schriftdatenerfassung stellt das *Memo-Pen*-System von *Nabeshima et al.* dar [NYAT95]. Der *Memo-Pen* ist ein Stift, der mit einer Kamera ausgestattet ist, welche die Tintenspur erfasst (siehe Abbildung 3.3). Da

3 Gerätetypen und Datenformate

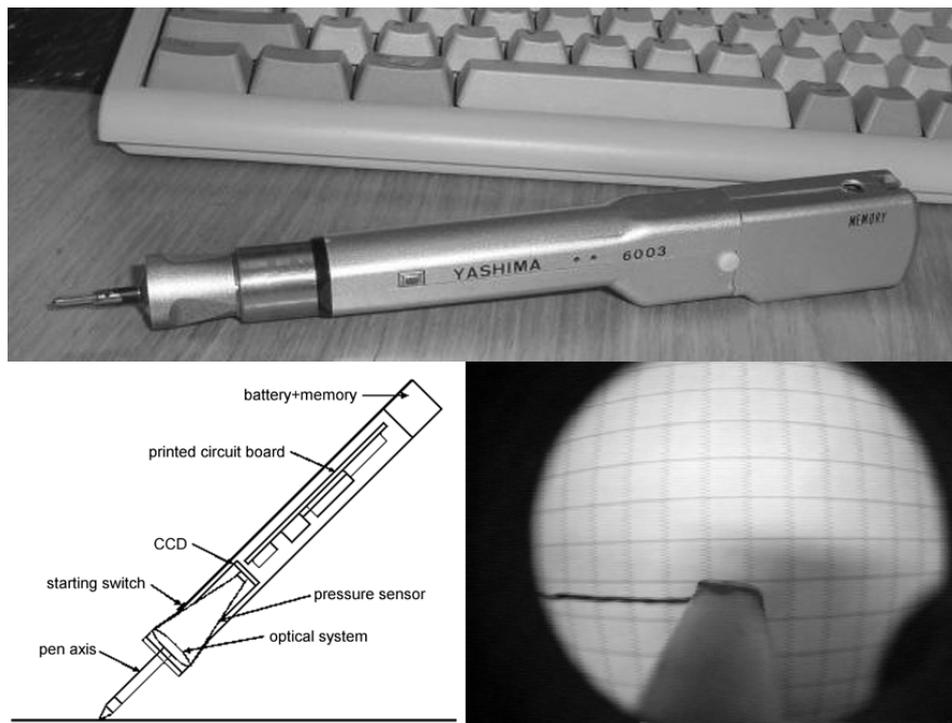


Abbildung 3.3: Memo-Pen – Bild des Prototypen (oben), schematischer Aufbau (unten links), Sicht der Stiftkamera auf die Schreiboberfläche (unten rechts) [YA95]

die Kamera im Stift eingebaut ist statt ortsfest nahe der Schreiboberfläche, ändert sich während des Schreibprozesses laufend ihre Position. Aus den Einzelbildern der sich bewegenden Kamera sowie aus den dabei aufgezeichneten Teilen der Tintenspur setzt die Software des Systems nach dem Schreiben ein Bild der kompletten Handschrifteingabe zusammen. Das heißt, obwohl die Datenerfassung on-line-typisch erfolgt, ist das Resultat eine off-line Repräsentation des Handschriftdokumentes.

Eine weitere Art der optischen on-line Schriftdatenerfassung basiert auf einem Verfahren, das die schwedische Firma Anoto AB [Ano07a] entwickelt hat. Hierfür wird eine Kombination aus speziellen Stift-Geräten sowie einer mit einem feinen Muster bedruckten Schreiboberfläche benötigt. Die Stifte verfügen über eine Infrarotkamera nahe der Stiftspitze, welche das auf die Papieroberfläche gedruckte Punktmuster erfasst (siehe Abbildung 3.4). Die Punkte sind quadratisch angeordnet und haben einen mittleren Abstand zueinander von 0,3 mm. Die Punkte haben einen Durchmesser von 0,1 mm und sind jeweils so verschoben, dass sie eine von vier möglichen Positionen (oben, unten, links oder rechts von der Mittellage) einnehmen. Jeder Punkt kann auf diese Weise 2 Bit ausdrücken. Die Verarbeitungssoftware in den Stiften errechnet aus einem Muster von 6×6 Punkten die exakte Position innerhalb des Blattes sowie eine eindeutige Blattidentifikationsnummer. Laut [Ano06a] ist es auf diese Weise möglich, eine Papierfläche in der Gesamtgröße von etwa 60 Millionen km^2 abzubilden. Die konkrete Art der Kodierung einer Position in diesem Punktmuster wird von Anoto AB nicht publiziert, es werden aber Lizenzen für die Erstellung der Muster an Hersteller erteilt.

Die entsprechenden Stifte für den Umgang mit dieser Art von Papier werden von einer

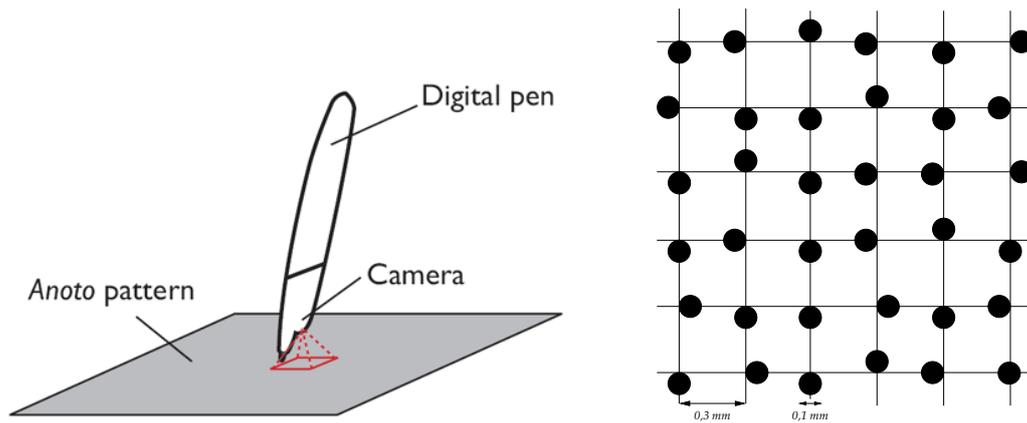


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Anoto-Technologie (links) [Ano07a], Beispiel für die Punktanordnung eines Anoto-Musters zur Kodierung einer Papierposition (rechts)

Reihe von Firmen entwickelt und hergestellt [Hit07, Log07, Nok07, Son07]. Die Geräte unterscheiden sich hinsichtlich Form, Speicherkapazität und Art der Datenübertragung. Während ältere Geräte über eine Art Ladestation mittels USB-Anschluss (*Universal Serial Bus*) mit dem Computer kommunizierten, können neuere Geräte die gespeicherten Schreibinformationen mittels Bluetooth-Funktechnik übertragen. Empfänger können dabei neben Personalcomputern beispielsweise auch Mobiltelefone sein [Sil01, GMRÖ06, Ano07b]. Das aktuelle oder geplante Einsatzfeld von Geräten, die auf Basis der Anoto-Technik arbeiten, ist sehr weit gefächert. So wurden diese Geräte neben naheliegenden Aufgaben von Notizdaten- und Dokumentenerfassung beispielsweise auch für die biometrische Signaturerkennung [SVO07] verwendet. Untersucht wird ebenfalls die Verwendbarkeit dieser Stiftgeräte für die Wählerstimmenerfassung bei Parlamentswahlen [Bei05, VV07, Sie06, Sta06] mit dem Ziel der vereinfachten, da automatisierbaren Stimmauszählung¹.

Eine spezielle Ausprägung der Anoto-Technologie wird durch die Geräte der Firma LeapFrog Enterprises [Lea07] realisiert, die Stiftgeräte für Kinder herstellt, welche komplett ohne den Einsatz externer Computer arbeiten und sämtliche notwendige Software, wie etwa Text- und Zeichenerkennung im Gerät implementieren [Pog05, LGL06]. Da diese Geräte über einen eingebauten Lautsprecher verfügen, können sie akustisch auf Stifteingaben des Benutzers reagieren. Auf diese Weise wurden unter anderem Spiel- und Lernanwendungen realisiert.

Die Handschriftdaten werden bei dem in dieser Arbeit unter anderem verwendeten Stiftgerät *ioPen* der Firma Logitech mit einer variablen Rate von etwa 20-50 Hz abgetastet. Die Positionskoordinaten der Stiftspitze werden von diesen Geräten in *Anoto Units*² gespeichert. Die Druckinformation der Stiftspitze wird als Wert im Bereich von 0 bis 126 erfasst; die Zeitinformation pro Abtastpunkt wird vom Stift als absoluter Wert in Millisekunden seit 0:00 UTC, 1. Januar 1970 gespeichert [Ano06b].

¹Laut aktuellen Berichten in der Tagespresse wird aufgrund von Bedenken hinsichtlich der Prinzipien der geheimen und gleichen Wahl jedoch vorerst auf den Einsatz dieser Geräte für die Stimmauszählung verzichtet.

²Acht *anoto units* (au) entsprechen einem *anoto dot* (ad), was wiederum 0,3 mm entspricht. Damit ergibt sich bei Verwendung von au als Einheit eine Auflösung von 677,33 ppi (*points per inch*) [Pop06].

3 Gerätetypen und Datenformate

Ein der Anoto-Technologie sehr ähnliches Verfahren zur Kodierung der Position auf der Papieroberfläche wird von *O. F. Sekendur* in [Sek98] beschrieben. Statt eines Musters, bestehend aus zueinander versetzt angeordneten Punkten (Abbildung 3.4 rechts), verwendet Sekendurs System ein Punktmuster, wie es in Abbildung 3.5 zu sehen ist. Die Kodierung der Position innerhalb des Musters geschieht, anders als bei der Anoto-Technologie, nicht durch eine systematische Verschiebung einzelner Punkte gegenüber einer Mittellage. Stattdessen enthält jeder Punkt Informationen in Form von unterschiedlichen geometrischen Strukturen. Die für das Lesen dieses Musters nötigen Stifte sind jedoch am Markt nicht erhältlich, da es sich aller Wahrscheinlichkeit nach nur um eine prototypische Umsetzung gehandelt hat.

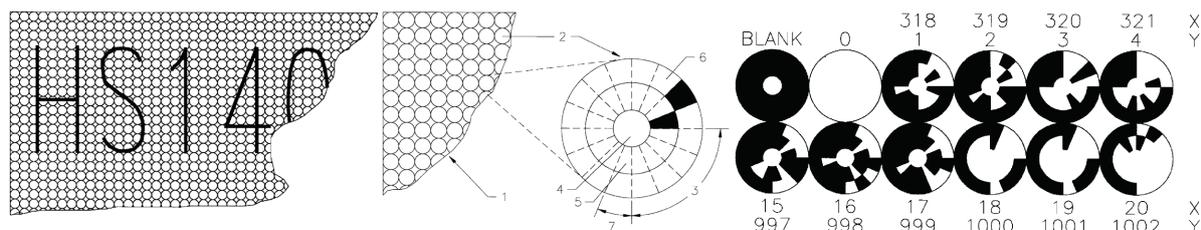


Abbildung 3.5: Alternative zur Anoto-Technologie nach [Sek98]

Eine gewisse Verwandtschaft zur Anoto-Technologie (Kombination aus Sensorstiften und speziellen Papieroberflächen) besitzen auch die *i-pen Mouse* Geräte [Fin07] der Firma FingerSystem Inc. – siehe Abbildung 3.6. Diese Geräte besitzen einen optischen Sensor nahe der Stiftspitze, mittels dessen die relative Bewegung der Schreiboberfläche während der Schreibbewegung bestimmbar ist. Diese Technik ist vergleichbar mit jener, die auch in optischen Mäusen zum Einsatz kommt [HR81, Owe05].



Abbildung 3.6: Optisches Stiftgerät i-pen Mouse

3.2 Elektrostatische und elektromagnetische Positionsbestimmung

Die für Digitalisieretablets und TabletPCs aktuell am weitesten verbreite Technik zur Bestimmung von Stiftpositionen beruht auf elektromagnetischen Feldern. Als Vorläufer aktueller Tablettgeräte gilt das seit 1963³ kommerziell verfügbare System *RAND Tablet* [DE64] der RAND Corporation. Dieses auch unter dem Namen *Grafacon* bekannte Gerät bestand aus einer Schreibunterlage, die mit einem Gitter aus Kupferbahnen durchzogen war (Abbildung 3.7), einem Stift, der mit einem kapazitivem Sensor in der Spitze ausgestattet ist und einer Steuereinheit. Die Steuereinheit schaltet in einem bestimmten Takt eine Spannung auf einzelne Bahnen des Gitters und der Stift ist in der Lage, mittels des Sensors das entstehende elektrische Feld festzustellen. Aus dem Zeitpunkt und der genauen Signalfolge der auftretenden elektrischen Felder kann ermittelt werden, welchem Kreuzungspunkt des Gitters der Stift am nächsten ist⁴.

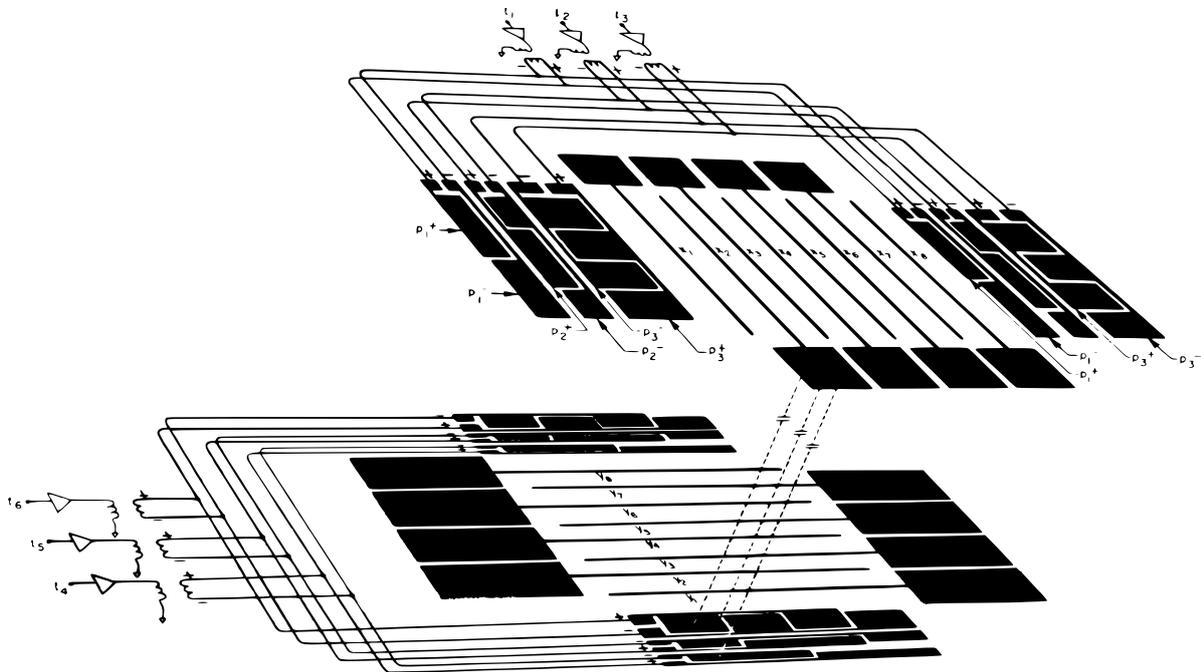


Abbildung 3.7: Gitteranordnung zur elektrostatischen Bestimmung der Stiftposition beim RAND Tablet [DE64]

Mit einer aktiven Schreibfläche von etwa 25×25 cm und je 1.024 horizontalen und vertikalen Kupferbahnen besaß das RAND Tablet eine räumliche Auflösung von 100 ppi⁵. Die Abtastrate betrug mindestens 100 Hz. Da die kapazitive Positionserkennung auch durch dünne

³Laut [Mey95] wurden erste Prototypen bei RAND bereits ab 1956 entwickelt.

⁴»When the pen's probe [...] approaches the grid, which generates electrostatic signals, it receives a signal which it transmits through a tether to the tablet controller. The controller calculates the coordinates from the current position of the wire that sends the signal.« [Mey95, S. 53]

⁵In der Literatur ist die Bezeichnung der relativen Auflösung für die Positionsabtastrung von Stiften uneinheit-

3 Gerätetypen und Datenformate

Lagen Papier oder ähnliche nichtmetallische Materialien hindurch funktionierte, war eines der Einsatzgebiete die Digitalisierung von beispielsweise Landkarten. Später wurde das RAND Tablet unter anderem auch für die grafische Eingabe von chinesischen, japanischen und hebräischen Schriftzeichen sowie mathematischen Symbolen verwendet [HDK68].

Aktuellere Digitalisiertabletts sowie TabletPCs verwenden zur Erkennung der Stiftposition statt elektrischer elektromagnetische Felder. Hierbei erfolgt die Kopplung zwischen Stift und dem Tablettgerät nicht kapazitiv sondern induktiv. Dabei ist es entweder möglich, dass durch eine Wechsellspannung in den Leiterschleifen des Tablettgerätes ein elektromagnetisches Feld erzeugt wird, welches durch eine Spule im Stift eine Induktion hervorruft. Daraus wird die Stiftposition ermittelt. Die Alternative dazu besteht darin, dass der Stift ein elektromagnetisches Feld erzeugt, welches durch die Leiterschleifen im Tablett aufgefangen und lokalisiert wird [Mey95]. Es wird in diesem Zusammenhang unterschieden zwischen Stiftgeräten ohne eigene Stromversorgung, also solche, die die benötigte Energie aus dem elektromagnetischen Feld des Tabletts beziehen, und Stiften, die eine eigene Stromversorgung besitzen, also über Batterien verfügen oder über ein Kabel versorgt werden.

Die Technik der elektromagnetischen Positionsbestimmung wird von einer Reihe unterschiedlicher Gerätetypen verwendet. Die am weitesten verbreitete Variante sind die bereits erwähnten Digitalisiertabletts, deren primäres Einsatzgebiet Designaufgaben am Computer sind (beispielsweise rechnergestützte Konstruktion (engl. *CAD – computer aided design*) oder Grafikdesign). In Abbildung 3.8 ist solch ein Digitalisiertablett zu sehen.

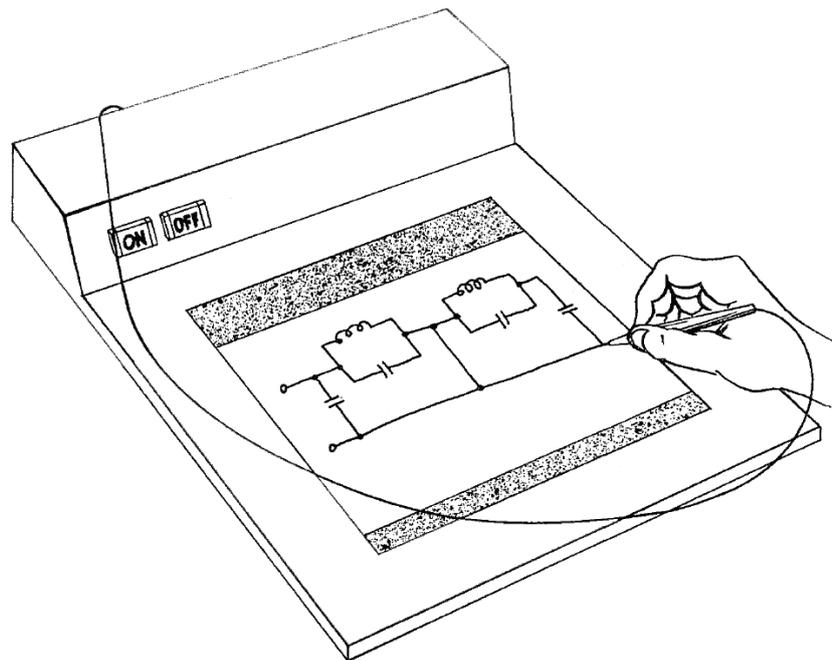


Abbildung 3.8: Tablettgerät für die Digitalisierung von Zeichnungen [Der72]

Neben diesen Tabletts, deren einzige Aufgabe die Dateneingabe ist, gibt es Kombinationen und reicht von dpi (*dots per inch*) über lpi (*lines per inch*) bis ppi (*pixels per inch* oder *points per inch*). In dieser Arbeit wird einheitlich die Bezeichnung ppi – *points per inch* verwendet.

3.2 Elektrostatische und elektromagnetische Positionsbestimmung

nen bestehend aus einem Flüssigkristallbildschirm (engl. *LCD – liquid crystal display*) und einem darunterliegenden Digitalisiertablett. Dies ermöglicht es, mit dem Stift auf dem Bildschirm zu schreiben. Dadurch ist eine direkte grafische Reaktion auf Stiftaktionen unmittelbar an der Position der Stiftpitze möglich, wie zum Beispiel eine so genannte *virtuelle* oder *digitale Tintenspur* (engl. *virtual/digital ink* [PWC95]). Solche Kombinationen aus Bildschirm und Tablett gibt es als externe Monitore für Arbeitsplatzrechner sowie als so genannte Tablet-PCs, das heißt in Form eines Laptop-Gerätes mit stiftsensitivem Monitor. Die aktuell auf dem Markt befindlichen Bildschirmgeräte mit Stifteingabe verwenden überwiegend die Technik der Firma Wacom [Wac07] zur Erfassung der Stiftbewegung. Bei den TabletPCs wird unterschieden zwischen solchen Geräten, die ähnlich einem herkömmlichen Laptop-Computer über eine Tastatur verfügen (so genannte *Convertibles*) sowie solchen ohne Tastatur (so genannte *Slates*), deren hauptsächliche Eingabemodalität also der Stift ist⁶. Abbildung 3.9 zeigt den Aufbau eines TabletPC sowie des zugehörigen Stiftes. Zu erkennen ist unter anderem die Anordnung der Sensorfläche unter dem Bildschirm.

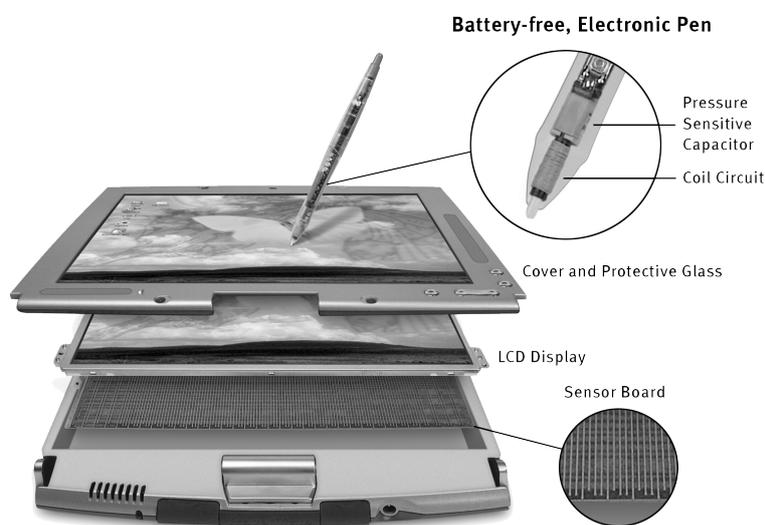


Abbildung 3.9: Schematischer Aufbau eines TabletPCs [Wac07]

Als dritter Gerätetyp mit elektromagnetischer Positionsbestimmung existieren die digitalen Schreibblöcke oder Klemmbretter. Hierbei handelt es sich um Geräte, bei denen der Benutzer mit einem Stift mit Mine (engl. *inking pen*) auf herkömmlichem Papier schreibt. Ein Sensorfeld, das sich unter dem Papier befindet, zeichnet die Stiftbewegungen während des Schreibens auf und speichert diese Daten für eine spätere Verarbeitung. Eine der ersten Varianten solcher digitalen Schreibblöcke war das von IBM entwickelte *CrossPad*⁷, welches in der ein-

⁶Eine gewisse Sonderstellung nimmt das E-Book-Gerät *iLiad* der Firma iRex Technologies [iRe07] ein. Wie ein aktueller TabletPC ist es mit Wacom-Technik zur Stifteingabe ausgestattet, verfügt aber über ein eInk-Display statt LCD.

⁷»The CrossPad has a pen and paper interface along with the ability to digitally capture the (x, y) position of the pen tip using an RF transmitter embedded in the pen. The pen position is sampled at a constant rate of 132 samples per second and the device has a resolution of 0.1 mm along the x and y axes.« [NJ04]

schlägigen wissenschaftlichen Literatur oft Erwähnung fand [Aus98, LD99, Lan99, NJ04], jedoch seit 2001 nicht mehr vertrieben wird. Weitere vergleichbare Systeme sind beispielsweise das *CyberPad* der Firma Adesso [Ade07] oder das *DigiMemo* [Hei05] der Firma ACE-CAD [ACE07]. Das in dieser Arbeit unter anderem verwendete Gerät *DigiMemo A501* besitzt eine räumliche Auflösung von etwa 1.000 ppi und eine aktive Schreibfläche in der Größe von 150×211 mm (DIN A5). Die Stiftposition wird mit einer Rate von 100 Hz abgetastet und die Druckinformation des Stiftes binär erfasst (*Stift aufgesetzt/Stift abgesetzt*).

3.3 Akustische Positionsbestimmung

Eine andere Methode zur Bestimmung von Stiftpositionen basiert auf der akustischen Triangulation. Hierbei wird die Laufzeit des Schalls in der Luft zwischen mindestens zwei festen Punkten sowie dem Stifteingabegerät gemessen und anhand der als bekannt angenommenen Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in Luft die Position der Schallquelle ermittelt.⁸

Eines der ersten akustischen Systeme zur Positionsbestimmung von Stiften war *The Lincoln WAND* [Rob63, Rob66], entwickelt von *Lawrence R. Roberts* am Lincoln Laboratory des MIT. »*The Lincoln WAND* ist ein Gerät zur dreidimensionalen Positionsbestimmung. Das System besteht aus vier Ultraschallquellen und einem Stift als Empfänger.«⁹ Während sich bei dem Lincoln-WAND-System das Mikrofon im Stift befand und die Schallquellen ortsfest montiert waren, wurden bei späteren Systemen die Mikrofone zumeist fest positioniert und die Stifte mit Schallquellen ausgestattet. Hierbei wurde vereinzelt Schall im für Menschen hörbaren Bereich [BB70], in den meisten Fällen jedoch Ultraschall verwendet [Bru80]. Aktuelle Stiftsysteme, die Schall zur Positionsermittlung verwenden, sind beispielsweise das *mimio Xi* [Che00] der Firma Virtual Ink und das *eBeam Whiteboard* [Lui07] der Firma Luidia, sowie die technisch zueinander sehr ähnlichen Geräte der Firmen Pegasus Technologies [Peg07] (*PC Notes Taker* und *Mobile Notes Taker*), EPOS Technologies (*EPOS Digital Pen*) und Seiko (*InkLink* [MKST04, MK06]). Bei den Systemen *mimio* und *eBeam* handelt es sich um Zusatzgeräte für herkömmliche Whiteboards, wie sie in Konferenzräumen zum Einsatz kommen. Diese Zusatzgeräte werden seitlich oder oberhalb des Whiteboards befestigt. Sie verfügen über zwei Mikrofone, die die Ultraschallsignale auffangen, welche von speziellen Stiften ausgesandt werden [Dan05]. Hierbei ist es möglich, verschiedene Stifte voneinander zu unterscheiden, da diese eine jeweils unterschiedliche Kennung übermitteln. Die anderen oben erwähnten Geräte sind im Gegensatz zum *mimio* und *eBeam* dafür ausgelegt, Stifteingaben in der Größenordnung von typischen Schreibblöcken (etwa DIN A4) zu erfassen. Die Form der Geräte ist so gestaltet, dass sie mittels einer Klammer am oberen Rand der Schreibunterlage befestigt werden können.

In Abbildung 3.10 ist der schematische Aufbau des Pegasus PC NotesTaker-Gerätes zu

⁸Neben der akustischen Triangulation, also der Messung und Auswertung der Laufzeitverzögerung von Schallwellen, ist in der Literatur auch die Verwendung von Radiowellen beschrieben [McE04]. Ein praktischer Einsatz dieser auf Radiowellen basierenden Technik konnte jedoch nicht ausgemacht werden, weswegen sie hier nicht näher betrachtet werden soll.

⁹»*The Lincoln WAND is a three-dimensional position sensing input device. The apparatus consists of four ultrasonic transmitters and a hand-held receiving stylus.*« [Roo67]

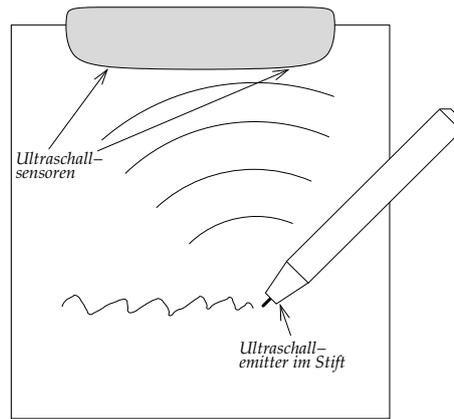


Abbildung 3.10: Ultraschallbasierte Bestimmung der Stiftposition

sehen, welches unter anderem in dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Der Stift ist mit einem Mikroschalter in der Stiftspitze ausgestattet. Dieser Schalter schließt, wenn der Stift auf die Schreiboberfläche aufsetzt. Solange dieser Kontakt geschlossen ist, wird durch ein piezo-keramisches Bauteil Ultraschall emittiert, welcher durch zwei Ultraschallsensoren erfasst wird¹⁰.

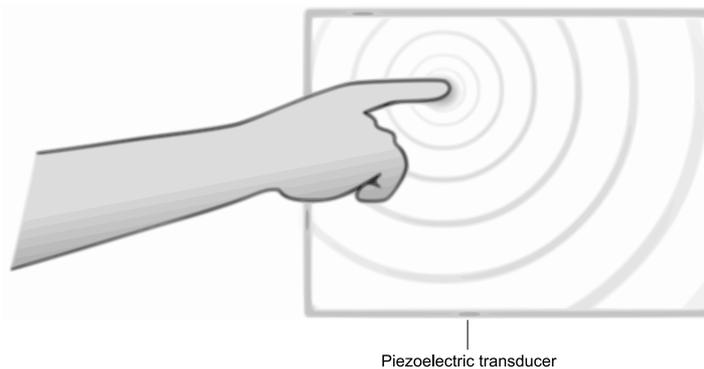


Abbildung 3.11: Bestimmung der Stiftposition mittels Acoustic Pulse Recognition [Elo07]

Neben den erwähnten Systemen, die darauf basieren, dass ein aktiver Stift Schall mittels eines speziellen Bauteils emittiert, existiert eine weitere Technologie namens *Acoustic Pulse Recognition* [Elo07]. Hierbei berührt der Benutzer die Displayoberfläche mit dem Finger oder einem Stift. Es wird auf mechanischem Wege ein minimaler akustischer Impuls in Form einer Schwingung der Displayoberfläche ausgelöst, welche durch entsprechende Sensoren am Rande des Displays detektiert wird. Die Bestimmung der Position des Auslösers dieses Impulses erfolgt wiederum durch Messung der Laufzeitverzögerungen. In Abbildung 3.11 ist die Funktionsweise dieser Technologie skizziert.

¹⁰Genau genommen wird bei diesen Geräten nicht die Position der Stiftspitze ermittelt, sondern die des Ultraschallmitters, welcher oberhalb der eigentlichen Stiftspitze angeordnet ist. Dies führt in der Praxis zu Fehlern bei der Abtastung, die aufgrund der sich beim Schreiben ändernden Stiftneigung entstehen.

3.4 Resistive-Film-Technologie

Eine weitere Technologie zur Bestimmung der Stiftposition basiert auf der Messung des elektrischen Widerstandes beziehungsweise der elektrischen Potentialdifferenz auf leitfähigen Folien (engl. *resistive film*). Abbildung 3.12 verdeutlicht die Technik: Über einem Display befindet sich eine transparente Folie, die mit einem elektrisch leitfähigen Material (zumeist Indiumzinnoxid; engl. *indium tin oxide*, kurz ITO) beschichtet ist, welches einen relativ hohen Widerstand besitzt [Mey95, S. 53]. An die vier Ecken kann eine elektrische Spannung angelegt werden. Um die horizontale Stiftposition zu messen, wird an die linken und die rechten Elektroden die jeweils gleiche Spannung angelegt (Abbildung 3.12, links). Durch Messung der Potentialdifferenz zwischen der Stiftspitze und Elektroden lässt sich die horizontale Stiftposition ermitteln. Bei einer gleichmäßigen Beschichtung der Folienoberfläche mit dem leitfähigen Material ist der Spannungsverlauf linear zur Stiftposition. Zur Messung der vertikalen Stiftposition wird die Spannung an den Elektroden so verändert, dass oben und unten jeweils die selbe Spannung anliegt (Abbildung 3.12 rechts) [JS02, S. 33].

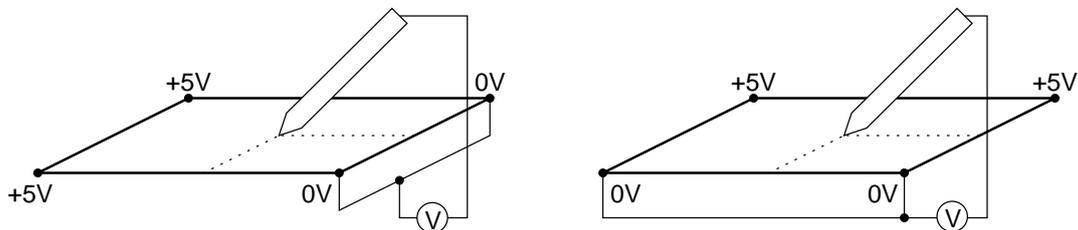


Abbildung 3.12: Bestimmung der Stiftposition (links: horizontale Position; rechts: vertikale Position) mittels Messung des Spannungsabfalls auf einer leitfähigen Oberfläche

Eine frühe Form dieser Technik wurde von *John S. MacDonnald* in [Mac66] beschrieben. Er verwendete statt einer beschichteten Oberfläche ein flaches Behältnis, gefüllt mit Wasser. Auch hier wurde über Elektroden eine elektrische Spannung an die leitfähige Flüssigkeit angelegt und die Potentialdifferenz zwischen dem Stift und den Elektroden gemessen. Abbildung 3.13 zeigt den Aufbau aus [Mac66].

Ein Nachteil des oben beschriebenen Verfahrens zur Bestimmung der Stiftposition mithilfe einer elektrisch leitfähigen Folie ist, dass es einer Art von »Rückkanal« durch den Stift bedarf, mittels dessen die Spannung gemessen werden kann. Um dieses Problem zu umgehen, wurde das Verfahren dahingehend erweitert, dass statt einer nun zwei elektrisch leitfähige Folien verwendet werden, die mit einem geringen Abstand parallel zueinander angeordnet werden. Jede der Folien verfügt über zwei Elektroden auf entgegengesetzten Seiten der Folien (siehe Abbildung 3.14). Bei Berührung der oberen Folie mit einem Stift (oder einem ähnlichen Gegenstand) wird ein Kontakt zwischen beiden Folien hergestellt¹¹.

¹¹»Pressure-sensitive tablets have layers of conductive and resistive material with a mechanical spacing between the layers. An electrical potential is applied across one of the resistive layers, in either the x or y position. Pressure from the stylus tip at a point results in the conductive layer picking off the voltage (and thus the position) from the resistive layer. The pressure-sensitive technology has the advantage of not requiring the use of a special stylus.« [TSW90]

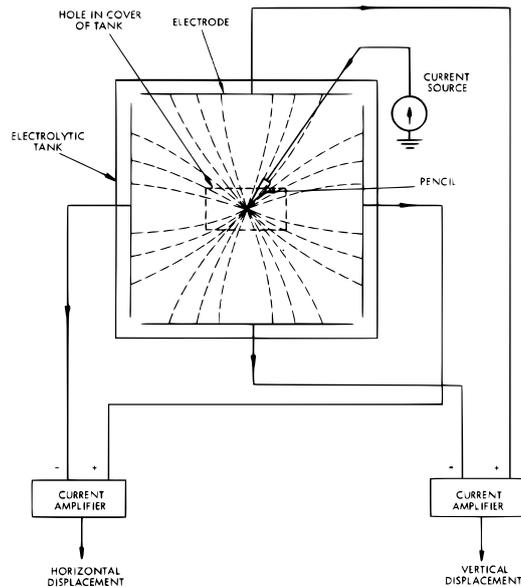


Abbildung 3.13: Bestimmung der Stiftposition durch Messung des Spannungsabfalls in einer leitfähigen Flüssigkeit [Mac66]

Um die horizontale Stiftposition zu bestimmen, wird eine Spannung nur an die obere der beiden Folien angelegt und die Potentialdifferenz wie in Abbildung 3.14 zu sehen gemessen [JS02, S. 33]. Für die Bestimmung der vertikalen Position wird nur an der unteren Folie eine Spannung angelegt. Wie im Verfahren aus Abbildung 3.12 besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Stiftposition und der gemessenen Spannung. Dieses Verfahren mit zwei parallelen Folien kommt in den meisten PDA-Geräten (engl. *personal digital assistant*) zum Einsatz [Fuj02].

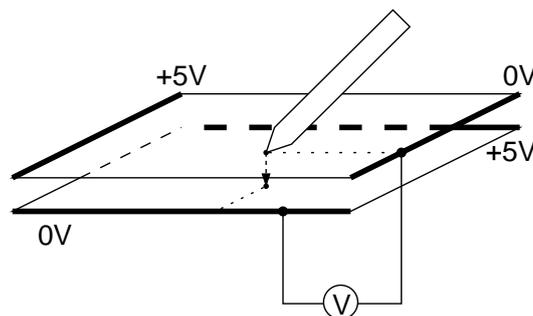


Abbildung 3.14: Bestimmung der Stiftposition bei Verwendung zweier paralleler leitfähiger Folien

3.5 Elektromechanische Positionsbestimmung

Eine aktuell eher selten verwendete Methode zur Ermittlung der Stiftposition beruht auf der Messung von Kräften oder Beschleunigungen sowie der direkten mechanischen Positionsbestimmung.

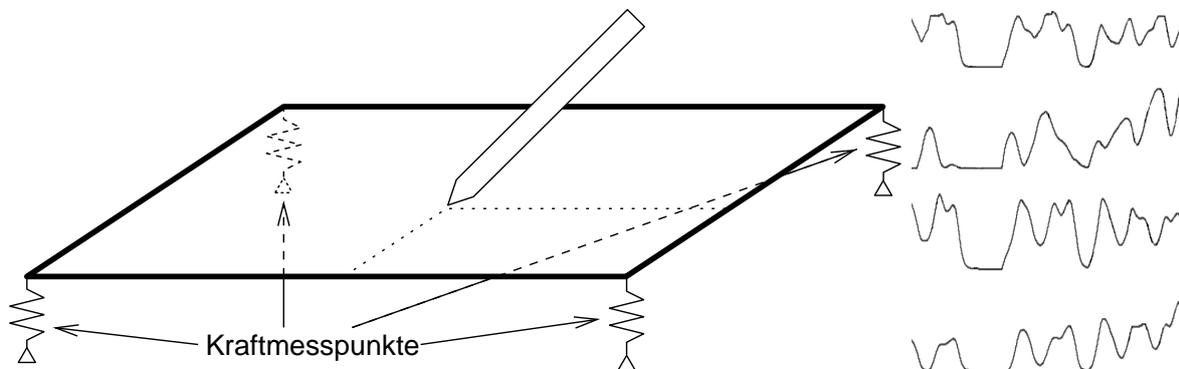


Abbildung 3.15: Schematischer Aufbau eines Handschriftenerfassungsgerätes mit vier Kraftsensoren unter der Schreiboberfläche (links) sowie vier Beispielsignale dieser Sensoren (rechts) [hesy.de]

Ein Gerät zur Bestimmung der Stiftposition mittels Messung der Kräfte, die auf die Schreibunterlage wirken, ist in Abbildung 3.15 (links) zu sehen. Es verwendet eine Reihe von Kraftsensoren, so genannte Wägezellen (engl. *load cell*), die sich unter der Schreiboberfläche befinden und die Kraft messen, welche durch die Stiftspitze ausgeübt wird. Die Stiftposition wird aus den Werten bestimmt, die an den unterschiedlichen Sensoren gemessen werden. Im rechten Teil der Abbildung 3.15 sind die Kraftsignale zu sehen, die bei einer Schrifteingabe auf einem solchen Gerät mit vier Sensoren gemessen wurden. Ein Beispiel für Geräte, die auf diese Weise arbeiten, ist das *HESY* (Abkürzung für Handschriftenerkennungssystem) [Mau01]. Dabei handelt es sich um ein Gerät, das primär zur Erfassung der Unterschrift entwickelt wurde.

Das BiSP-Projekt an der Fachhochschule Regensburg entwickelte eine Reihe verschiedener

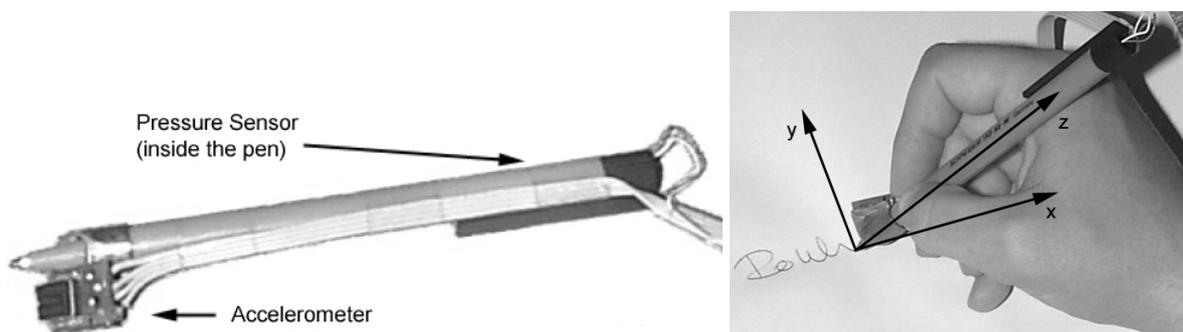


Abbildung 3.16: Biometric Smart Pen, ausgestattet mit Beschleunigungssensoren zur Messung der Schreibbewegung [RMMK01]

Stiftgeräte, deren primäres Ziel erneut die Erfassung der Unterschrift ist [KSSS05]. Der Name *BiSP* steht hierbei für *Biometric Smart Pen*. Das erste Gerät des BiSP-Projektes entstand im Frühjahr 2000 und war mit zwei Beschleunigungsmessern sowie einem Sensor für den Stiftdruck ausgestattet [RMMK01]. In Abbildung 3.16 ist der Aufbau dieses Gerätes (laut [Roh03] als *Acceleration Sensor Pen* bezeichnet) und die Anordnung der Sensoren zu erkennen.

Der Nachfolger dieses ersten BiSP-Gerätes war ein als *MechPen* bezeichneter Druckmessstift (*Pressure Sensor Pen*) [MRMK02, HKS04]. Statt mit Beschleunigungssensoren ist dieser Stift mit Sensoren ausgestattet, welche die Kräfte messen, die auf die Stiftmine aus verschiedenen Richtungen wirken¹². Die Messung der in x- und y-Richtung wirkenden Kräfte erfolgt in Falle des Prototypen des MechPen mittels so genannter Dehnungsmessstreifen (engl. *strain gauge sensors*), wie sie in Abbildung 3.17 zu erkennen sind.



Abbildung 3.17: Druckmessstift *MechPen*; links: mit und ohne Gehäuse [RMMK03], rechts: Detailaufnahme der Sensoren für die Seitenkräfte [Mic07]

Weitere Varianten beziehungsweise Entwicklungsstufen des BiSP sind der *TiltPen*, der *MicPen*, der *OptoPen* und der *OptoMechPen*. Der *TiltPen* ist eine Variante des *MechPen*, der um einen *elektrolytischen Neigungssensor* erweitert wurde, um die Stiftlage zu bestimmen. Der *MicPen* (auch *BiSP Acoustic Pen*) ist mit einem Mikrofon ausgestattet, welches das charakteristische Geräusch während der Schreibbewegung erfasst. Durch die Anbringung des Mikrofon im Inneren des Stiftes, können Hintergrundgeräusche abgeschirmt werden¹³.

Die geplanten Varianten *OptoPen* und *OptoMechPen* sollten neben den Sensoren des *MechPen* zusätzlich über einen optischen Sensor verfügen, wie er beispielsweise auch in optischen Mäusen zum Einsatz kommt [HKS04, Hoo07]. Nicht jeder dieser Sensoren ist geeignet, die Stiftposition zu bestimmen, jedoch sollte im BiSP-Projekt das Zusammenspiel der verschiedenen Stiftsignale für die biometrische Handschriftenanalyse untersucht werden¹⁴ (vergleiche

¹²The pen »consists of three sensors integrated in the pen producing signals in which information about the pressure applied to ballpoint and about the side pressure in x and y direction is involved.« [MRMK02]

¹³»In the MicPen configuration the microphone is placed inside the inner case, such that the recorded signal corresponding to the sound produced during writing is transmitted through the refill to the interior microphone. Undesirable signals like background noise or voiced speech are not detected by this microphone. This is achieved by using sound isolation located between the outer and the inner case.« [HKS03]

¹⁴»Das neuartige biometrische Schreibsystem erfasst multisensoriell die Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie Druckdynamik handgeführter Schreib- und Zeichenbewegungen auf einer beliebigen Unterlage oder frei im Raum. Der Schreibstift ist dem Kugelschreiber ähnlich und misst mittels integrierter Sensorik die Schreibstift-Neigung, den Schreibdruck und das Schreibgeräusch, um aus den handgeführten Schreibbewegungen biometrische Merkmale (angeboren und erworben) [...] zu ermitteln« [KSSS05]

hierzu auch Kapitel 7). Andere Stiftgeräte, die die Schreibbewegung mittels Beschleunigungssensoren erfassen, wurden unter anderem von *Mertens* und *Claesen* in [MC97], von *Cheok*, *Kumar* und *Prince* in [CKP02], von *Joguet*, *Caitu* und *David* in [JCD03] sowie von *Bischoff* in [Bis03] beschrieben.

Einen gänzlich anderen, jedoch ebenfalls elektromechanischen Ansatz zur Bestimmung der Stiftposition verfolgen die Geräte in [GB43, HB71, RR02]. Hierbei handelt es sich um Apparate, die zur Aufzeichnung und mechanischen Reproduktion von handschriftlichen Eingaben verwendet werden. Diese Art von Geräten wird umgangssprachlich als *Autopen* oder *Unterschriftenautomat* (engl. *signing machine*) bezeichnet und dient hauptsächlich dazu, Dokumente automatisiert zu unterzeichnen. In Abbildung 3.18 ist der Mechanismus eines solchen Gerätes dargestellt. Zu erkennen sind zwei über Gelenke bewegliche Arme, wovon der eine an einem Ende fixiert und der andere mit einem Schreibstift ausgestattet ist. In der »Trainingsphase« wird der Stift in einer Schreibbewegung über das Papier geführt, während *Potentiometer* oder andere Sensoren an den Gelenken die jeweilige Winkelinformation messen. In der »automatischen Schreibphase« werden die Arme mittels Motoren an den Gelenken bewegt und ahmen so die Schreibbewegung nach. Bei frühen Modellen der Unterschriftenautomaten erfolgte die Speicherung der Winkelinformationen auf analoge Weise mittels Magnetbändern. Vom Gesichtspunkt der Mechanik sind diese Geräte verwandt mit Pantographen und mit zweidimensionalen Stift-Plottern.

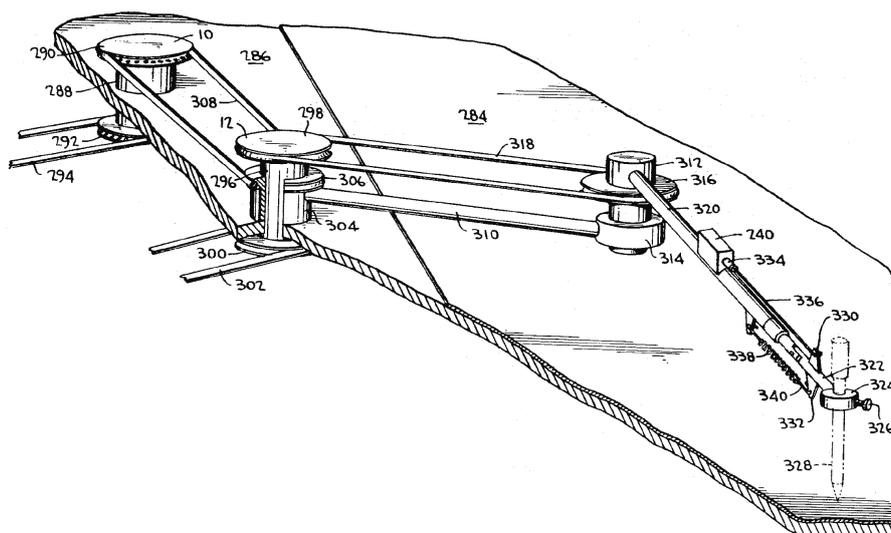


Abbildung 3.18: Detail eines Unterschriftenautomaten [HB71]

Ein früher Verwandter der Autopensysteme war der *Telautograph*, ein Gerät, das 1888 von *Elisha Gray* zum Patent angemeldet wurde. Hierbei handelte es sich um eine frühe Form des Fernschreibers. Auf der Senderseite wird die Stiftposition beim Schreiben auf elektromechanischem Wege gemessen. Dazu ist die Stiftspitze mit zwei Fäden verbunden, welche durch Federmechanismen gestrafft werden. Bei Bewegung des Stiftes werden mittels der Fäden die Einstellungen zweier Drehwiderstände verändert, womit die eigentliche Umsetzung der Bewegung in analoge elektrische Signale realisiert wird. Diese Signale werden drahtgebunden

zu einem Empfänger übermittelt, welcher sie mittels elektromagnetischer Aktoren wieder in Bewegungen umwandelt. In Abbildung 3.19 ist der Aufbau eines Telautographen dargestellt. Der obere Teil der Abbildung zeigt dabei schematisch die Anordnung und Funktionsweise der Sensoreinheit im Sender (links), bestehend aus Fäden, Drehwiderständen und Spannfedern, sowie die Aktoren im Empfänger (rechts).

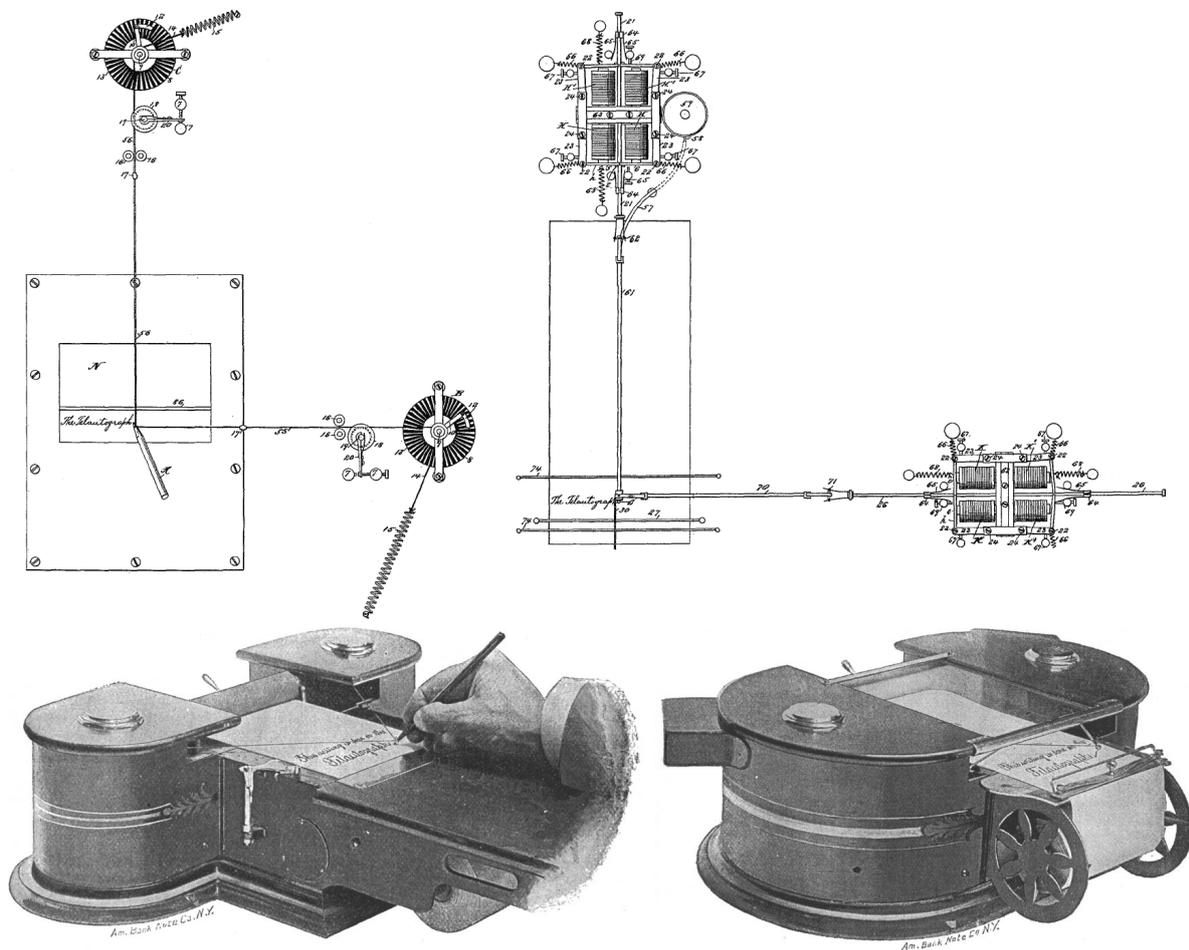


Abbildung 3.19: Fernschreibsystem *Telautograph* von Elisha Gray; oben schematischer Aufbau [Gra88], unten Gerät in Aktion [officemuseum.com]

Als technologischen Nachfolger dieser Art von Geräten, wenngleich mit einem anderen Haupteinsatzgebiet, können die haptischen, dreidimensionalen Ein- und Ausgabegeräte bezeichnet werden, die unter der Bezeichnung *PHANTOM* bekannt wurden [MS94]. In Abbildung 3.20 (links) ist der Aufbau eines solchen Gerätes dargestellt. Wie die Autopen-Geräte verfügt das *PHANTOM* über miteinander verbundene Arme, die durch Gelenke zueinander beweglich sind. Die dreidimensionalen Geräte besitzen jedoch aufgrund ihres Aufbaus eine deutlich größere Anzahl an Freiheitsgraden, im Vergleich zu den Unterschriftenautomaten. Beide Arten von Geräten verfügen jedoch neben den Sensoren zur Messung der aktuellen Gelenkstellungen auch über Aktoren (Motoren) zur aktiven Bewegung der Arme. Dies wird

3 Gerätetypen und Datenformate

im Falle des *PHANTOM* unter anderem für eine haptische Rückkopplung an den Benutzer verwendet. So ist es beispielsweise möglich, mit dieser Art von Geräten einen Blindenstock oder ähnliche, auf dem Tastsinn beruhende Geräte, zu *simulieren* [Sjö02].

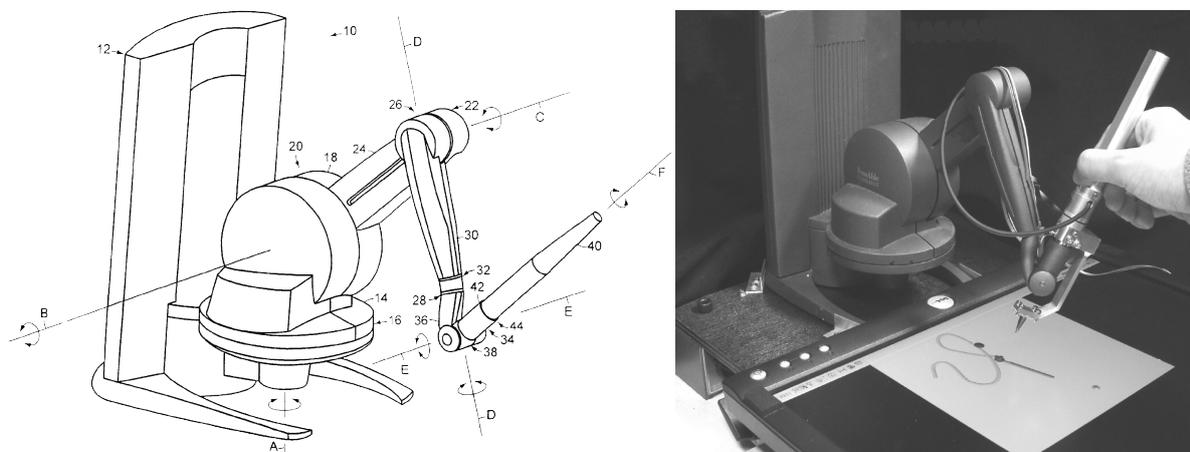


Abbildung 3.20: Aufbau eines haptischen Interfacegerätes [GHW03] und Einsatz zur Schrifteingabe [SKT05]

Die Einsatzgebiete dieser PHANTOM-Geräte zur Stifteingabe erstrecken sich von der biometrischen Benutzerauthentifikation [OAS⁺06, OGSS06, SOA⁺07] über künstlerische grafische Anwendungen in Form von virtuellen Pinseln [BSLM01] bis hin zum interaktiven Trainieren der Feinmotorik der Hand für das Erlernen einer Handschrift [ST05, SGK07, PGBB⁺07].

3.6 Dateiformate für On-line Handschriftdaten

Neben der Erfassung und Digitalisierung von Handschriftdaten mithilfe der verschiedenen Typen von Geräten, wie sie in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels beschrieben wurden, ist auch die Speicherung dieser Daten relevant. Hierbei sind drei Aspekte von besonderer Bedeutung. Zum einen ist es nötig, die on-line Daten in Form der erfassten Abtastpunkte so zu speichern, dass später ein effizienter Zugriff möglich ist, zum anderen ist eine speicherplatzeffiziente Repräsentation wünschenswert, dies nicht zuletzt, um einen schnellen Datenaustausch über Rechnernetze zu ermöglichen. Mit dem letzten Punkt eng verknüpft ist die Forderung nach einer standardisierten Speicherung, die für eine Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen nötig ist.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Datenformate für die Speicherung von on-line Handschriftdaten beschrieben werden.

3.6.1 JOT

JOT (engl. *jot* = Pünktchen; engl. *to jot* = fix notieren) war einer der ersten Ansätze zur standardisierten Speicherung von on-line Schreibdaten [Sla93, Wu04]. Neben weiteren wichtigen

Protagonisten im Bereich des *Pen Computing*, zählten die Firmen *Slate Corporation*, *Lotus*, *Microsoft*, *Apple* zu den Initiatoren der JOT-Spezifikation.

Die JOT-Spezifikation besteht aus einer Reihe von Makro-, Typ- und Strukturdefinitionen in der Programmiersprache C. Aufgrund der Möglichkeit, das Abbild von Variablen und Datenstrukturen direkt, das heißt, ohne Umsetzung in ein für Menschen lesbares Textformat, zu speichern oder zu versenden, ist JOT ein sehr kompaktes Binärformat. Zusätzlich unterstützt JOT Techniken für die verlustfreie und verlustbehaftete Datenkomprimierung¹⁵.

Neben den Daten der horizontalen und vertikalen Stiftposition sah es die JOT-Spezifikation vor, bei Bedarf zusätzliche Werte zu speichern, wie die Stiftwinkel, die Höhe der Stiftspitze über der Schreibfläche, die Kraft, welche auf die Stiftspitze wirkt, den Zustand etwaiger Stifttasten sowie die Farbe und Opazität der zum Schreiben verwendeten Tinte. Entwickler von Anwendungsprogrammen waren frei darin, zu entscheiden, welche Daten sie verwendeten oder ignorieren. Zusätzlich bestand die Möglichkeit, das Format um eigene Attribute zu erweitern.

Mit dem wirtschaftlichen Ende der *Slate Corporation* im Jahr 1994 und damit dem Verlust der treibenden Kraft hinter JOT zerfiel das Gremium und die Weiterentwicklung des Standards wurde eingestellt [Mey95].

In der recherchierten Literatur findet sich kein Hinweis darauf, dass das JOT-Datenformat jemals praktisch (akademisch oder kommerziell) zum Einsatz kam.

3.6.2 UNIPEN

Als Alternative zu JOT entstand ab 1994 unter der Kontrolle der *Internationalen Vereinigung für Mustererkennung* (engl. *International Association of Pattern Recognition*, IAPR) das Datenformat *UNIPEN* [GSP⁺94, Guy94]. Zu den über 40 Initiatoren von UNIPEN gehörten *IBM*, *Apple*, *Microsoft*, *AT&T*, *Slate*, *CIC* und *HP*.

Anders als das Binärformat JOT besteht UNIPEN aus für Menschen lesbaren englischen Schlüsselwörtern. In Abbildung 3.21 ist der Auszug aus einer UNIPEN-Datei zu sehen. Dargestellt sind neben Informationen über die Formatversion und die Art und Reihenfolge der Koordinaten hauptsächlich die Daten der einzelnen Abtastpunkte; Beginn und Ende der Strokes sind durch `.PEN_DOW` und `.PEN_UP` ausgezeichnet. Neben den Dimensionen *x* und *y* können weitere Informationen, wie Stiftdruck und -winkel oder präzise Zeitinformationen für jeden Abtastpunkt gespeichert werden. Darüber hinaus ist eine hierarchische Zusammenfassung der einzelnen Strokes in Zeichen, Worte, Sätze und/oder Zeilen, Absätze und dergleichen mehr möglich [Guy94]. Ebenfalls ist eine Annotation dieser Zusammenfassungen mit Angaben über beispielsweise den textuellen Inhalt vorgesehen, wodurch es leicht möglich ist, etwa ein Handschrifterkennungssystem zu testen und zu bewerten.

Der Hauptzweck für die Entwicklung des UNIPEN-Datenformates war die Schaffung eines Standards für den Austausch von Handschriftdaten zwischen Systemen verschiedener Geräte- und Softwarehersteller, um auf diese Weise die Sammlung von gemeinsamen Testdatenbanken

¹⁵»Compression refers to a technique of encoding data such that the resulting data, while smaller, is still whole. That is, compression under Jot is loss-less. Compaction refers to a process where certain pieces of less important data are actually omitted from the stream and are possibly reconstructed by the reader of the data.« [Sla93]

3 Gerätetypen und Datenformate

```
.VERSION 1.0
.COMMENT Just an example
.COORD X Y
.POINTS_PER_SECOND 100
.PEN_DOWN
486 -1456
488 -1454
490 -1452
488 -1450
488 -1450
486 -1452
480 -1456
474 -1466
464 -1480
452 -1492
...
.PEN_UP
410 -1553
394 -1574
391 -1582
384 -1590
.PEN_DOWN
370 -1612
370 -1620
370 -1628
372 -1634
372 -1634
...
440 -1626
460 -1626
.PEN_UP
```

Abbildung 3.21: Auszug aus einer einfachen UNIPEN-Datei. Die Zahlenpaare in den mit `.PEN_DOWN` und `.PEN_UP` beginnenden Segmenten stehen für die jeweiligen Stiftkoordinaten in horizontaler und vertikaler Richtung.

unter anderem für Handschrifterkennungssysteme zu vereinfachen und damit die Entwicklung solcher Systeme voranzutreiben¹⁶.

Aus der Sicht des Autors ist UNIPEN der aktuell am weitesten verbreitete und akzeptierte Standard für die Speicherung von on-line Schriftdateien. Dennoch gibt es in jüngster Zeit in der nun gegründeten *International Unipen Foundation* (iUF) Bestrebungen, mit *UPX* (mittlerweile in Version 0.9.5) einen auf XML basierenden Nachfolger für Unipen zu schaffen [ABMV05].

3.6.3 InkML

InkML (*Ink Markup Language*) ist ein im Jahr 2000 durch die Firmen *IBM*, *Intel* und *Motrola* sowie durch die *International Unipen Foundation* ins Leben gerufenes Datenformat auf Basis von XML. Die aktuelle Entwicklung von InkML sieht vor, dieses Datenformat zu einen Standard des *W3C* (*World Wide Web Consortium*) auszubauen [CFF⁺06, Wat07].

Mit InkML wurde versucht, die Beschränkungen etwa von JOT und UNIPEN zu überwinden. Die schwierige Erweiterbarkeit von JOT als Binärformat sowie das Fehlen von Möglichkeiten zur abstrakten Beschreibung (semantische Informationen) auf der einen Seite, und die Fixierung von UNIPEN auf Belange der Handschrifterkennung waren die Hauptgründe [Wu04]. Insbesondere sollte der neue Standard echtzeitfähige Anwendungen wie Instant-Messaging-Dienste und Whiteboard-Systeme sowie interaktive Programme zur Stiftgestenerkennung aktiv unterstützen.

Abbildung 3.22 zeigt das Beispiel einer einfachen InkML-Datei, welche die Schriftzüge des Wortes »hello« beschreibt. Rechts in der Abbildung ist die grafische Gestalt dieses Wortes, inklusive der Abtastpunkte zu erkennen.

Eine Erweiterung von InkML stellt *UPX*¹⁷ dar, mit welchem die *International Unipen*

¹⁶»The expectations of the IAPR regarding UNIPEN are to bring research in HWX [handwriting recognition] closer together and help develop better recognition engines in the near future.« [Mey95]

¹⁷UPX ist aus dem Format *hwDataset* hervorgegangen, welches in den *HP Labs India* entwickelt wurde [BM04].

```

<ink xmlns="http://www.w3.org/2003/InkML">
  <captureDevice manufacturer="..." model="..."
    sampleRate="100" />
  <trace>10 0, 9 14, 8 28, 7 42, 6 56, 6 70, 8 84, 8 98,
    8 112, 9 126, 10 140, 13 154, 14 168, 17 182, 18 188,
    23 174, 30 160, 38 147, 49 135, 58 124, 72 121, 77 135,
    80 149, 82 163, 84 177, 87 191, 93 205</trace>
  <trace> 130 155, 144 159, 158 160, 170 154, 179 143,
    179 129, 166 125, 152 128, 140 136, 131 149, 126 163,
    124 177, 128 190, 137 200, 150 208, 163 210, 178 208, 192 201, 205 192, 214 180</trace>
  <trace> 227 50, 226 64, 225 78, 227 92, 228 106,228 120, 229 134, 230 148, 234 162,
    235 176, 238 190, 241 204</trace>
  <trace> 282 45, 281 59, 284 73, 285 87, 287 101, 288 115, 290 129,291 143, 294 157,
    294 171, 294 185, 296 199, 300 213</trace>
  <trace> 366 130,359 143, 354 157, 349 171, 352 185, 359 197, 371 204, 385 205, 398 202,
    408 191, 413 177, 413 163, 405 150, 392 143, 378 141, 365 150</trace>
</ink>

```

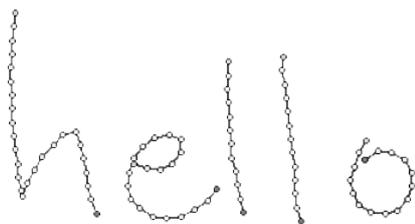


Abbildung 3.22: Beispiel einer einfachen InkML-Datei sowie die zugehörige grafische Darstellung [CFF⁺06]

Foundation versucht, verschiedene Eigenschaften von *UNIPEN* und *InkML* zu verbinden [ABMV05]. Insbesondere die hierarchische Annotation von Handschriftdaten ist hierbei das Ziel. UPX selbst verzichtet explizit auf ein eigenes Datenformat für die Speicherung der eigentlichen Schriftdaten und nutzt stattdessen InkML, welches mittels Verweisen auf externe Quellen eingebunden wird. Abbildung 3.23 zeigt einen Auszug einer UPX-Datei. Zu sehen ist die hierarchische Unterteilung einer Textzeile in Wörter sowie Zeichen.

```

<hwData annotationSchemeRef="#annotationScheme_0" writerRef="#w0629">
  <hLevel id="LINE_0" level="LINE">
    <label id="LINE_0"><alternate rank="1" score="1">Just a test</alternate></label>
    <hwTraces><inkml:traceView traceRef="w0629.inkml#dataSet_0_traces" from="1" to="52"/></hwTraces>
    <hLevel id="WORD_0" level="WORD">
      <label id="WORD_0"><alternate rank="1" score="1">Just</alternate></label>
      <hwTraces><inkml:traceView traceRef="w0629.inkml#dataSet_0_traces" from="22" to="24"/></hwTraces>
      <hLevel id="CHAR_0" level="CHAR">
        <label id="CHAR_0"><alternate rank="1" score="1">J</alternate></label>
        <hwTraces><inkml:traceView traceRef="w0629.inkml#dataSet_0_traces" from="22:91" to="22:161"/></hwTraces>
      </hLevel>
      <hLevel id="CHAR_1" level="CHAR">
        <label id="CHAR_1"><alternate rank="1" score="1">u</alternate></label>
        <hwTraces><inkml:traceView traceRef="w0629.inkml#dataSet_0_traces" from="24:61" to="24:162"/></hwTraces>
      </hLevel>
    <!-- ... -->
  </hLevel>
  <hLevel id="WORD_1" level="WORD">
    <!-- ... -->
  </hLevel>
</hwData>

```

Abbildung 3.23: Beispiel einer UPX-Datei zur hierarchischen Annotation von InkML-Daten

Neben diesen, auf das aktuelle Dokument bezogenen, Daten ist es mit UPX möglich, ausführliche Informationen über den Schreiber zu speichern, wie zum Beispiel Alter, Geschlecht, Rechts-/Linkshändigkeit und seine Fähigkeiten (engl. *skills*) in verschiedenen Schriftsystemen [MVB⁺06].

Ein Format, das von InkML inspiriert wurde, ist *Wink*. Hierbei handelt es sich um einen Teil der Sprache *WandaML*. *WANDA* ist eine Weiterentwicklung des *Forensischen Informationssysteme für Handschrift – FISH* [KP89] des deutschen Bundeskriminalamtes. *WANDA*, wie auch *FISH*, dient der Computerunterstützung von forensischen Schriftsachverständigen und

Die *HP Labs India* sind auch für die weitere Entwicklung von UPX maßgeblich mitverantwortlich.

3 Gerätetypen und Datenformate

soll diesen bei der Untersuchung und Verwaltung von off-line Handschriftdokumenten helfen [FSV⁺04]. Die Sprache *WandaML* ist in der Lage, Bilder von gescannten Handschriftdokumenten mit verschiedenen Informationen zu verknüpfen und somit zu annotieren [FGSV04]. Hierbei ist es durch den Teil *WInk* (*Wanda Ink*) insbesondere möglich, digitale stiftbasierte Markierungen zu speichern sowie die gescannten Tintenspuren der Originaldokumente mittels Stift nachzuzeichnen. In seiner Gesamtheit ist *WandaML* vergleichbar mit *InkML+UPX*. In Abbildung 3.24 ist eine Beispieldatei in *Wink* zu sehen.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!DOCTYPE wink SYSTEM "wink_.dtd">
<wink>
  <device_info>
    <manufacturer name="wacom"/>
    <model label="Cintiq" name="ET-0405A-UV2.0-3" code="9" type="81"/>
    <sensitive_area height="92.8" width="127.6"/>
    <sample_frequency value="200"/>
    <sampling_uniformity value="true"/>
    <channel_info_list>
      <channel_info name="pressure_levels" type="decimal" minimum="0" maximum="512"/>
      <channel_info name="x" type="decimal" minimum="0" maximum="127" accuracy="0.5" resolution="1000" />
      <channel_info name="y" type="decimal" minimum="0" maximum="92" accuracy="0.5" resolution="1000" />
      <channel_info name="z" type="decimal" minimum="0" maximum="10" accuracy="0.5" resolution="100" />
      <channel_info name="penAzimuth" type="decimal" minimum="0" maximum="60" />
      <channel_info name="pen_tilt" type="decimal" minimum="0" maximum="60" />
      <channel_info name="time" type="decimal" minimum="0" maximum="1000"/>
    </channel_info_list>
  </device_info>
  <trace_format>
    <tablet_orientation value="straight"/>
    <channels number_of="7">
      <channel name="pressure_levels"/>
      <channel name="x"/>
      <channel name="y"/>
      <channel name="z"/>
      <channel name="pen_azimuth"/>
      <channel name="pen_tilt"/>
      <channel name="time"/>
    </channels>
  </trace_format>
  <data_block>
    <trace type="pen_down">
      24024 8492 41 0 2250 800 18980 10399 492 1468 1980 580 <!-- ... --> 20678 11345 585 1546 1940 560
    </trace>
    <trace type="pen_up">
      19525 12583 0 1756 1980 540 19175 12749 0 1760 1960 530 <!-- ... --> 17847 13613 0 1800 1960 530
    </trace>
    <trace_context>
      <image_scale value="22" type="dpu"/>
      <image_offset x="50" y="50"/>
      <tablet_scale value="1" type="dpu"/>
      <tablet_offset x="3020" y="1550"/>
      <brush size="100"/>
    </trace_context>
  </data_block>
</wink>
```

Abbildung 3.24: Beispiel einer einfachen *WandaML*-*Wink*-Datei [Guy03]

3.6.4 Weitere Standards und Datenformate

Neben den zuvor beschriebenen Dateiformaten für die Speicherung von on-line Handschriftdaten existieren weitere Formate, die hier nur kurz erwähnt werden sollen. Zum einen sind hierbei Standards zu nennen, die von offiziellen Gremien entwickelt wurden. Die *International Telecommunication Union (ITU)* beispielsweise beschloss 1988 den Standard *ITU-T T.150 – Telewriting Terminal Equipment*, welcher eine genormte digitale Übertragung von Schreibbewegungsdaten über Telefonleitungen spezifizierte.

Einen anderen Zweck verfolgten die *International Organization for Standardization* und die *International Electrotechnical Commission* im Jahr 2005, deren Komitee *ISO/IEC JTC 1/SC 37 (Joint Technical Committee 1, Subcommittee 37 – Biometrics)* den Standard 19794-7 (*Biometric Interchange Data Formats – Part 7: Signature/Sign Time Series Data*) erarbeitete, welcher ein einheitliches Datenformat für die Handschriftbiometrie schaffen wollte [HW05].

Zum anderen existiert eine Vielzahl von proprietären Dateiformaten, die zumeist von den jeweiligen Herstellern der verschiedenen digitalen Schreibgeräte entwickelt wurden und die in fast allen Fällen nicht offen dokumentiert sind. Zu nennen wären hier unter anderem das *Ink Serialized Format (.isf)* der Firma Microsoft oder das Format *Digital Handwriting (.dhw)*, in welchem die Software der *DigiMemo*-Geräte der Firma *ACECAD* ihre Daten speichert.

Aufgrund der Komplexität der oben beschriebenen Formate werden Handschriftdaten in der Praxis jedoch zumeist in generischeren Dateiformaten gespeichert. Oft geschieht dies in Textdateien des Typs *CSV*, deren Zeilen jeweils die Koordinaten der Abtastpunkte sowie weitere Daten wie Zeitstempel oder Stiftwinkel enthalten, welche durch ein definiertes Zeichen (etwa Komma, Semikolon oder Tabulator) voneinander getrennt sind [YCX⁺04, SPC⁺05].

3.7 Zusammenfassung

Alle technischen Geräte und Systeme, die in diesem Kapitel beschrieben werden, ermöglichen die Bestimmung von Daten zur Beschreibung von Stiftbewegungen beim Schreiben und Zeichnen, das heißt, es handelt sich durchgehend um Geräte zur on-line Erfassung. Daher sind sie für den Zweck des in dieser Arbeit entwickelten Suchsystems für Handschriftdokumente, zumindest theoretisch, geeignet. Es ist in diesem Sinne möglich, von den konkreten technischen Aspekten zu abstrahieren, und die Geräte (sowie auch die beschriebenen Datenformate) als Quelle diskreter Koordinatendaten zu betrachten.

Einschränkungen der praktischen Eignung für diesen Zweck ergeben sich jedoch für viele der beschriebenen Geräte aufgrund von Problemen hinsichtlich der Handhabbarkeit bei der Eingabe größerer Dokumente. Speziell die auf den Resistive-Film-Technologien basierenden Sensoren (Abschnitt 3.4), die zumeist in PDA-Geräten eingesetzt werden, besitzen nur eine sehr kleine stiftsensitive Fläche. Gleiches gilt aus dem selben Grund beispielsweise auch für die elektromechanische Positionsbestimmung bei Verwendung von Kraftsensoren unter der Schreibfläche (Abschnitt 3.5), wie sie etwa im System *HESY* eingesetzt wird. Ähnlich verhält es sich auch bei den *PHANTOM*-Geräten, deren Haupteinsatzgebiet jedoch auch nicht das Schreiben ist. Hier behindert die mechanische Kopplung des eigentlichen Stiftes mit dem fixen Hauptgerät den Benutzer beim bequemen Schreiben und limitiert zudem die mögliche Schreibfläche. Die in Abschnitt 3.1 beschriebenen *Lichtgriffel* eignen sich für die Eingabe von Handschrift nur sehr begrenzt, da die Stifthaltung beim Schreiben auf der Monitoroberfläche unergonomisch und die mit dieser Technik erzielbare räumliche Auflösung in der Praxis sehr gering ist.

Von den in Abschnitt 3.6 beschriebenen Dateiformaten für on-line Handschriftdaten kommen theoretisch alle für die Dokumentenspeicherung im Rahmen dieser Arbeit in Frage, mit Ausnahme von *UPX*, welches lediglich der Beschreibung von Metainformationen über Dokumente dient. Praktikabel ist jedoch lediglich die Unterstützung von tatsächlich gebräuchlichen

3 Gerätetypen und Datenformate

Datenformaten. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit die Ausgangsdaten nur in den offenen Datenformaten UNIPEN, InkML, CSV sowie den proprietären Formaten der Firmen ACECAD und Anoto unterstützt. Für die interne Speicherung und Verwaltung der Dokumentdaten verwendet das hier entwickelte prototypische System eine SQL-Datenbank. Das entsprechende Datenbankschema ist in Anhang C dargestellt.

Aufgrund der Verfügbarkeit über die entsprechenden Geräte soll in dieser Arbeit der Fokus auf der *optischen*, der *elektromagnetischen* und der *akustischen Positionsbestimmung* liegen. Jede dieser drei Technologien ist durch ein Stiftsystem vertreten, welches das Schreiben auf Papier ermöglicht und für den Benutzer daher eine größere Vertrautheit bietet, als dies beispielsweise bei TabletPCs der Fall wäre. Zum Einsatz kommen die Geräte *ioPen* der Firma Logitech Inc., *DigiMemo A501* der Firma ACECAD und *PC Notes Taker* der Firma Pegasus Technologies als typische Vertreter dieser drei Technologien. In Tabelle 3.1 sind die technisch relevanten Daten dieser drei Gerätetypen zu finden: die Abtastrate (engl. *sampling rate*) in Hz, die räumliche Auflösung (engl. *spatial resolution*) in *ppi*, die Art der messbaren Druckinformation sowie das physikalische Prinzip der Positionsermittlung.

	<i>ioPen</i>	<i>DigiMemo</i>	<i>Notes Taker</i>
Abtastrate (in Hz)	ca. 20-50 ¹⁸	100	ca. 60-100
räumliche Auflösung (in <i>ppi</i>)	677,33	1.000	1.200
Druckinformation	0-126	binär	binär
Prinzip	optisch	elektromagnetisch	akustisch

Tabelle 3.1: Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Gerätetypen sowie ihre technischen Parameter

¹⁸Diese Abtastung mit einer Variablen Rate wird von Schomaker et al. in [SNC⁺95, S. 50] als *spatial sampling* bezeichnet: Wenn sich die Stiftposition schnell ändert (etwa durch schnelle Schreibbewegungen), werden in gleicher Zeit mehr Positionsdaten für die Weiterverarbeitung ausgegeben.

4 Aufbau des Systems

Dieses Kapitel verfolgt das Ziel, das in dieser Arbeit entwickelte System für die Suche in Handschriftdaten anhand der dabei zum Einsatz kommenden Module abstrakt zu beschreiben. Die Suche in handschriftlich erstellten Dokumenten erfolgt in verschiedenen Arbeitsschritten, welche durch die Systemmodule implementiert werden. Wie bereits beschrieben, berücksichtigt die vorliegende Arbeit ausschließlich on-line erfasste Handschriftdaten, sowohl im Falle der handschriftlichen Dokumente, also auch für die Suchanfragen. Für diese Erfassung der Schreibbewegungen können generell alle in Kapitel 3 diskutierten Techniken herangezogen werden.

Der erste Abschnitt dieses Kapitels diskutiert kurz die tatsächlich in dieser Arbeit verwendeten Techniken zur Datenerfassung. Im zweiten Abschnitt folgt die abstrakte Beschreibung des Systemaufbaus und der beteiligten Module. Konkrete Aspekte hinsichtlich der Funktion und des Aufbaus dieser Module werden in den folgenden Kapiteln 5, 6 und 7 erörtert.

4.1 Auswahl der Handschriftgeräte

Beschränkungen hinsichtlich der Verwendbarkeit beziehungsweise der Praktikabilität einzelner in Kapitel 3 vorgestellter Geräte für die Erfassung von Handschriftdaten ergeben sich aus verschiedenen Gründen. Hierzu zählen eine zu geringe zeitliche Auflösung bei der Abtastung der Stiftposition. *Schomaker et al.* fordern beispielsweise eine Abtastrate von mindestens 50 Hz [SNC⁺95, S. 50]. Eine weitere Beschränkung ergibt sich aber auch durch eine möglicherweise zu kleine Dimensionierung der durch die Sensoren berücksichtigten Schreibfläche. So ist die stiftbasierte Erstellung kompletter handschriftlicher Dokumente auf dem Display eines PDA-Gerätes für die meisten Benutzer eher unpraktikabel.

Das hier entwickelte System wurde mit Geräten auf Basis dreier verschiedener physikalischer Wirkungsweisen getestet, nämlich der *optischen*, der *elektromagnetischen* und der *akustischen Positionsbestimmung*. Als Gerät mit optischem Positionssensor kam der *ioPen* der Firma Logitech Inc. zum Einsatz. Mit lediglich 20 bis 50 Hz ist die Abtastrate dieser Art von Geräten zwar vergleichsweise gering, jedoch sollten sie aufgrund der zunehmenden Verbreitung sowie der einfachen Handhabung dennoch untersucht werden. Für die Geräteklasse der elektromagnetischen Positionsbestimmung wurde das *DigiMemo* der Firma ACECAD verwendet. Dieses ist technisch verwandt mit dem *CrossPad* der Firma IBM, welches in der Literatur oft für Handschriftenanwendungen genutzt wurde [LD99, Sub00], insbesondere auch für frühere Ansätze der handschriftlichen Suche [LT94, JN03]. Bei dem akustisch arbeitenden Gerät handelt es sich um den *PC Notes Taker* der Firma Pegasus Technologies.

Bei allen drei Geräten wird mittels eines Tintenstiftes auf Papier geschrieben. Dadurch wird zum einen das so genannte Parallaxen-Problem (engl. *parallax problem*) vermieden

[CLM95, SNC⁺95, S. 50], welches etwa bei bildschirmbasierten Stiftsystemen auftritt¹. Zudem ist den meisten Schreibern aktuell das haptische Empfinden bei Verwendung von Stift und Papier vertrauter als beim Schreiben mit speziellen Stiften mit Plastikmine auf Glas- oder Plastikbildschirmoberflächen, wie dies unter anderem bei TabletPC-Geräten der Fall ist [PW07].

4.2 Modulbeschreibung

Die Daten (Rohdaten), die durch die Geräte zur on-line Erfassung von Schreibbewegungen gewonnen werden, bestehen aus Sequenzen von Koordinaten der Stiftposition zum Zeitpunkt der jeweiligen Abtastung. Neben den reinen Positionsdaten liefern alle drei untersuchten Geräte zusätzliche Informationen über den Status der Stiftspitze auf der Schreiboberfläche, der *ioPen* in Form eines Druckwertes im Bereich von 0 bis 126, die Geräte *DigiMemo* und *Notes Taker* als binären Wert, welcher angibt, ob der Stift die Schreiboberfläche berührt.

Für das Ziel der Suche in den solchermaßen erfassten Handschriftdaten ist es nötig, diese zu normalisieren und aus ihnen bestimmte Merkmale zu extrahieren. Dieses Vorgehen ist analog zum Vorgehen bei anderen Problemen, etwa aus den Gebieten der Biometrie oder der Mustererkennung. Im Bereich der off-line Texterkennung beispielsweise wird zumeist in einem ersten Verarbeitungsschritt eine Filterung vorgenommen, um jenen Bildanteil zu entfernen, der keine Schreibinformationen enthält. Weitere typische Schritte sind das Entfernen von Rauschen sowie die Segmentierung der Schrift in Zeilen, Worte und Buchstaben [PS00]. Diese Verarbeitungsschritte werden als die *Vorverarbeitung* bezeichnet. Ihr schließt sich zumeist die *Extraktion von Merkmalen* an, auf deren Basis die eigentliche *Erkennung* erfolgt.

Abbildung 4.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des in dieser Arbeit entwickelten Systems. Zu erkennen sind die drei Module *Vorverarbeitung*, *Merkmalsextraktion* und *Suche* als Teile des Kernsystems. Der Ablauf gestaltet sich so, dass für eine konkrete Suchanfrage dem System die Rohdaten (als Sequenz von Abtastpunkten) sowohl des Suchbegriffes als auch aller zu durchsuchenden Dokumente übergeben werden. Im System erfolgt die Vorverarbeitung getrennt für die Anfrage- und die Dokumentendaten. Im Merkmalsextraktionsmodul werden aus den vorverarbeiteten Schreibdaten verschiedene Merkmale (engl. *features*) gewonnen, welche in unterschiedlicher Weise die geometrische Gestalt der Schrift repräsentieren. Diese Repräsentationen liegen in der Form von so genannten Kettencodes oder Merkmalssequenzen (engl. *feature strings*) vor. Die Suche erfolgt, indem mittels Stringähnlichkeiten innerhalb der Merkmalssequenzen der Dokumentdaten die etwaigen Vorkommen der Merkmalssequenz der Anfragedaten bestimmt werden. Die Ausgabe der Suche ist eine Menge von Textstellen, an denen der jeweilige Suchbegriff vorkommt.

Dieses Kernsystem wird vervollständigt durch die Systemteile für die Benutzerinteraktion und die Datenspeicherung. Beide werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher betrachtet und dienen lediglich als Werkzeug für das Kernsystem. Durch den modularen Aufbau ist es möglich, zum Zwecke der Evaluation (siehe Kapitel 8) des in dieser Arbeit

¹»Then, because of the angle at which the screen is observed, a parallax error occurred: when the eye, the tip of the pen, and a point on the screen are aligned, the pen actually points at a zone located a few millimeters below that point.« [CLM95]

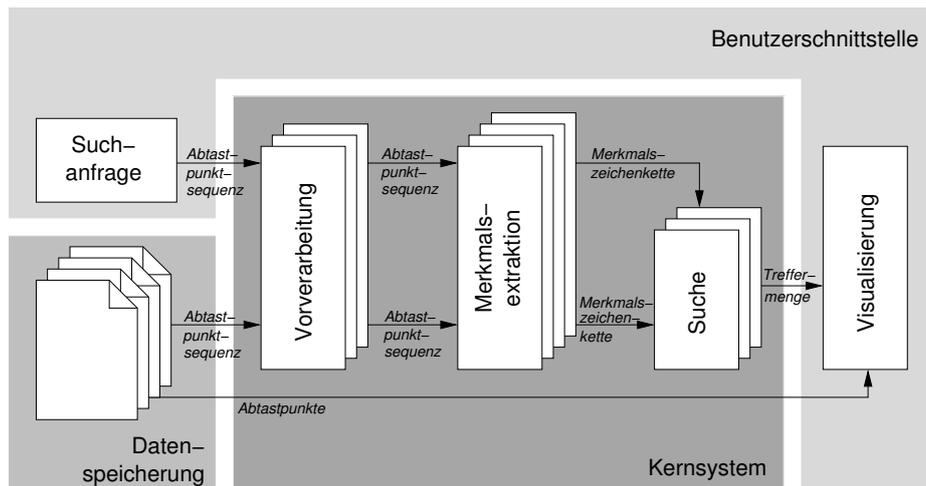


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau des Handschriftsuchsystems

entwickelten Suchsystems die Benutzerschnittstelle durch eine automatisierte Testumgebung zu ersetzen, welche die Suchanfragen stellt, und den Erfolg der Suche bei Verwendung der verschiedenen, im folgenden Kapitel beschriebenen, Merkmalstypen und Parameter protokolliert und für eine Auswertung verfügbar macht.

Ein ähnlicher Vorgang des Ersetzens von Systemmodulen erfolgt im Rahmen der Untersuchung von so genannten Fusionsstrategien in Kapitel 7. Hierbei wird beispielsweise das Suchmodul durch ein anderes ersetzt.

Die folgenden zwei Kapitel beschäftigen sich mit diesen Modulen. Kapitel 5 beschreibt in Abschnitt 5.1 die Vorverarbeitung der handschriftlichen Rohdaten. In den sich anschließenden Abschnitten 5.2 bis 5.5 wird eine Reihe verschiedener Merkmalstypen einzeln diskutiert und ihre jeweilige Extraktion aus den vorverarbeiteten Rohdaten beschrieben. Das Kapitel 6 enthält die Beschreibung des eigentlichen Suchverfahrens auf Grundlage der Stringähnlichkeit.

4 Aufbau des Systems

das bereits aus Kapitel 4 bekannte Blockschema des in dieser Arbeit entwickelten Handschriftsuchsystems sowie, durch eine gestrichelte Umrandung besonders hervorgehoben, die in diesem Kapitel betrachteten Systemteile.

5.1 Datenvorverarbeitung

Die Vorverarbeitung der Rohdaten, welche durch die Stiftgeräte beziehungsweise die jeweiligen Gerätetreiber ausgegeben werden, umfasst die Bereinigung der Bewegungssignale von Störungen (Rauschen) sowie eine Aufbereitung der Signale (Neuabtastung) für die weiteren Verarbeitungsschritte der Merkmalsgewinnung.

Die Daten der Stifteingaben während des Schreibvorgangs können als analoge zeitabhängige Signale $x(t)$ und $y(t)$ der horizontalen und vertikalen Stiftposition sowie $z(t)$ der Druckinformation zum Zeitpunkt t aufgefasst werden. Durch die Abtastung der Signale, das heißt, die zeitliche Quantisierung, entsteht eine Sequenz von so genannten Abtastpunkten p_i :

$$p_i = (x_i, y_i, z_i, t_i) \quad (5.1)$$

Hierbei sind x_i , y_i und z_i die Koordinaten der Stiftspitze beziehungsweise die Druckinformation zum Zeitpunkt t_i . Es gilt also:

$$x_i = x(t_i), \quad y_i = y(t_i), \quad z_i = z(t_i) \quad (5.2)$$

Diese Abtastung der Signale $x(t)$, $y(t)$ und $p(t)$ realisiert also eine Analog-Digital-Umwandlung. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, die Stiftkoordinaten x_i und y_i sowie die Druckinformation z_i seien positiv² und ganzzahlig. Ebenso wird die Zeitinformation³ t_i als ganzzahlig betrachtet. Damit gilt für jeden Abtastpunkt p_i :

$$p_i \in \mathbb{P} \quad \text{mit} \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad \mathbb{P} = \mathbb{N}^4 \quad (5.3)$$

Eine handschriftliche Eingabe wird als Sequenz P von $n = |P|$ Abtastpunkten beschrieben. P entspricht dabei beispielsweise einem geschriebenen Wort oder Symbol, einem Teil davon, Gruppen mehrerer Wörter bis hin zu kompletten Dokumenten. Für eine Sequenz P bestehend aus n Abtastpunkten gilt:

$$P \in \mathbb{P}^n \quad (5.4)$$

$$P = p_1 p_2 p_3 \dots p_n \quad (5.5)$$

In Abbildung 5.2 sind die Signale x_i und y_i der horizontalen und vertikalen Stiftbewegung in Abhängigkeit von der Schreibzeit t_i während des Schreibens von zwei Zeilen Text zu erkennen. Das Schriftbild, das heißt die Projektion der Punkte (x_i, y_i) in die Ebene, ist zum

²Für die *Notes Taker*-Geräte [Peg06] gilt dies nicht automatisch, da sich bei diesen der Koordinatenursprung mittig am oberen Rand der erfassbaren Eingabefläche befindet. Jedoch kann dieser Koordinatenursprung auf arithmetischem Wege verschoben werden, sodass gilt $x_i, y_i \geq 0$

³Die Zeitinformation wird in der Regel als Anzahl der Millisekunden, beginnend zu einem festen Zeitpunkt, ausgedrückt.

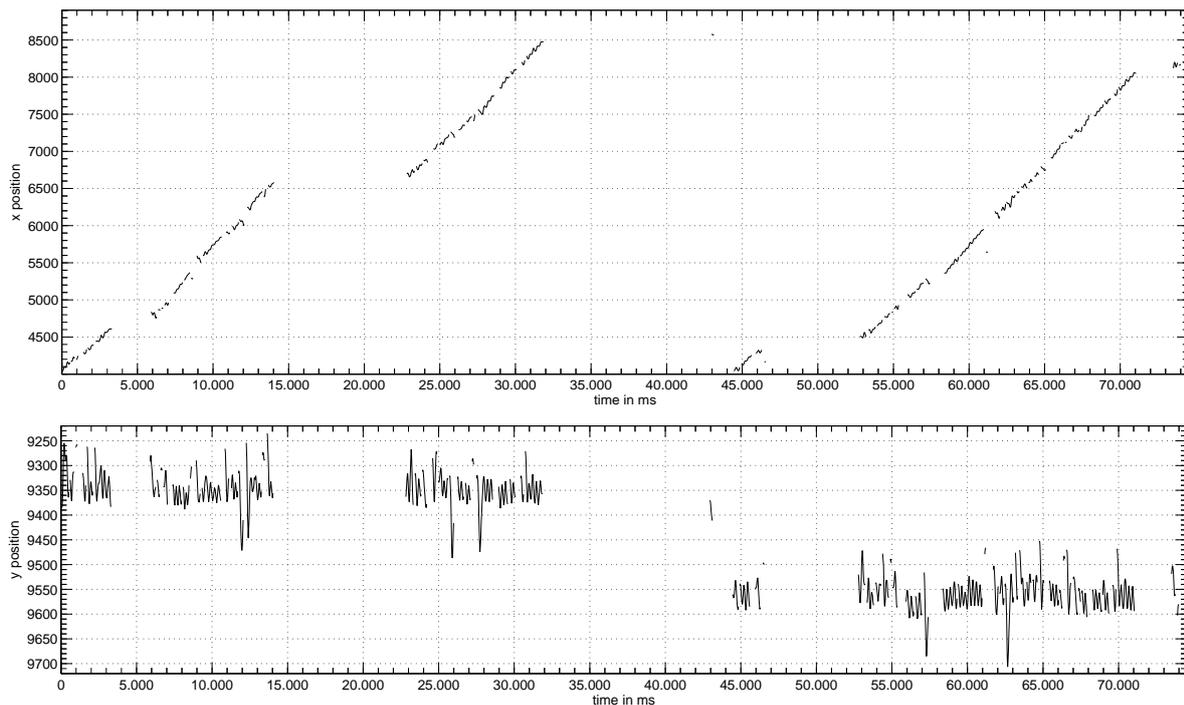


Abbildung 5.2: Beispiel für die Signale x_i und y_i der horizontalen und vertikalen Stiftbewegung

Vergleich in Abbildung 5.3 dargestellt. Der unstetige Verlauf der Funktionen $x(t)$ und $y(t)$ ergibt sich aus dem Umstand, dass der Stift am Ende von so genannten *Strokes*⁴ abgesetzt und an anderer Position erneut aufgesetzt wurde. Die Zeiträume, in denen sich die Stiftspitze nicht in Kontakt mit der Schreiboberfläche befand, die so genannten *Gaps*, sind im Funktionsverlauf in Abbildung 5.2 als Lücke dargestellt (beispielsweise zwischen etwa 3.500 und 5.900 ms oder zwischen etwa 14.000 und 22.800 ms in Abbildung 5.2). In dem Signalverlauf der horizontalen Stiftbewegung, also der Bewegung in x-Richtung, ist sehr gut erkennbar, dass jede der zwei Textzeilen von links nach rechts geschrieben wird, da der Wert der x-Auslenkung pro Zeile ansteigt; die erste Zeile wurde im Zeitraum von 0 bis 32.000 ms geschrieben, die zweite Zeile von 44.400 bis 74.000 ms.

Abbildung 5.3 zeigt neben dem Verlauf der Stiftbewegung auch die Position aller Abtastpunkte (dargestellt als kleine Kreise auf der virtuellen Tintenspur). Zu erkennen ist, dass die Verteilung dieser Abtastpunkte entlang der *virtuellen Tintenspur* (engl. *virtual ink trace*) sehr ungleichmäßig ist. Der Grund dafür liegt in der technischen Umsetzung der Positionserfas-

⁴In der Literatur wird der Begriff *Stroke* auf unterschiedliche Weisen definiert. In [Kam96] beginnen und enden Strokes an Positionen mit horizontalem oder vertikalem Minimum der Stiftposition (*local minima segmentation*), in [LT94] nur an Positionen mit vertikalem Minimum. In [ST90] wird eine Strokesegmentierung anhand des Minimums der Schreibgeschwindigkeit vorgenommen; in [TR03] anhand des Minimums der vertikalen Schreibgeschwindigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Strokes definiert sein als die Zeiträume zwischen dem Aufsetzen und dem jeweils nächsten Absetzen der Stiftspitze auf der Schreiboberfläche (*pen down-up segmentation*). Diese Definition findet sich unter anderem auch in [GR93, PWC95, DC05]

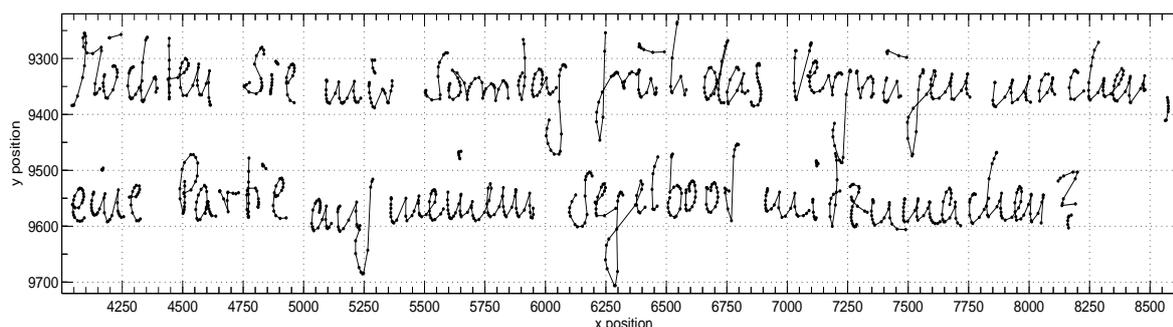


Abbildung 5.3: Schriftbild der Signale aus Abbildung 5.2

sung im Stift. Die Abtastung der Stiftposition erfolgt in einigen Geräten nicht mit einer konstanten Rate. Stattdessen variiert die Abtastrate (engl. *sampling rate*) beim hier verwendeten Gerät *ioPen* der Firma Logitech [Log07] zwischen etwa 20 und 50 Hz. Andere Geräte besitzen zwar eine konstante Abtastrate, jedoch speichern sie keine Zeitinformationen, so dass zwar aus der Anzahl der Abtastpunkte die Dauer eines *Strokes*, jedoch nicht die Länge von *Gaps* und damit die Gesamtschreibzeit ermittelt werden kann. Ein Beispiel für diese Art von Geräten ist etwa das *DigiMemo A501* der Firma ACE CAD [ACE07]. Unter anderem um dem Problem der ungleichmäßigen Abtastung zu begegnen, ist als Teil der Vorverarbeitung eine Neuabtastung (engl. *resampling*) der Signale der Stiftbewegung sinnvoll. Diese Neuabtastung wird in Abschnitt 5.1.3 erläutert.

5.1.1 Entfernen doppelter Abtastpunkte

Aufgrund technischer Umstände ist es möglich, dass bei der Abtastung einer Schreibbewegung mehrere aufeinanderfolgende Abtastpunkte $p_i, p_{i+1}, p_{i+2}, \dots, p_{i+l}$ die selbe Position besitzen [Sim03]:

$$x_i = x_{i+1} = x_{i+2} = \dots = x_{i+l} \quad \text{und} \quad y_i = y_{i+1} = y_{i+2} = \dots = y_{i+l} \quad \text{mit} \quad l > 0 \quad (5.6)$$

Dies kann geschehen bei einer hohen Abtastrate und einer kurzzeitig minimalen Bahngeschwindigkeit der Stiftspitze beziehungsweise in Situationen des vollständigen kurzzeitigen Stillstandes der Stiftspitze. Um Probleme bei weiteren Verarbeitungsschritten der Abtastpunkte, insbesondere der Neuabtastung, zu vermeiden, werden solche Abtastpunkte aus dem Signalverlauf entfernt, deren Position gleich dem des unmittelbar vorherigen Abtastpunktes ist. In Algorithmus⁵ 1 ist eine Funktion *deleteDoubles* dargestellt, die diese Entfernung doppelter Abtastpunkte realisiert. Formal lässt sich die Funktion folgendermaßen beschreiben:

$$\text{deleteDoubles} : \mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{P}^{\bar{n}} \quad \text{mit} \quad 1 \leq \bar{n} \leq n \quad (5.7)$$

⁵Algorithmen werden in dieser Arbeit durchgehend in einem leicht an die Sprache Pascal angelehnten Pseudocode dargestellt.

Algorithmus 1 Funktion zur Entfernung doppelter Abtastpunkte

```

1: function DELETEDOUBLES( $P$ )
2:    $\bar{P} \leftarrow \varepsilon$                                 ▷ initialisiere Sequenz  $\bar{P}$  als leere Sequenz
3:    $\bar{p}_1 \leftarrow p_1$ 
4:    $j \leftarrow 1$                                   ▷  $j$  ist die Indexvariable für  $\bar{P}$ 
5:   for  $i \leftarrow 2, \dots, |P|$  do
6:     if  $x_i \neq x_{i-1}$  or  $y_i \neq y_{i-1}$  then
7:        $j \leftarrow j + 1$ 
8:        $\bar{p}_j \leftarrow p_i$                         ▷ füge  $p_i$  in  $\bar{P}$  ein
9:     end if
10:  end for
11:  return  $\bar{P}$ 
12: end function

```

5.1.2 Strokesegmentierung

Ein weiterer Schritt in der Vorverarbeitung ist die Aufteilung der Sequenz von Abtastpunkten einer Handschrifteingabe in kürzere Teilsequenzen, die zuvor bereits erwähnten so genannten *Strokes*. Ein Stroke sei dadurch definiert, dass er mit einem Abtastpunkt p_i beginnt, der eine Aufsetzposition der Stiftspitze auf der Schreiboberfläche beschreibt, und mit einem Abtastpunkt p_{i+l} endet, der dem nächsten Absatzpunkt der Stiftspitze entspricht. Somit gilt also $z_j > 0$ für die Druckinformation z_j aller Abtastpunkte p_j mit $i \leq j \leq i+l$.

Das Resultat der Strokesegmentierung einer Sequenz P ist eine geordnete Folge (P_1, P_2, \dots) von Teilsequenzen der Sequenz P . Die eigentliche Gewinnung von Merkmalen in Form von Merkmalszeichenketten einer Sequenz P wird auf Basis ihrer Teilsequenzen durchgeführt. Die Merkmalszeichenketten der Teilsequenzen werden am Ende zu einer gesamten Zeichenkette verknüpft.

5.1.3 Neuabtastung der Handschrift

Die Abtastung der Stiftpositionen während der Schreibbewegung erfolgt in vielen Fällen mit einer festen Abtastrate von beispielsweise 100 Hz. Das heißt, die Stiftposition sowie die Druckinformation wird 100-mal pro Sekunde bestimmt. Da jedoch die Geschwindigkeit, mit der geschrieben wird, variieren kann, ändert sich der paarweise Abstand zweier aufeinanderfolgender Abtastpunkte p_i und p_{i+1} . Dieser Effekt ist noch größer bei Geräten mit einer schwankenden Abtastrate, zum Beispiel der *Logitech ioPen* (siehe Abschnitt 3.1).

Um diesen Einfluss der Geschwindigkeit (welche in keinem Zusammenhang zur geometrischen Form der Handschrift steht) auf die Abtastpunkte zu eliminieren, ist es üblich, eine äquidistante Neuabtastung (engl. *equidistant resampling*) der Bewegungssignale durchzuführen. Gebräuchlich ist dazu unter anderem die *kubische Splineinterpolation* und zwar separat für die Werte x_i und y_i [Boo78, Sim02].

Die Grundidee einer jeden Interpolation von Werten \mathbf{y}_1 bis \mathbf{y}_n ist, eine Funktion f zu finden, so dass gilt $\mathbf{y}_i = f(\mathbf{k}_i)$ für $1 \leq i \leq n$. Der Parameter \mathbf{k}_i muss hierbei streng monoton steigend

5 Merkmalsgewinnung

sein, das heißt, es muss gelten $\mathbf{k}_1 < \mathbf{k}_2 < \dots < \mathbf{k}_n$. Die Werte \mathbf{k}_i werden als Stützstellen der Interpolationsfunktion f bezeichnet. Im Falle der Bewegungssignale eines Schreibvorgangs erfolgt die Bestimmung der Funktion f separat für die horizontale und für die vertikale Stiftbewegung in zwei getrennten Verarbeitungsschritten. Für die Interpolation der horizontalen Stiftbewegung möge gelten $f_x(\mathbf{k}_i) = x_i$ und für die vertikale Stiftbewegung gelte $f_y(\mathbf{k}_i) = y_i$. Der Parameter \mathbf{k}_i muss für eine äquidistante Neuabtastung wie folgt gewählt werden:

$$\mathbf{k}_i = \begin{cases} 0 & \text{falls } i = 1, \\ \mathbf{k}_{i-1} + \|p_i - p_{i-1}\|_2 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.8)$$

Der Term $\|p_i - p_{i-1}\|_2$ stehe dabei für den euklidischen Abstand zwischen (x_i, y_i) und (x_{i-1}, y_{i-1}) , sodass \mathbf{k}_i der Bogenlänge zwischen dem ersten und dem i -ten Abtastpunkt entspricht.

Bei Verwendung der kubischen Splineinterpolation für n Punkte ist die Funktion f stückweise zusammengesetzt aus $n - 1$ Teilpolynomen f_1 , bis f_{n-1} dritten Grades. In Abbildung 5.4 ist die kubische Splineinterpolation für fünf Punkte beispielhaft dargestellt.

$$f(\mathbf{k}) = \begin{cases} f_1(\mathbf{k}) & \text{falls } \mathbf{k}_1 \leq \mathbf{k} < \mathbf{k}_2, \\ f_2(\mathbf{k}) & \text{falls } \mathbf{k}_2 \leq \mathbf{k} < \mathbf{k}_3, \\ \vdots & \\ f_{n-1}(\mathbf{k}) & \text{falls } \mathbf{k}_{n-1} \leq \mathbf{k} \leq \mathbf{k}_n. \end{cases} \quad (5.9)$$

Diese Teilpolynome dritten Grades haben folgende Form:

$$f_i(\mathbf{k}) = \alpha_i \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{k}_i)^3 + \beta_i \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{k}_i)^2 + \gamma_i \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{k}_i) + \delta_i \quad (5.10)$$

mit

$$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i \in \mathbb{R}, \quad 1 \leq i < n \quad (5.11)$$

Damit die Funktion f an den inneren Stützstellen \mathbf{k}_2 bis \mathbf{k}_{n-1} , auch als *Nahtstellen* bezeichnet, stetig ist, muss gelten:

$$f_{i-1}(\mathbf{k}_i) = f_i(\mathbf{k}_i) \quad \text{für } 1 < i < n \quad (5.12)$$

Um darüber hinaus an den inneren Stützstellen möglichst *glatte* Übergänge der Teilfunktionen von f zu erreichen, muss weiterhin gelten:

$$f'_{i-1}(\mathbf{k}_i) = f'_i(\mathbf{k}_i) \quad \text{sowie} \quad f''_{i-1}(\mathbf{k}_i) = f''_i(\mathbf{k}_i) \quad \text{für } 1 < i < n \quad (5.13)$$

$$f'_i(\mathbf{k}) = 3 \cdot \alpha_i \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{k}_i)^2 + 2 \cdot \beta_i \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{k}_i) + \gamma_i \quad (5.14)$$

$$f''_i(\mathbf{k}) = 6 \cdot \alpha_i \cdot (\mathbf{k} - \mathbf{k}_i) + 2 \cdot \beta_i \quad (5.15)$$

Die erste Ableitung f' entspricht dem Anstieg, die zweite Ableitung f'' der Krümmung der Funktion f . Durch diese Gleichsetzung der ersten und zweiten Ableitungen benachbarter Teilfunktionen an den inneren Stützstellen, wird der oben geforderte *glatte* Übergang gewährleistet. Für die *Ränder* von f , also $f_1(\mathbf{k}_1)$ und $f_{n-1}(\mathbf{k}_n)$ wird in der Praxis oft vereinfachend

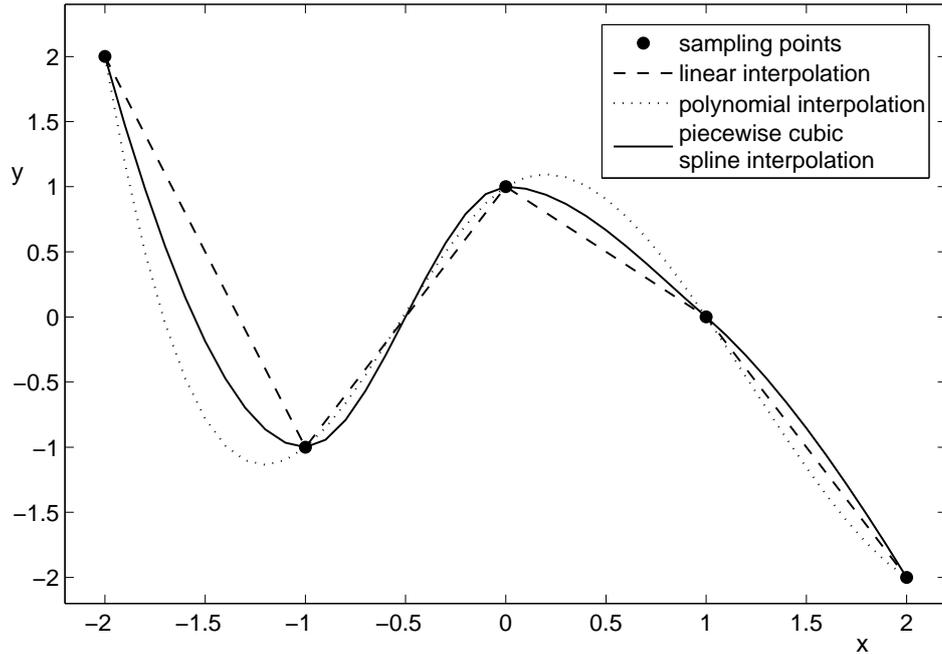


Abbildung 5.4: Vergleich von linearer (gestrichelte Kurve) und polynomieller (gepunktete Kurve) Interpolation sowie stückweiser kubischer Splineinterpolation (durchgezogene Kurve) am Beispiel von fünf Abtastpunkten

angenommen, es gelte $f_1''(\mathbf{k}_1) = f_{n-1}''(\mathbf{k}_n) = 0$. In diesem Fall spricht man von einem *natürlichen kubischen Spline* [Boo78].

Die Neuabtastung der Stiftbewegung erfolgt, indem die Parameter $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ mit $1 \leq i < n$) der Funktion f aus Gleichung 5.9 separat für die horizontale und die vertikale Bewegung bestimmt werden. Anschließend ist eine Sequenz von \bar{n} Werten \mathbf{k}'_1 bis $\mathbf{k}'_{\bar{n}}$ mit $w = \mathbf{k}'_i - \mathbf{k}'_{i-1}$ ($1 < i \leq \bar{n}$) zu bestimmen, für die f berechnet wird. Aus der Sequenz P der n ursprünglichen Abtastpunkte p_1 bis p_n wird hierdurch die Sequenz \bar{P} der \bar{n} neuabgetasteten Punkte \bar{p}_1 bis $\bar{p}_{\bar{n}}$. Der Wert w ist hierbei (das heißt im Falle der äquidistanten Neuabtastung) der paarweise Abstand der neuabgetasteten Punkte.

$$\text{resampling}_w : \mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{P}^{\bar{n}} \quad (5.16)$$

Alternativ zur beschriebenen Neuabtastung der Schreibsignale mittels stückweiser kubischer Splineinterpolation wäre beispielsweise auch die Verwendung der Polynominterpolation oder die stückweise lineare Interpolation denkbar. Für eine Polynominterpolation von n Stützstellen wird ein Polynom vom Grad $n - 1$ verwendet. Es ist implizit garantiert, dass die dadurch entstehende Kurve stetig und mehrfach differenzierbar ist, also einen *glatten* Verlauf besitzt. Jedoch haben Polynome mit hohem Grad die Tendenz, stark zu schwingen⁶, wie dies

⁶Das Verhalten der starken Schwingung von Polynomen hohen Grades wird als *Runge's Phänomen* bezeichnet; nach *Carl David Tolmé Runge*, der 1901 das Verhalten von Fehlern bei der Polynominterpolation untersuchte [Run01].

in Abbildung 5.4 zu sehen ist. Bei der stückweisen linearen Interpolation wird der Bereich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stützstellen durch eine lineare Funktion angenähert. Es ist sofort einsichtig, dass hierbei die Teilfunktionen in den Nahtstellen zwar stetig, aber in den seltensten Fällen differenzierbar sind. Dies macht die lineare Interpolation zu einem schlechteren Kandidaten als die kubische Splineinterpolation. Gleichwohl wurde die lineare Interpolation in der Vergangenheit aufgrund ihrer einfachen und schnellen Implementierung für eine Neuabtastung von Handschriftsignalen eingesetzt [AA96].

5.2 Gitterbasierte Richtungsmerkmale

Eine Möglichkeit, die geometrische Form handschriftlicher Daten durch eine Menge lokaler Merkmale zu beschreiben, besteht darin, die lokale Strichrichtung mit Hilfe verschiedener Gittermuster auszudrücken. In diesem Abschnitt werden Gitter, basierend auf Quadraten sowie gleichseitigen Dreiecken, beschrieben. Während die erstere Variante die Adaption eines Verfahrens aus der Literatur darstellt, handelt es sich bei der zweiten Variante um einen durch den Autor dieser Arbeit vorgeschlagenen Merkmalstypen.

5.2.1 Quadratische Gitter

Der Merkmalstyp nach [Fre74] beruht darauf, ein Schriftbild mit einem quadratischen Gitter zu überlagern und die Linienzüge dieses Schriftbildes dadurch zu vereinfachen, dass diese auf die Gitterlinien abgebildet werden. *Herbert Freeman* beschrieb dieses Verfahren erstmals 1974. Sein Ziel war die effiziente Speicherung und Verarbeitung von Linienzeichnungen.

Dieser Vorgang soll durch Abbildung 5.5 verdeutlicht werden. Oben links in Abbildung 5.5 ist als Beispiel eine Zeichnung, bestehend aus verschiedenen komplexen Formen, zu sehen. Rechts daneben ist dieselbe Zeichnung (ohne Schraffur) zu erkennen mit dem Unterschied, dass die Kanten der komplexen Formen als horizontale und vertikale Liniensegmente eines quadratischen Gitters vereinfacht beziehungsweise vergrößert und somit quantisiert wurden. In Abbildung 5.5 unten links ist das Resultat einer ähnlichen Vereinfachung derselben komplexen Formen, mit dem Unterschied, dass nunmehr auch diagonale Gitterkanten berücksichtigt wurden. Unten rechts in Abbildung 5.5 ist eine Vergrößerung eines Ausschnitts der quantisierten Zeichnung zu sehen, inklusive des quadratischen Gitters. Die einzelnen Gitterkanten, welche die vereinfachte Zeichnung repräsentieren, sind mit ihrer jeweiligen Kodierung beschriftet – die Kodierung selbst ist am rechten unteren Rand beschrieben. Wie zu erkennen ist, lässt sich jede quantisierte Linienzeichnung somit als Kodewort, das heißt als Abfolge von Kodezeichen (hier 0 bis 7) ausdrücken. Nicht berücksichtigt werden hierbei von Freeman jedoch die Lücken zwischen zwei Linienzügen, das heißt ihre relative Position zueinander.

Diese Art der Kodierung wurde als Merkmalsextraktion unter Mitarbeit des Autors dieser Arbeit bereits erfolgreich für on-line Handschrift- und andere Stiftsignale eingesetzt. In [Ven05] etwa ist die Erkennung von handgeschriebenen Zeichen des lateinischen Alphabetes mithilfe dieser Kodierung beschrieben und in [CSVV07] und [Jon05] ist ihre Verwendung in einem Erkennungssystem für gezeichnete Bedienelemente einer grafischen Benutzeroberfläche (*GUI*) erklärt. In beiden Fällen, also bei der Erkennung von Buchstaben und der Erken-

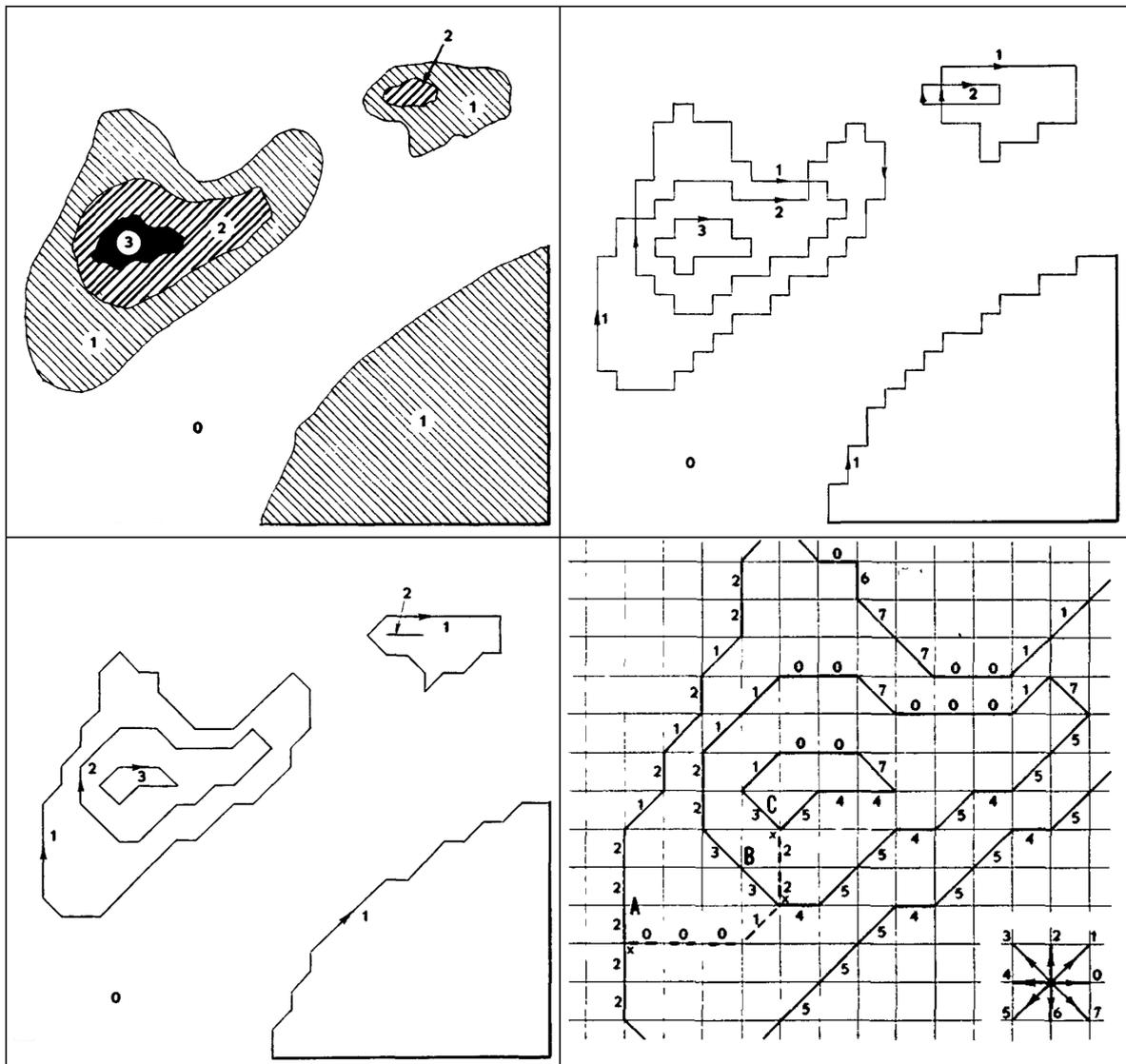


Abbildung 5.5: Grundidee der Kodierung nach Freeman [Fre74]: die originale Linienzeichnung (oben links), Vereinfachung der originalen Linienzeichnung mittels horizontaler und vertikaler (oben rechts) sowie zusätzlich diagonaler Gitterlinien-segmente (unten links) und eine Ausschnittsvergrößerung mit Angabe der Kodierung (unten rechts)

5 Merkmalsgewinnung

Prozess kaum in Gang und er musste sich dem aufpassen stellen, diese erste Untersuchung sollte auch die letzte sein. Er stand noch nachdenklich beim Apparat, da hörte er hinter sich die Stimme des Direktors-Stellvertreters, der telefonieren wollte, dem K. aber den Weg verstellte. „Schlechte Nachrichten!“ fragte der Direktor-Stellvertreter leichthin, nicht um etwas an erfahren, sondern um K. vom Apparat wegzubringen. „Nein, nein“, sagte K., trat beiseite, ging aber nicht weg. Der Direktor-Stellvertreter nahm den Hörer und sagte, während er auf die telefonische Verbindung wartete, über das Hörrohr hinweg: „Eine Frage, Herr K.: Wüßten Sie mir Sonntag früh das Verträge machen, eine Partie auf meinem Segelboot mitzumachen? Es wird eine größere Gesellschaft sein, gewiss auch ihre Bekannten darunter. Unter anderem Staatsanwalt Hostener. Wollen Sie kommen? Kommen Sie doch!“ K. versuchte, darauf antwortend, was der Direktor-Stellvertreter sagte. Es war nicht unwichtig für ihn, denn diese Einladung des Di-

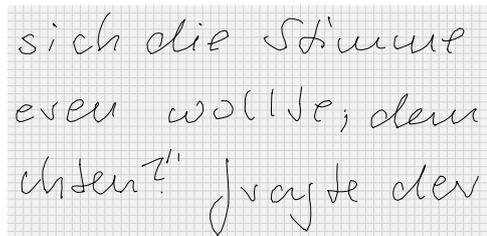
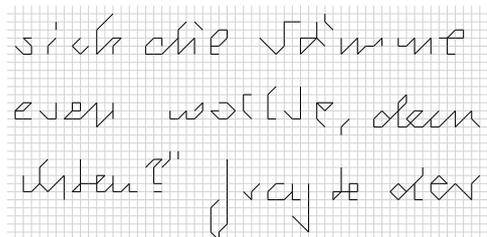



Abbildung 5.6: Anwendung der Gitterkodierung nach Freeman auf ein Handschriftdokument

nung von gezeichneten GUI-Elementen, werden die Kodeworte für eine aktuelle Stifteingabe sowie die hinterlegten Referenzeingaben bestimmt. Mittels Stringvergleich wird die Referenz mit der höchsten Ähnlichkeit bestimmt und auf diese Weise eine Erkennung realisiert.

Für die Suche in handschriftlichen Dokumenten ist das Vorgehen dasselbe wie bei der Erkennung von Buchstaben oder gezeichneten Formen. Wie in Abbildung 5.6 zu erkennen ist, wird das vorverarbeitete (vgl. Abschnitt 5.1) Schriftbild eines Dokumentes mit einem quadratischen Gitter überlagert. Die den einzelnen Abtastpunkten des Dokumentes nächstgelegenen Knoten des Gitters werden bestimmt und für je zwei zeitlich aufeinanderfolgende Gitterknoten wird die sie verbindende Kante ermittelt [SV06a, SV06b].

Als Resultat der beschriebenen Merkmalsextraktion nach Freeman entsteht aus zwei Signalverläufen der horizontalen und vertikalen Stiftbewegung eine Zeichenkette s (engl. *string*) der Länge $l = |s|$ über dem Alphabet $\mathbb{A}_{\square} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$.

$$\text{extract}_{\text{freeman}} : \mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{A}_{\square}^l \quad (5.17)$$

Der eigentliche Vorgang der Extraktion einer Merkmalszeichenkette aus einer Folge von Abtastpunkten der Stiftbewegung lässt sich auf unterschiedliche Weisen realisieren. Freeman unterscheidet hierbei zwei Verfahren [Fre74] – *Square-Box Quantization* und *Grid-Intersect Quantization*. In [KT76] wird als drittes Verfahren die *Circular Quantization* eingeführt. Ziel aller drei Verfahren ist es, jene Gitterknoten zu bestimmen, die dem Verlauf der Stiftbewegung (beschrieben durch die Abtastpunkte) am nächsten liegen. Im Anschluss an die Bestimmung dieser Gitterknoten wird die Art der Nachbarschaftsbeziehung⁷ zweier aufeinanderfolgender Gitterknoten ermittelt.

Die Unterschiede zwischen den drei Verfahren in der Bestimmung der relevanten Gitterknoten sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Bei der Square-Box Quantisierung wird für jeden

⁷Unter »Art der Nachbarschaftsbeziehung« wird hier verstanden, ob sich der erste Gitterknoten *links, links-oben, oben, rechts-oben, ...* von dem zweiten Gitterknoten befindet.

Abtastpunkt der Gitterpunkt mit dem geringsten Abstand bestimmt. Jeder Gitterpunkt besitzt also eine quadratische Umgebung (in Abbildung 5.7 oben rechts durch gestrichelte Linien dargestellt), innerhalb der die Abtastpunkte diesem Gitterpunkt zugeordnet werden. In dem Fall, in dem die Abstände aufeinanderfolgender Abtastpunkte im Vergleich zur Gitterweite w_g sehr gering sind, ist es sehr oft so, dass auch für ursprünglich diagonale Verläufe der Stiftbewegung durch die Quantisierung ausschließlich horizontale und vertikale Nachbarschaften zwischen den selektierten Gitterknoten bestehen. In Abbildung 5.7 oben rechts ist dies im Bereich der Gitterknoten b, c, d oder f, g, h erkennbar.

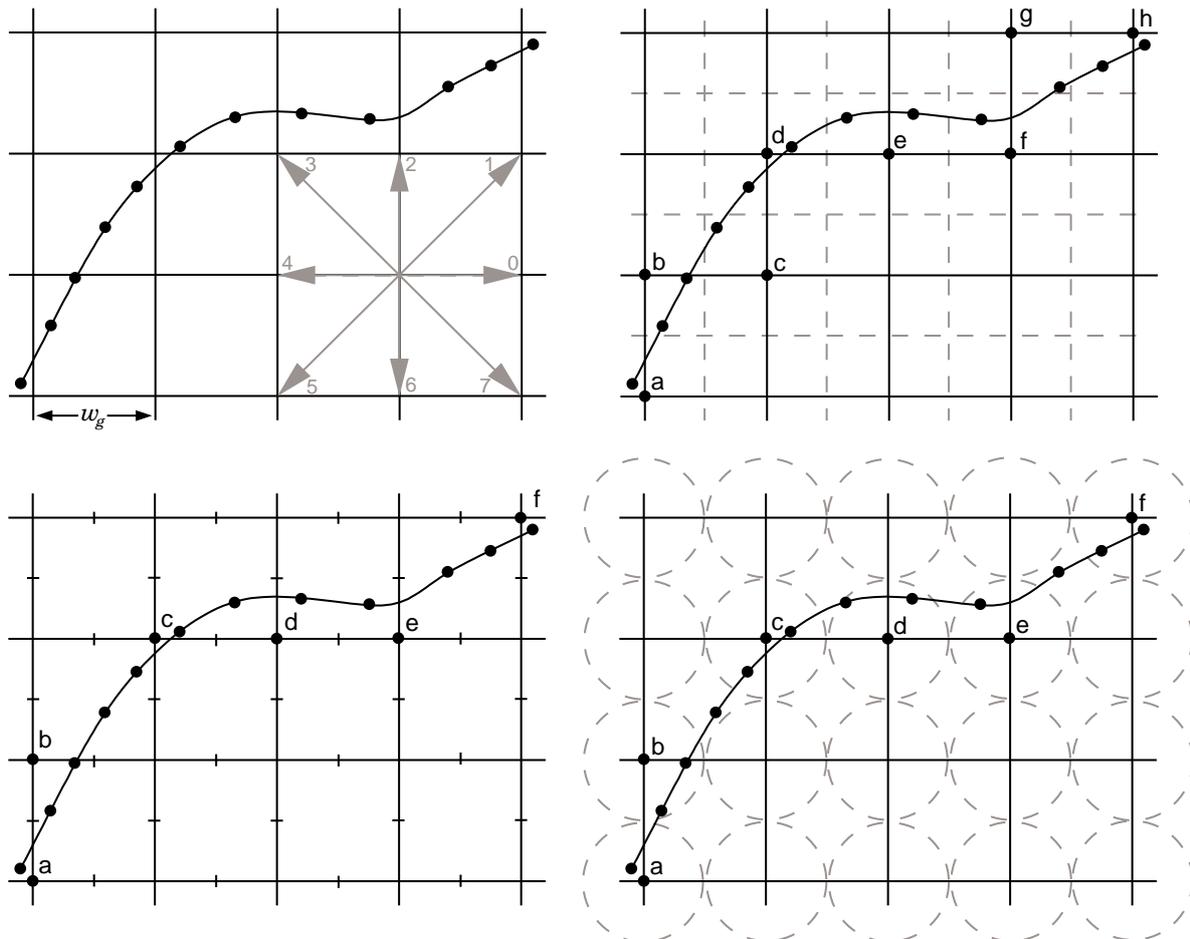


Abbildung 5.7: Unterschiedliche Arten der Quantisierung: oben links eine Schriftkurve mit den zugrundeliegenden Abtastpunkten sowie ein quadratisches Gitter mit Gitterweite w_g und Darstellung der Codezeichen $\{0, 1, \dots, 7\}$; oben rechts, unten links beziehungsweise unten rechts die schematische Darstellung der *Square-Box*, *Grid-Intersect* beziehungsweise *Circular Quantization*.

Die zweite Art der Quantisierung nach Freeman, die *Grid-Intersect Quantization* ist in Abbildung 5.7 unten links dargestellt. Hierbei werden die Strecken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Abtastpunkten betrachtet. Wenn diese Strecken die Gitterlinien schneiden, dann

Algorithmus 2 Extraktion von Quadratgitter-basierten Merkmalen aus Sequenzen von Abtastpunkten mittels der *Circular Quantisierung* nach [KT76]

```

1: function CIRCULARQUANTIZATION( $P, w_g$ )
2:    $\bar{P} \leftarrow \varepsilon$                                 ▷ initialisiere Sequenz  $\bar{P}$  als leere Sequenz
3:    $j \leftarrow 1$                                   ▷  $j$  ist die Indexvariable für  $\bar{P}$ 
4:   for  $i \leftarrow 1, \dots, |P|$  do
5:      $(x_i, y_i, z_i, t_i) \leftarrow p_i$ 
6:      $x_{grid} \leftarrow \lfloor x_i/w_g + 0.5 \rfloor$           ▷ bestimme Koordinaten des zu  $p_i$ 
7:      $y_{grid} \leftarrow \lfloor y_i/w_g + 0.5 \rfloor$           nächstgelegenen Gitterknotens
8:      $d \leftarrow \sqrt{(x_i - x_{grid} \cdot w_g)^2 + (y_i - y_{grid} \cdot w_g)^2}$   ▷ Abstand von  $p_i$  zu Knotenpunkt
9:     if  $d \leq w_g/2$  then                            ▷ falls  $p_i$  innerhalb des Kreises um den Knoten
10:       $\bar{p}_j \leftarrow (x_{grid}, y_{grid}, z_i, t_i)$     liegt, dann füge Knotenpunkt zu  $\bar{P}$  hinzu
11:       $j \leftarrow j + 1$ 
12:     end if
13:   end for
14:   return  $\bar{P}$ 
15: end function

```

wird jener Gitterpunkt selektiert, der zu diesem Schnittpunkt den geringsten Abstand hat. In Abbildung 5.7 unten links ist jeder Gitterknoten umgeben von vier kleineren Markierungen auf den Gitterlinien, die den Bereich festlegen, in dem sich der Schnittpunkt befinden muss, damit dieser Gitterknoten berücksichtigt wird.

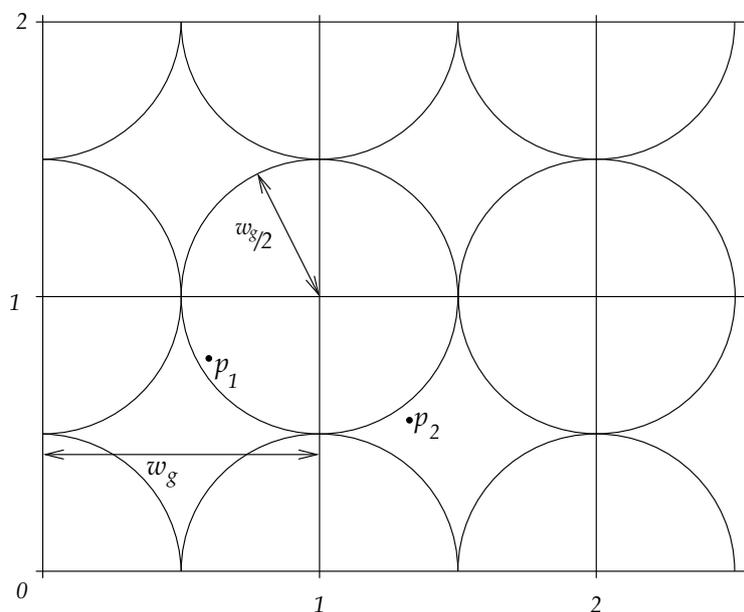


Abbildung 5.8: Darstellung eines quadratischen Gitters sowie der Quantisierungskreise der Gitterknoten

Ähnlich der Square-Box Quantisierung nach Freeman arbeitet auch die Circular Quantisierung nach *Koplowitz* und *Toussaint* [KT76]. Statt quadratischer Umgebungen werden bei letzterer die Gitterknoten mit Kreisen umgeben. Befindet sich ein Abtastpunkt innerhalb der kreisförmigen Umgebung eines Gitterpunktes, so wird dieser Gitterpunkt selektiert. Das Problem fehlerhafter Quantisierung von diagonalen Stiftbewegungen, wie es im Falle der Square-Box Quantisierung auftreten kann, existiert bei der Circular Quantisierung nicht, wie in Abbildung 5.7 unten rechts etwa im Bereich der Abtastpunkte b und c oder e und f leicht erkennbar ist. Solche Abtastpunkte, die nicht innerhalb der Kreisumgebung eines Gitterknotens liegen, werden bei dieser Art der Quantisierung nicht berücksichtigt.

Aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit und schnellen Verarbeitung wird in dieser Arbeit die Circular Quantisierung verwendet. In Algorithmus 2 ist dieses Quantisierungsverfahren beispielhaft als Funktion $\text{circularQuantization}(P, w_g)$ implementiert. Die Argumente P und w_g sind die zu quantisierende Sequenz von Abtastpunkten sowie die Gitterweite. Als Rückgabe liefert die Funktion eine Sequenz \bar{P} von Knotenpunkten.

In Abbildung 5.8 ist diese Art der Quantisierung zweier Punkte grafisch dargestellt. Zu sehen ist ein Ausschnitt eines quadratischen Gitters mitsamt den kreisförmigen Umgebungen der Gitterknoten. Der Punkt p_1 liegt innerhalb des Kreises um den Gitterknoten $(1, 1)$, der Punkt p_2 jedoch nicht. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die Knotenbezeichnungen (Knotenkoordinaten) als Vielfache von w_g ausgedrückt werden. Das heißt, die Koordinatensysteme der Abtastpunkte und der Gitterknoten unterscheiden sich in ihren Skalen.

Algorithmus 3 Vereinfachter Bresenham-Linienalgorithmus zur Bestimmung der Gitterknoten p_1 bis p_n zwischen p_{begin} und p_{end}

```

1: function BRESENHAM( $p_{begin}, p_{end}$ )  ▷  $p_{begin} = (x_{begin}, y_{begin})^T, p_{end} = (x_{end}, y_{end})^T$ 
2:    $\Delta x \leftarrow x_{end} - x_{begin}$ 
3:    $\Delta y \leftarrow y_{end} - y_{begin}$ 
4:   if  $|\Delta x| \geq |\Delta y|$  then
5:      $\sigma \leftarrow \text{sgn } \Delta x$                                      ▷ Vorzeichen von  $\Delta x$ 
6:     for  $i \leftarrow 1 \dots |\Delta x|$  do
7:        $x_i \leftarrow x_{begin} + \sigma \cdot i$ 
8:        $y_i \leftarrow \lfloor y_{begin} + i \cdot \Delta y / \Delta x + 0.5 \rfloor$ 
9:        $p_i \leftarrow (x_i, y_i)$ 
10:    end for
11:  else
12:     $\sigma \leftarrow \text{sgn } \Delta y$                                      ▷ Vorzeichen von  $\Delta y$ 
13:    for  $i \leftarrow 1 \dots |\Delta y|$  do
14:       $x_i \leftarrow \lfloor x_{begin} + i \cdot \Delta x / \Delta y + 0.5 \rfloor$ 
15:       $y_i \leftarrow y_{begin} + \sigma \cdot i$ 
16:       $p_i \leftarrow (x_i, y_i)$ 
17:    end for
18:  end if
19:  return  $(p_{begin}, p_1, p_2, \dots, p_{end})$ 
20: end function

```

5 Merkmalsgewinnung

Ohne weitere Verarbeitungsschritte ist es möglich, dass diese Sequenz \bar{P} einerseits aufeinanderfolgende Knotenpunkte mit denselben Koordinatenwerten enthält und andererseits aufeinanderfolgende Knotenpunkte nicht in jedem Fall unmittelbar benachbart sind. Der erste Fall tritt ein, wenn mehrere originale, aufeinanderfolgende Abtastpunkte aus P auf denselben Gitterknoten abgebildet werden. Dies geschieht umso häufiger, je größer der Wert w_g ist und je kleiner die Schreibgeschwindigkeit an der betreffenden Stelle war. Diese Problem kann dadurch gelöst werden, dass die Funktion *deleteDoubles()* aus Abschnitt 5.1.1 auf die Sequenz \bar{P} angewandt wird. Der Fall, dass aufeinanderfolgende Knotenpunkte aus \bar{P} nicht unmittelbar benachbart sind, kann etwa dadurch eintreten, dass der Wert w_g sehr klein gewählt wird oder dass die Schreibgeschwindigkeit vergleichsweise hoch war. In solchen Fällen ist es nötig, weitere Gitterknoten zu selektieren, sodass die aufeinanderfolgenden Knoten unmittelbar benachbart sind. Dazu kann beispielsweise eine Version des Bresenham-Algorithmus für Linien [Bre65] verwendet werden (siehe Algorithmus 3).

Die Bestimmung der Merkmalszeichenkette $s = s_1 s_2 s_3 \dots s_{n-1}$ mit $s \in \mathbb{A}_{\square}^{n-1}$ aus einer Sequenz \bar{P} von n unmittelbar benachbarten Gitterknotenpunkten $\bar{p}_1 \bar{p}_2 \dots \bar{p}_n$ kann mit der in Algorithmus 4 dargestellten Funktion *extractSquareGridCoding(\bar{P})* geschehen. Hierzu werden die Nachbarschaftsbeziehungen aufeinanderfolgender Gitterknotenpunkte \bar{p}_i und \bar{p}_{i+1} für $1 \leq i < n$ entsprechend des in Abbildung 5.7 dargestellten Schemas durch Elemente des Alphabets \mathbb{A}_{\square} kodiert.

Algorithmus 4 Verfahren zur Kodierung von Nachbarschaftsbeziehungen in Sequenzen von Gitterpunkten

```

1: function EXTRACTSQUAREGRIDCODING( $\bar{P}$ )
2:    $s \leftarrow \lambda$                                      ▷ initialisiere s als leere Zeichenkette
3:    $n \leftarrow |\bar{P}|$ 
4:   for  $i \leftarrow 1, \dots, n-1$  do
5:      $(\bar{x}_i, \bar{y}_i) \leftarrow \bar{p}_i$ 
6:      $(\bar{x}_{i+1}, \bar{y}_{i+1}) \leftarrow \bar{p}_{i+1}$ 
7:     if  $\bar{x}_i < \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i = \bar{y}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|0$            ▷ Symbol 0 an s anfügen
8:     else if  $\bar{x}_i < \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i < \bar{y}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|1$        ▷ Symbol 1 an s anfügen
9:     else if  $\bar{x}_i = \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i < \bar{y}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|2$        ▷ Symbol 2 an s anfügen
10:    else if  $\bar{x}_i > \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i < \bar{y}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|3$ 
11:    else if  $\bar{x}_i > \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i = \bar{y}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|4$ 
12:    else if  $\bar{x}_i > \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i > \bar{y}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|5$ 
13:    else if  $\bar{x}_i = \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i > \bar{y}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|6$ 
14:    else if  $\bar{x}_i < \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i > \bar{y}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|7$ 
15:    end if
16:  end for
17:  return s
18: end function

```

5.2.2 Dreiecksgitter

Alternativ zu dem in Abschnitt 5.2.1 erläuterten Verfahren, die Handschriftdokumente mit einem quadratischen Gitter zu überlagern und die Stiftbewegung anhand dieses Gitters zu quantisieren, ist auch die Verwendung von Gittern auf Basis gleichseitiger Dreiecke möglich⁸. Der Autor dieser Arbeit ließ diese Dreiecksgittermerkmale erstmals zum Zwecke der Suche in Handschriftdaten von *N. Mahmood* in dessen Masterarbeit [Mah07] untersuchen. Im Unterschied zu quadratischen Gittern besitzen die Knotenpunkte in einem solchen dreieckigen Gitter nicht acht, sondern sechs Nachbarknoten. Der Abstand zu allen sechs Nachbarn ist dabei konstant und entspricht der Kantenlänge der Dreiecke (siehe Abbildung 5.9), während im Fall von quadratischen Gittern der Abstand zu den vier horizontalen und vertikalen Nachbarknoten geringer ist als der zu den vier diagonalen Nachbarknoten.

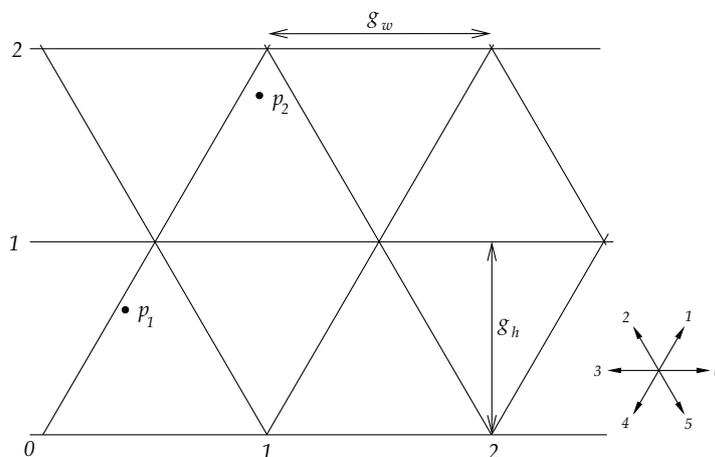


Abbildung 5.9: Darstellung eines dreieckigen Gitters sowie des Kodierungsschemas der Nachbarschaftsbeziehung von Knoten

Wie im Falle der Verwendung quadratischer Gitter ist es hier nötig, jene Gitterknoten zu bestimmen, die den Abtastpunkten der Handschrifteingabe am nächsten liegen. Im Folgenden müssen etwaige Lücken zwischen aufeinanderfolgenden Abtastpunkten geschlossen werden, indem weitere relevante Knotenpunkte selektiert werden, falls diese nicht unmittelbar benachbart sind. Zuletzt muss wiederum die Art der Nachbarschaftsbeziehung der Knotenpaare bestimmt und kodiert werden. Für diese Kodierung wird ein Alphabet $\mathbb{A}_\Delta = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ verwendet.

Der zu einem Abtastpunkt $p = (x, y)$ nächstgelegene Gitterknotenpunkt $\bar{p} = (\bar{x}, \bar{y})$ kann mit

⁸Neben Quadraten sind gleichseitige Dreiecke und gleichseitige Sechsecke die einzigen geometrischen Gebilde, aus denen sich regelmäßige ebene Gitter bilden lassen. Sechsecke werden hier nicht betrachtet, da deren Beschränkung auf jeweils drei Richtungen pro Gitterknoten nur eine geringe Ausdrucksmächtigkeit zur Formbeschreibung besitzen.

5 Merkmalsgewinnung

den folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\bar{y} = \lfloor \frac{y}{g_h} + 0.5 \rfloor \quad \text{mit} \quad g_h = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \cdot g_w \quad (5.18)$$

$$\bar{x} = \begin{cases} \lfloor \frac{x}{g_w} \rfloor & \text{falls } \bar{y} \text{ ungerade,} \\ \lfloor \frac{x}{g_w} + 0.5 \rfloor & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.19)$$

Hier ist g_w erneut die Gitterweite; g_h ist die Höhe der Dreiecke des Gitters. Die vertikale Koordinate (\bar{y}) eines Knotenpunktes entspricht also, wie bei quadratischen Gittern, derjenigen horizontalen Gitterlinie, die dem jeweiligen Abtastpunkt am nächsten liegt. Die horizontalen Koordinaten (\bar{x}) liegen jedoch, aufgrund der Dreiecksform des Gitters, nicht auf einer geraden Linie, sondern vielmehr auf den Eckpunkten einer Art von Zickzacklinie. Entsprechend der Gleichung 5.19 haben die Gitterknoten a, b, c und d in Abbildung 5.10 (links) den selben Wert für \bar{x} , nämlich $\bar{x} = 0$. Mit einer gewissen Verzerrung, wie sie in Abbildung 5.10 (rechts) dargestellt ist, lässt sich ein Dreiecksgitter als Quadratgitter deuten, in welchem bestimmte diagonale Nachbarschaften von Knoten nicht existieren. Diese Kodierung wird durch die Funktion *extractTriangularGridCoding*(\bar{P}) in Algorithmus 5 realisiert.

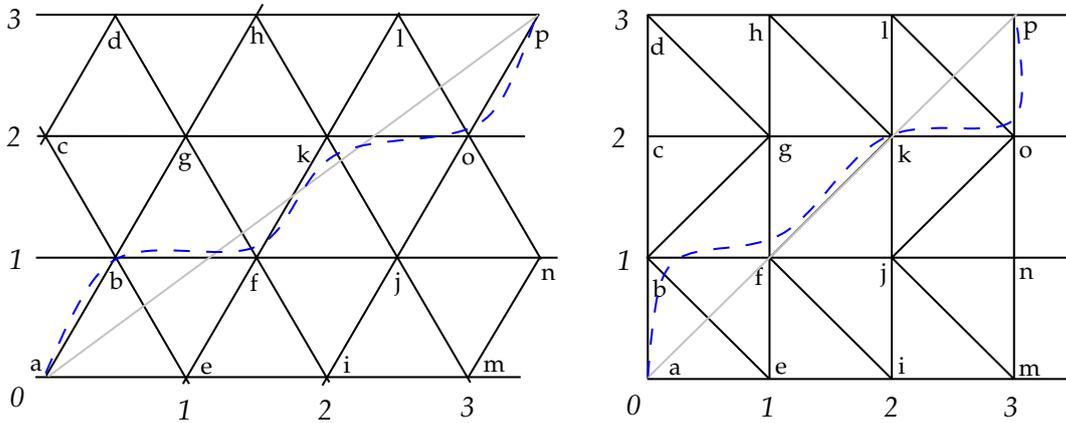


Abbildung 5.10: Zusammenhang zwischen Gittern auf Basis von gleichseitigen Dreiecken und Quadraten

5.3 Lokale Strichrichtung

Um die Beschränkung der Anzahl möglicher Richtungen auf acht beziehungsweise sechs bei der Verwendung der Gitteransätze aus den vorangegangenen Abschnitten zu überwinden, ist es möglich, die lokale Strichrichtung (engl. *slope*) ohne Verwendung von Gittern zu bestimmen [HRG94, FH96, Sim03, SV06c]. Die lokale Strichrichtung wird in der Literatur vielfach dadurch bestimmt, dass der Winkel, den die Sekante zwischen aufeinanderfolgenden Abtastpunkten p_i und p_{i+1} mit der x-Achse bildet, berechnet wird (siehe auch Abbildung 5.11):

$$\varphi'_i = \text{atan}(y_{i-1} - y_i, x_{i-1} - x_i) \quad (5.20)$$

Algorithmus 5 Verfahren zur Kodierung von Nachbarschaftsbeziehungen in Sequenzen von Knotenpunkten in Dreiecksgittern

```

1: function EXTRACTTRIANGULARGRIDCODING( $\bar{P}$ )
2:    $s \leftarrow \lambda$  ▷ initialisiere s als leere Zeichenkette
3:   for  $i \leftarrow 1, \dots, n-2$  do
4:      $(\bar{x}_i, \bar{y}_i) \leftarrow \bar{p}_i$ 
5:      $(\bar{x}_{i+1}, \bar{y}_{i+1}) \leftarrow \bar{p}_{i+1}$ 
6:     if  $\bar{y}_i = \bar{y}_{i+1}$  and  $\bar{x}_i < \bar{x}_{i+1}$  then    $s \leftarrow s|0$ 
7:     else if  $\bar{y}_i = \bar{y}_{i+1}$  and  $\bar{x}_i > \bar{x}_{i+1}$  then  $s \leftarrow s|3$ 
8:     else if  $\bar{y}_i < \bar{y}_{i+1}$  then
9:       if  $\bar{x}_i < \bar{x}_{i+1}$  or  $(\bar{x}_i = \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i$  is odd) then  $s \leftarrow |1$ 
10:      else  $s \leftarrow |2$ 
11:      end if
12:    else
13:      if  $\bar{x}_i > \bar{x}_{i+1}$  or  $(\bar{x}_i = \bar{x}_{i+1}$  and  $\bar{y}_i$  is odd) then  $s \leftarrow |4$ 
14:      else  $s \leftarrow |5$ 
15:      end if
16:    end if
17:  end for
18:  return  $s$ 
19: end function

```

Die bivariate Funktion $\text{atan}(\cdot, \cdot)$ mit einem Wertebereich im rechtsoffenen Intervall $[0, 2\pi[$ sei definiert als:

$$\text{atan}(y, x) = \begin{cases} \arctan(y/x) & \text{falls } x > 0, y \geq 0, \\ \arctan(y/x) + 2 \cdot \pi & \text{falls } x > 0, y < 0, \\ \arctan(y/x) + \pi & \text{falls } x < 0, \\ \pi/2 & \text{falls } x = 0, y > 0, \\ 3 \cdot \pi/2 & \text{falls } x = 0, y < 0, \\ \text{undefiniert} & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.21)$$

Eine genauere Berechnung der lokalen Strichrichtung basiert auf der Verwendung der Tangenten an der Schriftkurve. Die Schriftkurve nach erfolgter Neuabtastung (siehe Abschnitt 5.1.3) kann als Funktion in Parameterform ausgedrückt werden (siehe auch Gleichung 5.9):

$$P(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} f_x(\mathbf{k}) \\ f_y(\mathbf{k}) \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

Wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben wurde, gibt der Funktionsparameter \mathbf{k} in dieser Arbeit die Bogenlänge an. Die Funktion $P(\mathbf{k})$ bestimmt also die Koordinaten (x, y) auf der Handschriftkurve, nachdem der Stift einen Weg von \mathbf{k} Längeneinheiten zurückgelegt hat. Bei Darstellung der ersten Ableitung $P'(\mathbf{k})$ als komplexen Ausdruck $P'_C(\mathbf{k})$ der Form

$$P'_C(\mathbf{k}) = f'_x(\mathbf{k}) + i \cdot f'_y(\mathbf{k}) \quad \text{mit } i^2 = -1, \quad i, P'_C(\mathbf{k}) \in \mathbb{C} \quad (5.23)$$

5 Merkmalsgewinnung

lässt sich die Strichrichtung (Tangentenanstiegswinkel) an der Stelle \mathbf{k} dadurch bestimmen, dass dieser komplexe karthesische Ausdruck in die Polarform (r, φ) überführt wird [Sim03]. Hierbei stehen r und φ für den Radius beziehungsweise den Winkel des komplexen Ausdrucks:

$$r \cdot e^{i\varphi} = r \cdot (\cos \varphi + i \cdot \sin \varphi) \quad (5.24)$$

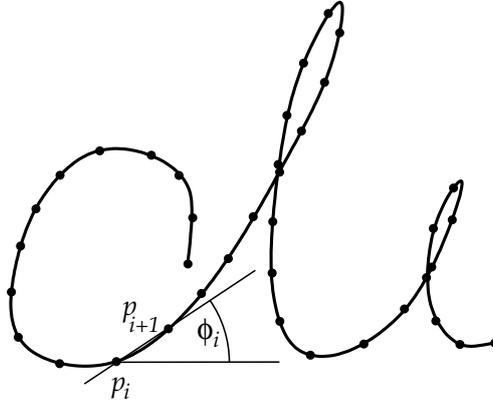


Abbildung 5.11: Bestimmung der lokalen Strichrichtung mittels des Sekantenverfahrens

Die Ableitungen $f'_x(\mathbf{k})$ und $f'_y(\mathbf{k})$ lassen sich mithilfe der Polynomparameter der Splinefunktion bestimmen (siehe Gleichung 5.14). Der Tangentenanstiegswinkel $\varphi(\mathbf{k})$ an der Stelle \mathbf{k} kann damit folgendermaßen ermittelt werden:

$$\varphi(\mathbf{k}) = \text{atan}(f'_y(\mathbf{k}), f'_x(\mathbf{k})) \quad (5.25)$$

Aus den solchermaßen gewonnenen reellen Werten $\varphi(\mathbf{k})$ der Tangentenanstiegswinkel an den Stellen \mathbf{k} lassen sich diskrete Merkmale gewinnen, die denen aus den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 vergleichbar sind. Hierfür wird eine Quantisierungsfunktion quant_q verwendet, die wie folgt definiert ist:

$$\text{quant}_q(\varphi) = \left\lfloor \frac{q \cdot \varphi}{2 \cdot \pi} \right\rfloor \quad \text{mit } q \in \mathbb{N}, q > 1, \varphi \in [0, 2 \cdot \pi[\quad (5.26)$$

Die Funktion quant_q realisiert eine surjektive Abbildung des reellwertigen Definitionsbereiches $[0, 2 \cdot \pi[$ auf den ganzzahligen Wertebereich $[0, q - 1]$. Der Wertebereich entspricht also dem Alphabet $\mathbb{A}_{(q)} = \{0, 1, \dots, q - 1\}$. Der Wert q ist hierbei der *Grad der Quantisierung*; je größer q ist, desto feiner ist die Unterteilung darstellbarer Winkel. Für quant_q gilt:

$$\text{quant}_q : [0, 2 \cdot \pi[\rightarrow \mathbb{A}_{(q)} \quad (5.27)$$

Die Funktion $\text{extract}_{\text{slope}}$ zur Merkmalsextraktion, basierend auf der lokalen Strichrichtung, kann als verschachtelte Funktion ausgedrückt werden:

$$\text{extract}_{\text{slope}}(\mathbf{P}, q) = \text{quant}_q(\text{atan}(f'_y, f'_x)) \quad \text{mit } \mathbf{P} = (f_x, f_y)^T, \quad q \in \mathbb{N}, q > 1 \quad (5.28)$$

5.4 Lokale Schriftkrümmung

Neben der lokalen Schreibrichtung, wie sie im vorigen Abschnitt beschrieben wurde, ist auch die lokale Schriftkrümmung (engl. *curvature*) ein Merkmal, das die Form einer handschriftlichen Eingabe beschreibt. Die Schriftkrümmung wurde unter anderem von *Schomaker* und *Segers* in [SS99] und von *Jain* und *Namboodiri* in [JN03] für Handschriftdaten untersucht.

Die Krümmung einer Kurve beschreibt den Grenzwert des Verhältnisses der Richtungsänderung (der Tangente) zur Bogenlänge. In der Literatur wurde die Krümmung zum Teil vereinfacht dadurch bestimmt [JN03, SV07], dass jener Winkel berechnet wird, den zwei Sekanten (jeweils definiert durch zwei aufeinanderfolgende Abtastpunkte) miteinander bilden, die sich in einem Abtastpunkt p_i schneiden (siehe Abbildung 5.12 links).

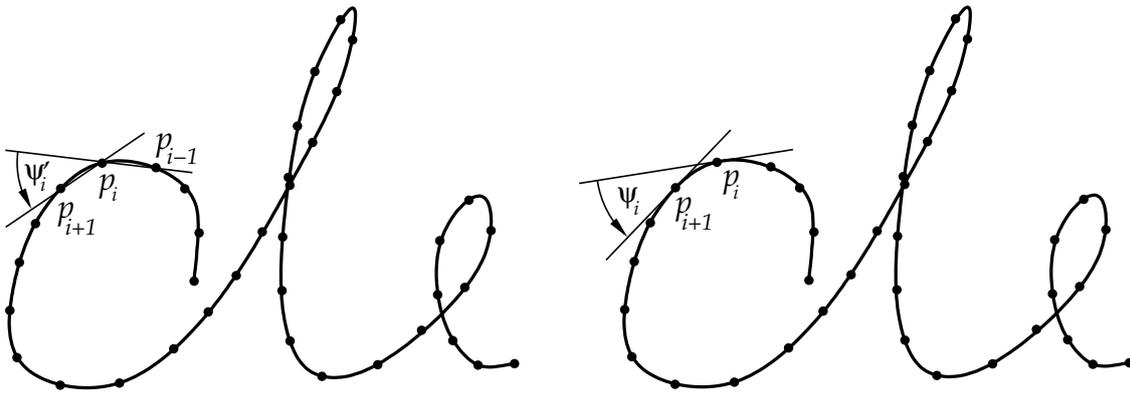


Abbildung 5.12: Bestimmung der lokalen Schriftkrümmung mittels des Sekantenverfahrens (links) sowie des Tangentenverfahrens (rechts)

$$\psi'_i = \angle p_{i-1} p_i p_{i+1} \quad (5.29)$$

$$= \text{atan}(y_{i+1} - y_i, x_{i+1} - x_i) - \text{atan}(y_i - y_{i-1}, x_i - x_{i-1}) \quad (5.30)$$

Eine andere Berechnung der Krümmung basiert auf der Bestimmung des Winkels zwischen Tangenten an aufeinanderfolgenden Abtastpunkten. In Abbildung 5.12 (rechts) ist diese Art der Krümmungsberechnung illustriert. Die Tangentenwinkel können beispielsweise wie folgt mit dem in Abschnitt 5.3 diskutierten Verfahren (Gleichung 5.25) ermittelt werden:

$$\psi_i = \varphi(\mathbf{k}_{i+1}) - \varphi(\mathbf{k}_i) \quad (5.31)$$

Eine weitere Art der Berechnung der Krümmung erfolgt laut [BS73, Wei99] unter Zuhilfenahme der ersten und zweiten Ableitungen der Funktionen f_x und f_y in der folgenden Weise:

$$\kappa(\mathbf{k}) = \frac{f'_x(\mathbf{k}) \cdot f''_y(\mathbf{k}) - f''_x(\mathbf{k}) \cdot f'_y(\mathbf{k})}{(f'_x(\mathbf{k})^2 - f'_y(\mathbf{k})^2)^{3/2}} \quad (5.32)$$

Der Kehrwert der Krümmung κ ist gleich dem Krümmungsradius $r = 1/\kappa$ (siehe auch Abbildung 5.13).

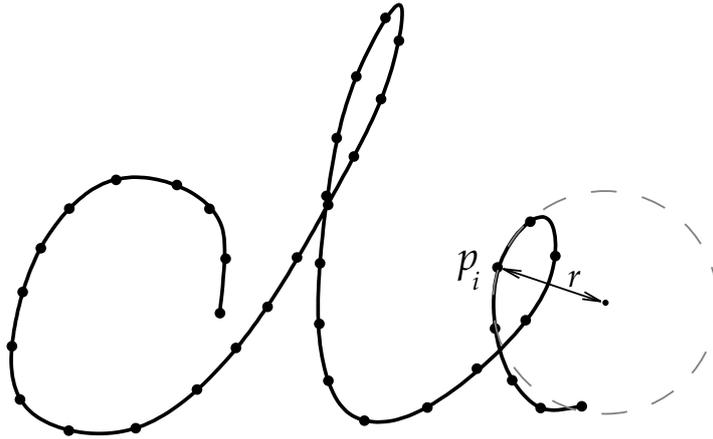


Abbildung 5.13: Bestimmung der lokalen Schriftkrümmung mittels Krümmungsradius

Aufgrund der Tatsache, dass der Wert der Krümmung κ einen offenen Wertebereich von $-\infty$ bis ∞ hat, ist eine Quantisierung der Werte in diskrete Wertebereiche mit der Gleichung 5.26 aus dem vorangegangenen Abschnitt nicht möglich. In dieser Arbeit soll auf diese Art der Krümmungsberechnung für die Merkmalsgewinnung verzichtet und stattdessen das Tangentenverfahren verwendet werden.

5.5 Lokale Schriftneigung

Eine weitere Möglichkeit, lokale Merkmale aus Handschriftdaten zu gewinnen, ist die Berechnung der *Schriftneigung* (auch *Schriftlage*⁹, engl. *slant*). Dieses Merkmal wurde unter anderem von *Denoue* und *Chiu* für die Handschriftanalyse verwendet [DC05]. Als lokale Schriftneigung soll hierbei die Richtung zwischen zwei Abtastpunkten $p_i = (x_i, y_i)^T$ und $p_{i+j} = (x_{i+j}, y_{i+j})^T$ verstanden werden, für die gilt:

$$\forall y_k (k \in [i - \varepsilon, i + \varepsilon] \implies y_i \geq y_k) \wedge \forall y_l (l \in [i + j - \varepsilon, i + j + \varepsilon] \implies y_{i+j} \leq y_l) \quad (5.33)$$

oder

$$\forall y_k (k \in [i - \varepsilon, i + \varepsilon] \implies y_i \leq y_k) \wedge \forall y_l (l \in [i + j - \varepsilon, i + j + \varepsilon] \implies y_{i+j} \geq y_l) \quad (5.34)$$

Im ersten Fall (Gleichung 5.33) wird also die Richtung zwischen einem *Hochpunkt* (lokales vertikales Maximum) und dem nächsten *Tiefpunkt* (lokales vertikales Minimum) bestimmt. Im umgekehrten Fall (Gleichung 5.34) ist die Richtung zwischen einem Tiefpunkt und dem nächsten Hochpunkt gefragt. In Abbildung 5.14 sind die entsprechenden Abtastpunkte (p_1, p_5, p_{11}, \dots) sowie die jeweiligen Richtungen beispielhaft skizziert.

⁹Die forensische Schriftexpertise definiert: »Schriftlage ist der Neigungswinkel, den die Abstriche, insbesondere der Langlängen, gelegentlich aber auch der Kurzlängen, mit der Zeilenbasis bilden. Man unterscheidet rechtsschräge Schrift (30 bis 80 Grad), steile Schriften (80 bis 90 Grad) und linksschräge Schriften (über 90 Grad).« [Pfa54, S. 40]

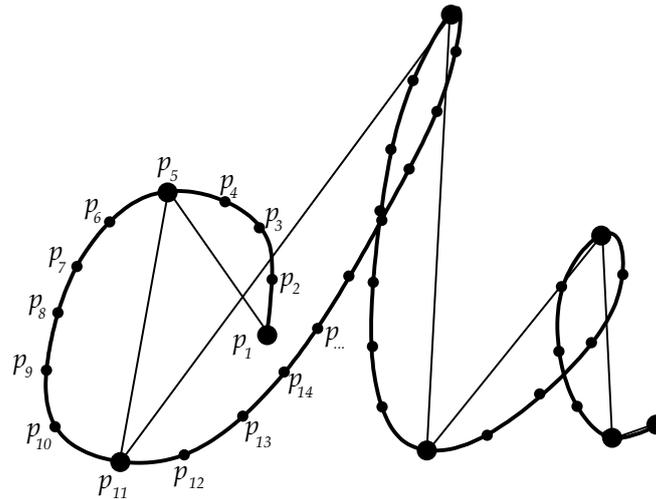


Abbildung 5.14: Bestimmung der lokalen Schriftneigung

Die Richtung ϑ zwischen zwei Abtastpunkten p_i und p_{i+j} kann unter Verwendung der Funktion *atan* (Gleichung 5.21) bestimmt werden:

$$\vartheta(p_i, p_{i+j}) = \text{atan}(y_{i+j} - y_i, x_{i+j} - x_i) \quad (5.35)$$

Wie bei der lokalen Schriftrichtung und -krümmung, wird auch zur Merkmalsextraktion auf Basis der Schriftneigung eine Quantisierung (Gleichung 5.26) der Winkelinformation vorgenommen, um einen diskreten Wertebereich zu erhalten:

$$\text{extract}_{\text{slant}}(P, q) = \text{quant}_q(\vartheta(p_i, p_{i+j})) \quad (5.36)$$

5.6 Zusammenfassung

Den Hauptteil dieses Kapitels bildet die Darstellung von fünf verschiedenen Merkmalstypen (zwei verschiedene Gittermerkmale sowie die lokale Schriftrichtung, -krümmung und -neigung) für die Beschreibung der Form on-line erfasster, handschriftlicher Daten. Allen fünf Merkmalstypen ist gemein, dass sie die Handschrift als Sequenz lokaler Merkmale (engl. *feature strings*) repräsentieren. Die folgende Tabelle (5.1) fasst diese Merkmale sowie ihre jeweiligen Parameter zusammen. In Anhang F findet sich darüber hinaus eine grafische Darstellung der für die Extraktion dieser Merkmale bei unterschiedlicher Parametrisierung benötigten Zeit auf einem typischen Desktop-PC¹⁰.

Neben den in diesem Kapitel diskutierten Merkmalen sind weitere Arten denkbar und zum Teil in der Literatur auch bereits untersucht worden [PRZ02, RPCZ02]. Von daher ist das in der vorliegenden Arbeit entwickelte System zur Suche in Handschriftdokumenten leicht um andere Merkmalstypen erweiterbar. Insbesondere käme hier auch die textuelle Erkennung

¹⁰Für die Tests wurde das Retrievalsystem in Java (1.5.0) implementiert. Es lief auf einem Desktop-PC mit AMD-Athlon-Prozessor (2,8 GHz) mit 1 GB Arbeitsspeicher unter dem Linux-Betriebssystem (2.6.13).

5 Merkmalsgewinnung

Merkmaltyp	Parameter
quadratische Gitter	Gitterweite (w_g)
Dreiecksgitter	Gitterweite (w_g)
lokale Schriftrichtung	Punktweite nach Neuabtastung (w), Quantisierungsgrad (q)
lokale Schriftkrümmung	Punktweite nach Neuabtastung (w), Quantisierungsgrad (q)
lokale Schriftneigung	Quantisierungsgrad (q)

Tabelle 5.1: Übersicht über die fünf in dieser Arbeit untersuchten Merkmaltypen sowie ihrer Parameter

der handgeschriebenen Inhalte in Betracht, bei der die Merkmalssequenzen beispielsweise aus Zeichen über dem lateinischen Alphabet bestünden. Hierdurch würde die Schreiberabhängigkeit der Suche überwunden werden, die das in dieser Arbeit entwickelte System besitzt. Voraussetzung wäre jedoch die Existenz leistungsfähiger und für viele unterschiedliche, auch unsaubere, Handschriften geeignete Erkennungsverfahren. Zudem verlöre das System bei der ausschließlichen Verwendung der Texterkennung die Fähigkeit, nach gezeichneten Dokumentbestandteilen zu suchen.

6 Suche mit Fehlern

Auch der Erfinder der Schrift hat Schreibfehler gemacht
(aus Japan)

Wie in Kapitel 5 beschrieben, können aus den Bewegungssignalen handschriftlicher Eingaben Merkmale gewinnungszweise extrahiert werden, welche die Form von Zeichenketten (*feature strings*) haben. Das Problem der Suche in handschriftlichen Dokumenten kann gelöst werden, indem eine Suche mit Mitteln des Fachgebietes der *Stringology*, das heißt der Textalgorithmen, innerhalb dieser Zeichenketten durchgeführt wird¹.

Mehrere Faktoren führen dazu, dass zwei handschriftliche Realisierungen desselben Wortes fast nie genau die gleichen Zeichenketten ergeben. So tritt, wie bei jeder Umwandlung von analogen Signalen in digitale Daten, ein Quantisierungsfehler auf, der die Daten verfälscht. Das gleiche geschieht, in noch größerem Umfang, bei der Merkmalsextraktion, die ebenfalls eine Quantisierung der Daten beinhaltet. Der wichtigste Grund ist jedoch, dass der Mensch nicht in der Lage ist, ein Wort wiederholt exakt gleich zu schreiben.

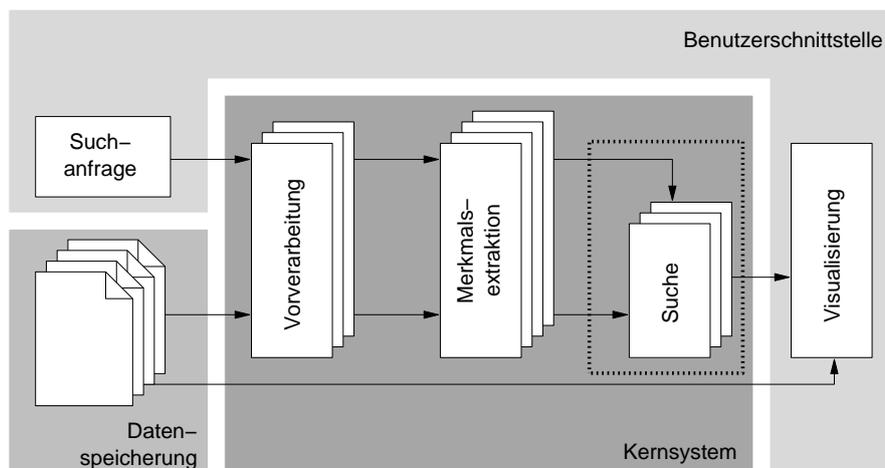


Abbildung 6.1: Schematischer Aufbau des Handschriftsuchsystems

Aus diesen Gründen ist eine exakte Suche² innerhalb der Merkmalszeichenketten nicht zielführend. Stattdessen ist ein Suchverfahren nötig, das eine gewisse Toleranz gegenüber

¹»The term *stringology* is a popular nickname for string algorithms as well as for text algorithms. Usually text and string have the same meaning. More formally, a text is a sequence of symbols.« [CR03]

²Für die exakte Suche in Zeichenketten existiert eine Reihe verschiedener Algorithmen, beispielsweise Knuth-Morris-Pratt, Boyer-Moore, Boyer-Moore-Horspool, Shift-OR und Karp-Rabin, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Es sei stattdessen auf die Literatur verwiesen [BY92, Gus97].

Fehlern aufweist. Das heißt, die Suche soll Stellen innerhalb einer Zeichenkette finden, die zu einer Vergleichszeichenkette »ähnlich« sind. In Abschnitt 6.1 wird der Begriff der *Ähnlichkeit* zwischen Zeichenketten untersucht; im folgenden Abschnitt 6.2 wird ein Suchalgorithmus diskutiert, der auf Grundlage dieser Ähnlichkeit eine fehlertolerante Suche ermöglicht. In Abbildung 6.1 ist die Einordnung des Gegenstandes dieses Kapitels in das Blockschema des Suchsystems dargestellt, wie es in Kapitel 4 eingeführt wurde.

6.1 Ähnlichkeiten von Zeichenketten

Für den generellen Begriff der Ähnlichkeit von Objekten gibt es keine feste Definition. Jedoch kann ein *Ähnlichkeitsmaß* als eine Funktion betrachtet werden, »die einem Paar von Objekten eine Zahl aus dem reellen Intervall $[0, 1]$ zuordnet. Dabei korrespondiert der Wert 1 zur maximalen Ähnlichkeit und der Wert 0 zur maximalen Unähnlichkeit.« [Sch04, S. 195]

In der Praxis ist es üblich, ein Ähnlichkeitsmaß für konkrete Objekte $o, o_1, o_2, o_3 \in O$ durch eine Distanzfunktion zu realisieren. Unter Distanzfunktionen sind solche Funktionen *distance* : $O \times O \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ zu verstehen, die den folgenden vier Bedingungen genügen [Sch04, S. 152]:

- Selbstidentität: $\forall o \in O, distance(o, o) = 0$
- Positivität: $\forall o_1, o_2 \in O, o_1 \neq o_2 \iff distance(o_1, o_2) > 0$
- Symmetrie: $\forall o_1, o_2 \in O, distance(o_1, o_2) = distance(o_2, o_1)$
- Dreiecksungleichung:
 $\forall o_1, o_2, o_3 \in O, distance(o_1, o_3) \leq distance(o_1, o_2) + distance(o_2, o_3)$

Wird ein Ähnlichkeitsmaß mittels einer Distanz ausgedrückt, ist es nötig, die berechneten Distanzwerte in Ähnlichkeitswerte aus dem Intervall $[0, 1]$ umzuwandeln. Falls es einen maximalen Wert $distance_{max}$ gibt, den $distance(\cdot, \cdot)$ nicht überschreiten kann, so ist eine Umwandlung der Distanz in ein Ähnlichkeitsmaß mittels einer einfachen Linearkombination $f(\cdot)$ möglich [Sch04, S. 223f]:

$$f(distance) = 1 - \frac{distance}{distance_{max}} \quad (6.1)$$

Zwei der in den folgenden Teilabschnitten beschriebenen Abstandsfunktionen für Zeichenketten erfüllen die oben geforderten vier Distanzbedingungen.

6.1.1 Editierabstand

Um die Unähnlichkeit, das heißt den Abstand, zweier Zeichenketten zu bestimmen, wird zu meist der so genannte *Editierabstand* (engl. *edit distance*) verwendet. Die Idee dahinter ist, dass eine Zeichenkette r in eine andere Zeichenkette s überführt werden kann, indem bestimmte Operationen (die so genannten *Editieroperationen*) auf die Elemente der ersten Zeichenkette angewandt werden. Im Falle des klassischen Editierabstandes [Lev65, Lev66] sind dies die Operationen *Einfügen*, *Löschen* und *Ersetzen* einzelner Zeichen. Je geringer die Anzahl der

benötigten Operationen zur Überführung von r in s ist, umso *ähnlicher* sind die Zeichenketten r und s einander.

Laut [Kru99] wurden Algorithmen zur Bestimmung des klassischen Editierabstandes nach *V. I. Levenshtein* [Lev66] von verschiedenen Autoren in kurzer Folge unabhängig voneinander publiziert, beispielsweise in [Vin68, WF74, Hir75]. Statt Editierabstand findet sich in der Literatur häufig auch die Bezeichnung Levenshtein-Abstand. Da für die Bestimmung des Editierabstandes zumeist auf *Wagner* und *Fisher* [WF74] verwiesen wird, soll deren Verfahren der *dynamischen Programmierung* hier kurz skizziert werden. Das Verfahren beruht darauf, eine Matrix D , die so genannte Distanzmatrix, der Größe $(m+1) \times (n+1)$ zu bestimmen, wie dies in den Gleichungen 6.2 bis 6.4 beschrieben ist. Es seien $m = |r|$ die Länge der Zeichenkette r und $n = |s|$ die Länge der Zeichenkette s .

$$D_{0,0} = 0 \quad (6.2)$$

$$D_{i,0} = i \quad (6.3)$$

$$D_{0,j} = j \quad (6.4)$$

$$D_{i,j} = \min \left\{ \begin{array}{l} D_{i-1,j-1} + d(i,j), \\ D_{i-1,j} + 1, \\ D_{i,j-1} + 1 \end{array} \right\} \quad (6.5)$$

$$\text{mit } d(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{falls } r_i \neq s_j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.6)$$

Hierbei ist r_i das i -te Zeichen der Zeichenkette r und s_j das j -te Zeichen von s ; r_i und s_j sind Elemente eines endlichen Alphabetes \mathbb{A} , so dass gilt $r, s \in \mathbb{A}^*$.

Das Element der Distanzmatrix D an der Stelle (i, j) mit $0 < i \leq m$ und $0 < j \leq n$ enthält genau den Editierabstand zwischen den Teilzeichenketten $r_{1\dots i}$ und $s_{1\dots j}$. Hierbei gelte:

$$r_{1\dots i} = r_1 r_2 r_3 \dots r_i \quad \text{und} \quad s_{1\dots j} = s_1 s_2 s_3 \dots s_j \quad (6.7)$$

Daraus folgt, dass der Editierabstand zweier Zeichenketten r und s genau dem Wert $D_{m,n}$ der oben bestimmten Distanzmatrix D entspricht. Um diesen Wert $D_{m,n}$ zu bestimmen, müssen alle $(m+1) \times (n+1)$ Elemente der Matrix D bestimmt werden, sodass sich eine Berechnungskomplexität von $O(m \cdot n)$ ergibt.

Es lässt sich zeigen, dass der Editierabstand zweier Zeichenketten r und s stets im ganzzahligen Intervall $[0, \max\{m, n\}]$ liegt, mit $m = |r|$ und $n = |s|$. Die untere Intervallschranke 0 bezeichnet trivial die Äquivalenz von r und s :

$$r = s \iff (m = |r| = |s|) \wedge \forall i \in [1, m], (r_i = s_i) \quad (6.8)$$

Die obere Intervallschranke $\max\{m, n\}$ betrifft den Fall, dass r und s an jeder Position verschieden sind, also höchstens $\min\{m, n\}$ Ersetzungsoperationen sowie zusätzlich höchstens $|m - n|$ Einfüge- beziehungsweise Löschoptionen nötig sind, um r in s zu überführen.

Mit dieser Angabe des maximal möglichen Editierabstandes zweier Zeichenketten r und s lässt sich entsprechend der Gleichung 6.1 die Ähnlichkeit $similarity_{edit}(\cdot, \cdot)$ beschreiben:

$$\text{similarity}_{edit}(r,s) = 1 - \frac{\text{distance}_{edit}(r,s)}{\max\{m,n\}} \quad (6.9)$$

Der durchschnittliche Ähnlichkeitswert zweier zufälliger Zeichenketten r und s ist abhängig von der relativen Häufigkeit für das Auftreten der einzelnen Elemente des Alphabetes \mathbb{A} in den Zeichenketten r und s . Sei \mathbb{A} ein Alphabet, bestehend aus l Elementen $0, 1, 2, \dots$: $\mathbb{A} = \{0, 1, 2, \dots\}$. Seien weiterhin p_0, p_1, p_2, \dots die Auftretswahrscheinlichkeiten der Elemente aus \mathbb{A} gleichverteilt: $p_0, p_1, p_2, \dots = 1/l_{+1}$. Der Zusammenhang zwischen der Länge des Alphabetes \mathbb{A} und dem durchschnittlichen Ähnlichkeitswert zweier beliebiger Zeichenketten r und s der selben Länge mit $r, s \in \mathbb{A}^*$ ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Erkennbar ist, dass die durchschnittliche Ähnlichkeit von zufälligen Zeichenketten derselben Länge umso kleiner ist, je größer der Zeichenvorrat des Alphabetes \mathbb{A} ist.

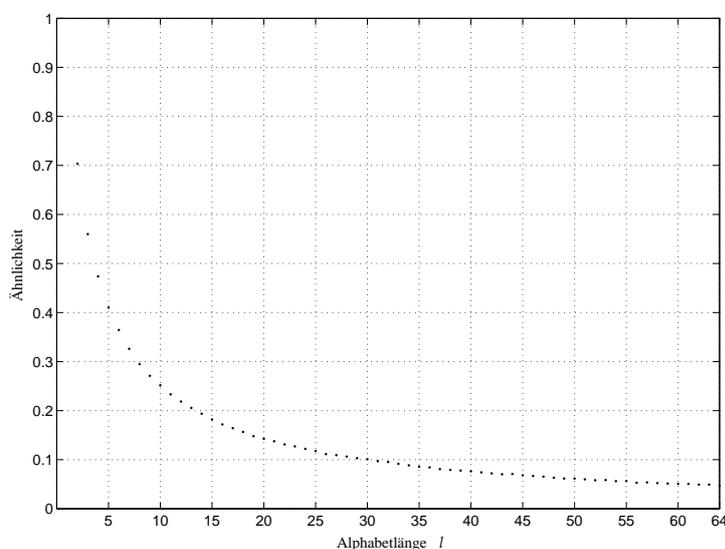


Abbildung 6.2: Zusammenhang zwischen der Alphabetlänge und der durchschnittlichen Ähnlichkeit zweier Zeichenketten derselben Länge

Klassische Einsatzgebiete des Editierabstandes für Zeichenketten sind das Aufspüren von Schreibfehlern in Textverarbeitungssystemen [Mor70, CB04] und die Analyse von Gensequenzen oder Ketten von Aminosäuren in der Bioinformatik [GSR⁺02][Gus97, S. 212ff][SK99, S. 45ff, 93ff][CR03, S.7f]. Daneben wurde der Editierabstand bereits unter anderem für die biometrische Authentifikation mittels der Unterschrift [SVD04] oder zur Erkennung von handgeschriebenen Zeichen [Ven05, JS06] und handgezeichneten Formen [Jon05, CSVV07] verwendet. Auch hierbei wurden Merkmale in Form von Zeichenketten aus den Schreibdaten extrahiert, welche im Fall der Unterschriftenanalyse die Dynamik (Schreibdruck, Geschwindigkeit und Beschleunigung) und im Fall der Zeichen- und Formenerkennung die geometrische Gestalt der Stifteingabe berücksichtigten.

Die Idee, die Distanz zweier Zeichenketten (also eindimensionaler Strukturen) darüber zu definieren, wieviele Editieroperationen benötigt werden, die eine Zeichenkette in die andere

zu überführen, wurde in jüngster Zeit adaptiert für den Vergleich von komplexeren Strukturen, nämlich Graphen. Hierbei wird ein Graph in einen anderen überführt, indem Knoten und Kanten entfernt, hinzugefügt oder ersetzt werden [RKH04, HWKK06, WHKK07].

6.1.2 Varianten des Editierabstandes

Als Varianten oder Erweiterungen des klassischen Editierabstandes können unter anderem die Hamming Distance, die Episode Distance und der Damerau-Levenshtein-Abstand angesehen werden. Die *Hammingdistanz* [Ham50] vergleicht zwei Zeichenketten r und s , indem für alle Zeichen r_i und s_i geprüft wird, ob $r_i = s_i$ gilt; die Hammingdistanz ist die Anzahl von zeichenweisen Unterschieden zwischen r und s . Dieses Abstandsmaß kann also als ein Editierabstand interpretiert werden, bei dem die Operationen *Einfügen* und *Löschen* nicht erlaubt sind. Im Unterschied zum klassischen Editierabstand ist die Hammingdistanz nur für Zeichenketten derselben Länge definiert.

$$distance_{hamming}(r,s) = \sum_{i=1}^m \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{falls } r_i \neq s_i \\ 0 & \text{sonst} \end{array} \right\} \quad \text{mit } m = |r| = |s| \quad (6.10)$$

Im Gegensatz zum klassischen Editierabstand erfolgt die Bestimmung der Hammingdistanz mit einer linearen Berechnungskomplexität von $O(m)$.

Es ist leicht zu sehen, dass der Hammingabstand zweier Zeichenketten r und s maximal den Wert $m = |r|$ annehmen kann, nämlich in dem Fall, dass gilt $\forall i \in [1, m], (r_i \neq s_i)$. Damit lässt sich ein Ähnlichkeitsmaß auf Grundlage der Hammingdistanz wie folgt definieren:

$$similarity_{hamming}(r,s) = 1 - \frac{distance_{hamming}(r,s)}{m} \quad (6.11)$$

Die *Episode Distance* [DFG⁺97, Nav01] erlaubt ausschließlich die Operation *Einfügen*. Dieses Distanzmaß wird für das *Episode Matching* verwendet, das heißt für die Suche nach Mustern innerhalb von Zeichenketten [DFG⁺97]. In Gleichung 6.12 ist die Episode Distance zwischen zwei Zeichenketten r und s formalisiert. Hierbei ist m die Länge von r und das Symbol $*$ ist ein Platzhalter für eine beliebige Anzahl von Zeichen.

$$distance_{episode}(r,s) = \begin{cases} |s| - |r| & \text{falls } (|s| \geq |r|) \wedge (s = *r_1 * r_2 * r_3 * \dots * r_m *), \\ \infty & \text{sonst.} \end{cases} \quad (6.12)$$

Wie leicht zu erkennen, ist die Episode Distance nicht symmetrisch, im Gegensatz beispielsweise zum Hammingabstand. Damit ist die Episode Distance trotz ihres Namens keine Distanzfunktion im eigentlichen Sinne.

Eine dritte Variante des klassischen Editierabstandes ist die *Damerau-Levenshtein-Distanz*. Fred J. Damerau untersuchte in [Dam64], welche Arten von Fehlern bei Texteingaben besonders häufig auftreten. Er beobachtete, dass zumeist nur einzelne Fehler pro Wort auftreten und diese Fehler zu einer der folgenden vier Arten gehören: Vertauschung benachbarter Zeichen im Wort (Buchstabendreher; »Alhpabet« statt »Alphabet«), Verdopplung einzelner Buchstaben (»Allphabet«), Auslassung einzelner Buchstaben (»Alpabet«) und Ersetzung einzelner

Buchstaben durch andere (»Alphsbet«). Lowrance und Wagner kombinierten diese Beobachtung mit dem von Levenshtein in [Lev66] eingeführten Editierabstand zur so genannten Damerau-Levenshtein-Distanz [LW75]. Neben den Operationen *Einfügen*, *Löschen* und *Ersetzen* wird also zusätzlich das *Vertauschen* von benachbarten Zeichen berücksichtigt. Die Bestimmung der Damerau-Levenshtein-Distanz kann auf ähnliche Weise erfolgen wie die des klassischen Editierabstandes (siehe Gleichungen 6.2 bis 6.6). Hierfür wird eine Distanzmatrix DT der Größe $(m + 1) \times (n + 1)$ bestimmt, mit $m = |r|$ und $n = |s|$, für die gilt [Hyy01]:

$$DT_{i,j} = \begin{cases} i & \text{falls } j = 0, \\ j & \text{falls } i = 0, \\ DT_{i-1,j-1} & \text{falls } r_i = s_j, \\ \min \{DT_{i-2,j-2}, DT_{i-1,j}, DT_{i,j-1}\} + 1 & \text{falls } (i, j > 1) \wedge (r_{i-1\dots i}^R = s_{j-1\dots j}), \\ \min \{DT_{i-1,j-1}, DT_{i-1,j}, DT_{i,j-1}\} + 1 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (6.13)$$

Der Ausdruck $r_{i-1\dots i}^R$ steht für die Umkehrung der Teilzeichenkette $r_{i-1\dots i}$. Es gilt also $(r_{i-1\dots i}^R = s_{j-1\dots j}) \Leftrightarrow (r_{i-1} = s_j \wedge r_i = s_{j-1})$. Die Damerau-Levenshtein-Distanz $distance_{DL}$ zweier Zeichenketten r und s ergibt sich durch $distance_{DL}(r, s) = DT_{m,n}$.

Die Damerau-Levenshtein-Distanz ist keine Distanzfunktion im engeren Sinne, da die Dreiecksungleichung nicht erfüllt ist. Dies kann an einem einfachen Beispiel gezeigt werden [Boi01]: die Damerau-Levenshtein-Distanz der Zeichenketten »no« und »on« beträgt offensichtlich eins, ebenso wie die zwischen »on« und »orn«; der Abstand zwischen »no« und »orn« ist jedoch drei.

6.2 Approximative Stringsuche mittels dynamischer Programmierung

Wie bereits erwähnt, wird die Suche nach Worten, nach Gruppen oder Teilen von Worten oder nach Symbolen in handschriftlichen Dokumenten dadurch realisiert, dass sowohl aus den Sucheingaben als auch aus den zu durchsuchenden Dokumenten Merkmale in Form von Sequenzen extrahiert (siehe Kapitel 5) und anschließend die Merkmalssequenzen der Dokumente durchsucht werden nach solchen Teilsequenzen (engl. *subsequence* oder *substring*), die mindestens eine festgelegte Ähnlichkeit oder, mit anderen Worten, höchstens eine festgelegte Distanz zur Merkmalssequenz der Sucheingabe haben; dies wird auch als *Suche mit Fehlern* (engl. *fuzzy string searching*) bezeichnet.

Der naive Ansatz für diese Suche mit Fehlern wäre es, für jede Teilsequenz der Merkmalssequenzen der Dokumente die Ähnlichkeit zur Merkmalssequenz der Sucheingabe zu bestimmen. Da eine Sequenz der Länge l jedoch $\sum_{i=1}^l i = l \cdot (l+1) / 2$ voneinander verschiedene Teilsequenzen hat und die Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Sequenzen, etwa mittels des Editierabstandes, eine quadratische Zeitkomplexität aufweist, ist sehr schnell einsichtig, dass dieser Ansatz nicht praktikabel ist.

Um das Problem des naiven Ansatzes zu umgehen ist ein anderes Vorgehen nötig. Die einfachste Möglichkeit hierfür besteht darin, die Gleichungen 6.2 bis 6.6 zur Bestimmung des Editierabstandes wie folgt zu ändern [Sel80]:

$$D_{i,0} = i \quad (6.14)$$

$$D_{0,j} = 0 \quad (6.15)$$

$$D_{i,j} = \min \left\{ \begin{array}{l} D_{i-1,j-1} + d(i,j), \\ D_{i-1,j} + 1, \\ D_{i,j-1} + 1 \end{array} \right\} \quad (6.16)$$

$$\text{mit } d(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{falls } r_i \neq s_j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.17)$$

Wie im Falle des klassischen Editierabstandes ist D hierbei eine Distanzmatrix der Größe $(m+1) \times (n+1)$, wobei $m = |r|$ die Länge der Merkmalssequenz r der Sucheingabe und $n = |s|$ die Länge der Merkmalssequenz s eines Dokumentes ist. Die Elemente der Matrix D an der Stelle (i, j) enthalten den Editierabstand zwischen der Teilsequenz $r_{1\dots i}$ und einer Teilsequenz $s_{(j-k+1)\dots j}$ der Länge k (mit $k \in \mathbb{N}$), wobei der Wert k ohne weitere Berechnungen nicht bekannt ist. Daraus folgt, dass in der m -ten Zeile der Distanzmatrix in den Spalten j (mit $0 < j \leq n$) der Editierabstand zwischen der Merkmalssequenz der Sucheingabe und einem Teil der Dokumentsequenz, der an der Stelle j endet, zu finden ist. Diese m -te Zeile $D_{m,0\dots n}$ soll im Folgenden kurz als D_m bezeichnet werden. Die Elemente der Zeile D_m können den Wert m nicht übersteigen, da, wie in Abschnitt 6.1.1 diskutiert wurde, der Editierabstand zweier Zeichenketten höchstens so groß ist, wie die Länge der längeren Zeichenkette. Bei der Suche einer kurzen Zeichenkette r in einer langen Zeichenkette s kann dieser maximale Editierabstand $m = |r|$ an jeder Stelle j dadurch angenommen werden, dass r aus der leeren Zeichenkette λ in m Schritten erzeugt wird.

Wenn, wie in Gleichung 6.15 geschehen, die Werte der 0-ten Spalte ($i = 0$) auf 0 gesetzt werden, bedeutet dies, dass bei der Suche nach der leeren Teilsequenz ($r_{1\dots 0} = \lambda$) an jeder Stelle j der Dokumentsequenz s der Editierabstand gleich 0 ist. Dies ist der Grund für die Verwendbarkeit der Gleichungen 6.14 bis 6.17 als Suchfunktion; jede Stelle der Dokumentsequenz s kann theoretisch der Beginn einer Teilsequenz von s sein, die zu r eine hohe Ähnlichkeit aufweist.

In Abbildung 6.3 ist das Beispiel einer Distanzmatrix D der Größe 8×23 ($D_{0\dots 7,0\dots 22}$) für die Suche nach der Zeichenkette $r = \text{»prinzip«}$ der Länge $m = 7$ in der Zeichenkette $s = \text{»dieerzeugungsprincipe«}$ ³ der Länge $n = 22$ mit $r, s \in \mathbb{A}_{a\dots z}^*$ dargestellt. Die unterste Matrixzeile (D_m) stellt den Editierabstand zwischen r und bestimmten Teilen von s dar. In diesem Beispiel ist insbesondere das Element $D_{7,20} = 1$ (hervorgehoben durch Fettdruck) interessant, da sich hier der beste *Treffer* findet, nämlich der Editierabstand zwischen r und $s_{14\dots 20} = \text{»princip«}$. Das Ende $j^e = 20$ des Treffers wird gefunden, indem nach dem Minimum der Zeile D_m gesucht wird. Um den Beginn $j^b = 14$ des Treffers zu bestimmen, wird der so genannte optimale *Alignment-Pfad* gesucht, indem ausgehend von D_{m,j^e} die Matrix D nach oben und links elementweise nach möglichst kleinen Werten abgesucht wird, bis die Zeile D_0 erreicht ist. Das Ziel hierbei ist es, herauszufinden, welche Entscheidung die min-Funktion in Gleichung 6.16 getroffen hat.

³Eigentlich: »Die [...] Erzeugungsprincipe, mit deren Hülfe [...]« [Can83]

$$D = \begin{pmatrix} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \\ & & d & i & e & e & r & z & e & u & g & u & n & g & s & p & r & i & n & c & i & p & e \\ 0 & 0 \\ 1 & p & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & r & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 3 & i & 3 & 3 & 2 & 3 & 3 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 \\ 4 & n & 4 & 4 & 3 & 4 & 4 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 3 & 4 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 & 3 \\ 5 & z & 5 & 5 & 4 & 5 & 5 & 4 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 4 & 5 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 6 & i & 6 & 6 & 5 & 6 & 6 & 5 & 4 & 4 & 5 & 6 & 6 & 5 & 6 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 7 & p & 7 & 7 & 6 & 7 & 7 & 6 & 5 & 5 & 5 & 6 & 7 & 6 & 7 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 3 & 2 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Abbildung 6.3: Beispiel einer Distanzmatrix für die Suche eines Wortes in einem Text

Abbildung 6.4 (unten) zeigt die Distanzmatrix D für die exemplarische Suche nach einer Merkmalssequenz der Länge 224 innerhalb einer Dokumentsequenz der Länge 6808. Die Elemente $D_{i,j}$ sind hierbei als Farbwerte dargestellt. Die Farbzuzuordnung zu den jeweiligen Werten ist in der Farbskala in Abbildung 6.4 (unten links) zu sehen. Die Farbe korrespondiert hier direkt mit der durch die jeweilige Stelle in der Matrix D ausgedrückte Anzahl der Fehler, das heißt, der nötigen Editieroperationen; kleine Matrixelemente sind durch eine Farbe im grünen Bereich der Farbskala dargestellt, große Matrixelement im roten Bereich. Als Merkmalstyp der Sequenzen wird hier die in Abschnitt 5.2.1 beschriebene quadratische Gitterquantisierung verwendet, das bedeutet, die Alphabetgröße beträgt 8. Gesucht wird nach einem Wort, welches im durchsuchten Dokumenttext dreimal vorkommt. Diese drei Wortvorkommen sind in Abbildung 6.4 als Streifen zu erkennen. Diese Streifenbildung ist dadurch zu erklären, dass ein Wortvorkommen durch einen geringeren Editierabstand erkannt wird, welcher sich in einem eher grünen Farbton äußert.

Im oberen Teil der Abbildung 6.4 ist die Matrixzeile $i = 224$ ($D_{224,0...6808}$) als Funktion des Index j der Dokumentsequenz für dieselbe Suche dargestellt. Wie leicht zu erkennen ist, korrespondieren die *Minima* der Kurve mit den erwähnten Streifen der Matrixdarstellung im unteren Teil derselben Abbildung.

Die Bestimmung der Distanzmatrix D mit den Gleichungen 6.14 bis 6.17 kann mit einer Zeitkomplexität von $O(m \cdot n)$ erfolgen. Wenn D spaltenweise berechnet wird, so ist der Speicherbedarf während der Berechnung $O(m)$, da für die j -te Spalte $D_{0...m,j}$ lediglich die Werte des jeweiligen Vorgängers, also der $(j - 1)$ -ten Spalte $D_{0...m,j-1}$ benötigt werden.

Da die *unterste Matrixzeile* D_m die Editierabstände zwischen der Zeichenkette r und den Teilen der Zeichenkette s enthält, können in Anlehnung an Gleichung 6.9 mithilfe dieser Zeile Ähnlichkeiten in Form eines Vektors $S = (S_1, S_2, \dots, S_n)^T$ bestimmt werden mit

$$S_j = 1 - \frac{D_{m,j}}{m} \quad \text{mit} \quad 1 \leq j \leq n \tag{6.18}$$

Das eigentliche Ziel einer approximativen Stringsuche, wie sie hier beschrieben wurde, ist die Bestimmung jener Werte j mit $1 \leq j \leq n$, die das Ende solcher Teilzeichenketten $s_{j-k+1...j}$

6.2 Approximative Stringsuche mittels dynamischer Programmierung

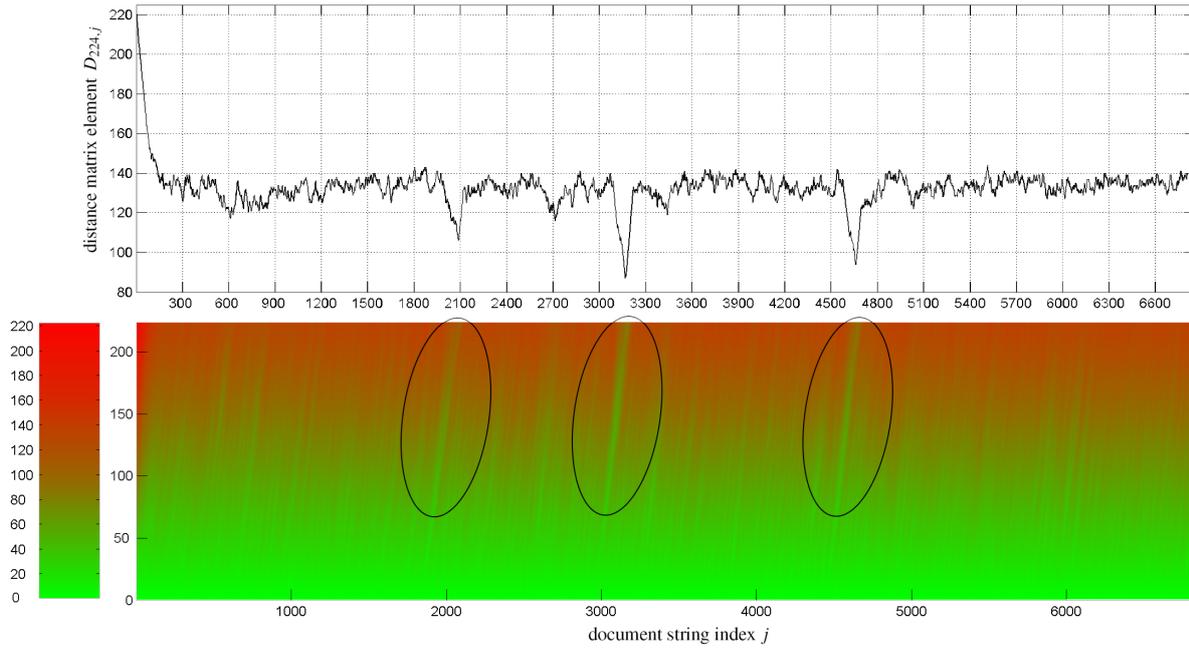


Abbildung 6.4: Beispiel einer Distanzmatrix D der Größe 244×6809 ; oben die Matrixzeile D_m als Graph und unten die gesamte Matrix, dargestellt durch Farbwerte

anzeigen, deren Editierähnlichkeit einen zu wählenden Schwellwert τ nicht unterschreiten:

$$S_j \geq \tau \quad (6.19)$$

Dieser Schwellwert τ beeinflusst die Suchgenauigkeit; je größer τ gewählt wird, desto strikter ist die Suche, das heißt, desto weniger Treffer gibt es.

Von besonderem Interesse sind jedoch nicht sämtliche dieser beschriebenen Werte j , die die Ungleichung 6.19 erfüllen; in der unmittelbaren Umgebung ε einer Position j mit optimaler Ähnlichkeit ($similarity_{edit} = 1$) befindet sich auch stets eine Anzahl weiterer Positionen j' ($j - \varepsilon \leq j' \leq j + \varepsilon$), deren Ähnlichkeit mit wachsender Entfernung von j zwar abnimmt, die dennoch zunächst den Schwellwert τ überschreiten, also die Ungleichung 6.19 erfüllen. Diesem Problem kann begegnet werden, indem für die Ergebnismenge H einer Suchanfrage nur solche Treffer h (engl. *hit*) berücksichtigt werden, die keine *Überlappung* mit anderen berücksichtigten Treffern haben. Ein Treffer h ist ein 4-Tupel der Gestalt:

$$h = (\text{ID}, j^b, j^e, \sigma) \quad \text{mit} \quad \text{ID} \in \mathbb{N}, \quad \sigma \in [0, 1], \quad 0 < j^b \leq j^e \leq n, \quad h \in \mathbb{H} \quad (6.20)$$

Hierbei ist ID der Bezeichner des Dokumentes, welches den Treffer enthält, j^b und j^e sind die Indices, die Beginn und Ende des Treffers in der Dokumentzeichenkette s ($n = |s|$) anzeigen und σ ist die Ähnlichkeitsbewertung ($\sigma = S_{j^e}$) des Treffers, das bedeutet, die Ähnlichkeit zwischen der Teilzeichenkette $s_{j^b \dots j^e}$ und der Suchzeichenkette r .

Algorithmus 6 realisiert solch eine Suche nach einer Zeichenkette r in einer Menge $\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_l\}$ von l Dokumentzeichenketten s_1 bis s_l . Die minimal erlaubte Ähnlichkeit der Treffer ist durch den Schwellwertparameter τ angegeben. Wenn eine Zuordnung der Indices j

Algorithmus 6 Implementierung der Suche nach einer Zeichenkette r in einer Menge von l Zeichenketten s_1 bis s_l unter Berücksichtigung des Ähnlichkeitsschwellwertes τ

```

1: function SEARCH( $r, \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_l\}, \tau$ )
2:    $m \leftarrow |r|$ 
3:    $H \leftarrow \emptyset$  ▷ initialisiere Ergebnistreffermenge  $H \in \mathbb{H}^*$  als leere Menge
4:    $H' \leftarrow \emptyset$  ▷ initialisiere temporäre Treffermenge  $H' \in \mathbb{H}^*$  als leere Menge
5:   for  $i \leftarrow 1, \dots, l$  do
6:      $n \leftarrow |s_i|$ 
7:     berechne Distanzmatrix  $D$  für Zeichenketten  $r$  und  $s_i$ 
8:     for  $j \leftarrow 1 \dots n$  do ▷ füge alle Stellen  $j$  als potentielle Treffer in  $H'$  ein
9:        $ID = i, \sigma = 1 - D_{m,j}/m$ 
10:       $j^b = j - m + 1, j^e = j$ 
11:      if  $j^b < 0$  then  $j^b = 0$ 
12:      end if
13:       $h' \leftarrow (ID, j^b, j^e, \sigma)$  ▷ erzeuge potentiellen Treffer  $h' \in \mathbb{H}$ 
14:       $H' \leftarrow H' \cup \{h'\}$  ▷ füge  $h'$  der Menge potentieller Treffer  $H'$  hinzu
15:    end for
16:    for all  $h' \in \text{sort}(H')$  do ▷ iteriere über die Elemente von  $H'$ , absteigend
sortiert nach den Ähnlichkeitswerten  $\sigma$  der Elemente
17:      if  $\text{sim} \geq \tau \wedge \neg \exists h \in H : \text{OVERLAPS}(h, h')$  then
18:         $H \leftarrow H \cup \{h'\}$  ▷ füge  $h'$  der Ergebnistreffermenge  $H$  hinzu, falls
noch kein überlappender Treffer in  $H$  existiert
19:      end if
20:    end for
21:  end for
22:  return  $H$ 
23: end function

24: function OVERLAPS( $h_1, h_2$ )
25:    $(ID_1, j_1^b, j_1^e, \text{sim}_1) = h_1$ 
26:    $(ID_2, j_2^b, j_2^e, \text{sim}_2) = h_2$ 
27:   if  $ID_1 \neq ID_2$  then
28:     return false
29:   else if  $(j_1^b \leq j_2^b \leq j_1^e) \vee (j_1^b \leq j_2^e \leq j_1^e) \vee (j_2^b \leq j_1^b \leq j_2^e) \vee (j_2^b \leq j_1^e \leq j_2^e)$  then
30:     return true
31:   else
32:     return false
33:   end if
34: end function

```

der Dokumentzeichenketten s_1 bis s_l zu den Zeitinformationen t der den Dokumentzeichenketten zugrundeliegenden Sequenzen P_1 bis P_l der Abtastpunkte existiert, so lassen sich aus den durch Algorithmus 6 erzeugten Suchtreffern $h = (ID, j^b, j^e, \sigma)$ der Treffermenge H die relevanten Abtastpunkte aus P_1 bis P_l ermitteln.

6.3 Alternative Suchalgorithmen

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, beträgt die Berechnungskomplexität des vorgestellten Verfahren zur approximativen Suche innerhalb von Zeichenketten $O(m \cdot n)$, wobei n die Länge der zu durchsuchenden Zeichenkette und m die Länge der gesuchten Zeichenkette ist. In der Literatur findet sich eine Reihe von Modifikationen dieses Verfahrens [GP90, UW93, JTU96] beziehungsweise ein komplett neuer Berechnungsansatz zur Lösung desselben Problems [WM92, Gro95], deren Berechnungskomplexität $O(k \cdot n)$ beträgt. Der Parameter k ist hierbei die maximale Anzahl der erlaubten Fehler, das heißt, der Editieroperationen. Für Suchprobleme mit einer im Verhältnis zur Länge der gesuchten Zeichenketten kleinen Anzahl von erlaubten Fehlern, wie etwa im Falle der Suche innerhalb von Textdokumenten, die nur eine geringe Anzahl von Rechtschreibfehlern enthalten, stellen diese $O(k \cdot n)$ -Algorithmen eine enorme Verbesserung der Suchgeschwindigkeit dar.

Das Problem der in dieser Arbeit beschriebenen Suche in handschriftlichen Dokumenten auf der Basis von schriftformbeschreibenden Zeichenketten kann jedoch von diesen Verbesserungen der asymptotischen Berechnungskomplexität nicht profitieren. Der Grund dafür ist der vorliegende lineare Zusammenhang der Werte k und m . Wie in Abschnitt 6.1 über die Verwendung des Editierabstandes als Basis eines Ähnlichkeitsmaßes bereits erwähnt, hat die Länge der Suchzeichenkette einen unmittelbaren Einfluss auf den Editierabstand zwischen der Suchanfrage und den für den Benutzer relevanten Suchtreffer. Bei einer gewissen Toleranz könnte k beispielsweise $0,5 \cdot m$ betragen. Durch diese Abhängigkeit zwischen den Werten m und k beträgt auch für diese verbesserten Suchverfahren die asymptotische Berechnungskomplexität $O(m \cdot n)$. Aus diesem Grund soll in der vorliegenden Arbeit der klassische Algorithmus aus [Sel80] für die approximative Stringsuche verwendet werden.

Verfahren auf Basis von so genannten *Hidden-Markov-Modellen* sind in den Bereichen der Sprach- und Handschrifterkennung, aber auch in der Bioinformatik, populär für die Erkennung von Mustern in sequenzförmigen Daten [MW03, S. 243ff]. Sie werden in der Bioinformatik beispielsweise für Analysen von Gensequenzen und hierbei insbesondere zum Lokalisieren von Teilsequenzen mit bestimmten Eigenschaften (etwa die so genannten *CpG-Inseln*) verwendet. Da jedoch die Verfahren auf Basis der Hidden-Markov-Modelle eine Trainingsphase benötigen (sie ordnen sich in den Teilbereich *Maschinelles Lernen* der Informatik ein), sind sie für das in dieser Arbeit untersuchte Problem der Suche nach vom Benutzer vorgegebenen handschriftlichen Eingaben nicht geeignet, da auf diesen Daten kein Training möglich ist.

6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verschiedene Ähnlichkeitsfunktionen für sequenzförmige Daten diskutiert. Für eine dieser Ähnlichkeitsfunktionen (auf Basis des Editierabstandes) wurde ein Suchverfahren vorgestellt, welches in der Literatur als *Approximative Stringsuche* bezeichnet wird. Auf Grundlage dieses Suchverfahrens wurde ein den Bedürfnissen der Suche in handschriftlichen Daten entsprechender Algorithmus entwickelt.

Das generelle Vorgehen des in dieser Arbeit entwickelten Systems zur Handschriftsuche weist gewisse Ähnlichkeiten auf zur inhaltsbasierten Suche nach beispielsweise Bild-, Video- oder Audiodateien (engl. *content based {image, video, audio} retrieval*). Hier wie dort erfolgt die Suche aus Sicht des Benutzers dadurch, dass dieser dem Computer ein Beispiel (etwa ein Bild oder ein handschriftliches Wort) vorgibt, nach dem gesucht werden soll. Während es jedoch oft das Ziel etwa der Bildsuche ist, beispielsweise die n besten (das heißt, ähnlichsten) Bilder zu finden und aus Sicht des Benutzers eine sinnvolle Rangfolge (engl. *ranking*) bezüglich dieser Ähnlichkeit existiert, gibt es für das Problem der Handschriftsuche aus Benutzersicht keine solche *graduelle Ähnlichkeit*; für den Benutzer ist ein Treffer korrekt, wenn das gesuchte handschriftliche Wort mit dem gefundenen Wort übereinstimmt und inkorrekt, wenn dies nicht gilt. Aus diesem Grund erscheint hier die Berücksichtigung einer Rangfolge nicht sinnvoll und wurde deshalb nicht näher betrachtet.

7 Fusion

*Vereint sind auch die Schwachen mächtig
(Friedrich Schiller)*

In vielen Teilgebieten der Informationsverarbeitung, wie zum Beispiel in der Mustererkennung, gibt es die Bestrebung, die Resultate von Gesamtsystemen dadurch zu verbessern, dass verschiedene Einzelsysteme, so genannte »Experten«, verwendet und deren Einzelresultate kombiniert werden. So schrieb etwa *Tin Kam Ho* in [Ho02]:

»Anstatt nach der besten Menge an Merkmalen oder nach dem besten Klassifizierer, suchen wir nun nach der besten Menge an Klassifizierern und der besten Methode, diese zu kombinieren.«

Für den Fall der Spracherkennung könnte dies beispielsweise bedeuten, dass mithilfe eines Verfahrens (das heißt, eines *Experten*) die Erkennung durchgeführt wird, und im Falle von Ungewissheit bezüglich der Korrektheit des Ergebnisses ein zweites Verfahren (ein zweiter *Experte*) herangezogen wird.

Neben der Kombination von Klassifikationsergebnissen wurden beispielsweise im Bereich der Robotik die Kombination von unterschiedlichen Sensordaten [RNJ06, S. 40] und im Bereich der medizinischen Informatik der Fusion verschiedener bildgebender Verfahren [DK04], etwa Röntgen-, MRI- und Ultraschallbilder, untersucht. Auch im Gebiet der biometrischen Benutzerauthentifikation ist in den letzten Jahren ein verstärktes Interesse an dieser so genannten *Fusion*¹ von Verfahren zu beobachten². Aufgrund eigener Vorarbeiten im Bereich der Biometrie und der biometrischen Fusion [SVVS05, SPC⁺05, VSVS05] sollen in diesem Kapitel neue Möglichkeiten diskutiert werden, wie Fusionsstrategien nach dem Vorbild der biometrischen Fusion für das vorliegende Problem der Suche in handschriftlichen Dokumenten verwendet werden können. Hierzu soll im folgenden Abschnitt 7.1 ein kurzer Überblick über relevante Aspekte der Biometrie sowie der biometrischen Fusion gegeben werden. Abschnitt 7.2 widmet sich der Adaption für den Bereich der Suche.

7.1 Überblick über Biometrie und biometrische Fusion

Die Biometrie im Sinne der hier betrachteten biometrischen Benutzerauthentifikation verfolgt das Ziel, die Identität einer Person zu prüfen beziehungsweise zu ermitteln, indem individuelle

¹»Mit Informationsfusion wird der Prozess bezeichnet, Daten aus unterschiedlichen [...] Informationsquellen mit dem Ziel zu verknüpfen, neues oder präziseres Wissen über [...] Ereignisse und Situationen zu gewinnen.« [RP07]

²»Fusion is a popular practice to combine multiple classifiers or multiple modalities in biometrics.« [TRV⁺07]

Eigenheiten der Person untersucht werden³.

Klassische Verfahren beruhen auf der individuellen Ausprägung der Fingerlinien [RB03], der Gesichtsgeometrie [TP91, ZTP05], der Struktur der Regenbogenhaut (Iris) [Dau02] oder der Netzhaut (Retina) [Hil78]. Diese Verfahren werden der so genannten *passiven Biometrie* zugeordnet, da hierbei feststehende physiologische Eigenschaften (engl. *physiological biometric traits*) des Menschen gewissermaßen als »Momentaufnahme« erfasst und verarbeitet werden. Dem gegenüber stehen die so genannten *aktiven beziehungsweise verhaltensbasierten biometrischen Verfahren* (engl. *behavioral biometric traits*; auch *behaviometrics*), zu denen unter anderem die Erfassung der individuellen Charakteristik der menschlichen Stimme [Rey92] und der Lippen- und Gesichtsbewegung [MD06] beim Sprechen, des Rhythmus der Körperbewegung beim Laufen [YNC04], des Tippverhaltens auf Tastaturen [BGP03] oder des Schreibverhaltens [Vie05], insbesondere der Unterschrift gehören.

Biometrische Systeme zur Benutzerauthentifikation können in Verifikations- und Identifikationssysteme unterschieden werden. Erstere überprüfen, ob eine Person eine behauptete Identität (präsentiert beispielsweise in Form eines Loginnamen) hat, indem die biometrischen Eigenschaften der Person mit jenen Eigenschaften verglichen werden, welche dem System bereits bekannt und dieser Person zugeordnet sind. Das Ziel der biometrischen Identifikation ist, die Identität einer Person anhand ihrer biometrischen Eigenschaften zu bestimmen.

Generell geht dem biometrischen Authentifikationsprozess das so genannte *Enrollment* (Registrierung) voraus. Hierbei werden dem biometrischen System die entsprechenden biometrischen Eigenschaften sowie Informationen über die Identität des Merkmalsinhabers präsentiert. Diese Daten werden zumeist in einer Art von Datenbank hinterlegt⁴. In Abbildung 7.1 sind die Verarbeitungsschritte für den Enrollmentvorgang sowie für die Verifikation und die Identifikation zu sehen.

Ähnlich dem in dieser Arbeit beschriebenen System zur Suche in Handschriftdaten (siehe Kapitel 4), bestehen auch biometrische Systeme aus verschiedenen Modulen, die jeweils Daten als Eingabe erhalten, diese verarbeiten und Daten ausgeben [Vie06]. Das *Sensormodul* erhält, am Beispiel der Fingerabdruckererkennung, Eingaben dadurch, dass der Benutzer den Finger auf den Sensor auflegt; die Ausgaben sind die entsprechenden elektrischen Signale, die das Bild des Fingerlinienmusters repräsentieren. Die rohen Bildinformationen des Sensors werden als Eingaben vom *Vorverarbeitungsmodul* entgegengenommen, welches mittels Filteroperationen unter anderem eine Bildverbesserung durchführt und das Resultat, zumeist ebenfalls in Form eines Bildes, an ein Modul zur *Merkmalsgewinnung* übergibt. Dieses Modul extrahiert aus den vorverarbeiteten Daten solche Merkmale (bei der Fingerabdruckererkennung können dies die so genannten *Minutienpunkte* sein), mithilfe derer die eigentliche biometrische Erkennung realisiert wird, für welche das *Vergleichsmodul* zuständig ist. Das Vergleichsmodul überprüft den Grad der Übereinstimmung zwischen dem aktuellen biometrischen Datensatz und jenen Daten, die während der Enrollmentphase hinterlegt wurden. Die

³Neben der Benutzerauthentifikation gibt es weitere Anwendungsfelder der Biometrie, unter anderem die Erzeugung von kryptographischem Schlüsselmaterial aus biometrischen Daten [Alb94, FW02, DRS04, Vie06, S. 184f]

⁴Teilweise erfolgt die Speicherung der biometrischen Daten nicht in einer (zentralen) Datenbank, sondern auf einem lokalen Datenträger (beispielsweise einer Chipkarte) in der Kontrolle des Merkmalsinhabers, um den Aspekt des Schutzes persönlicher Daten zu berücksichtigen. [SKVK05]

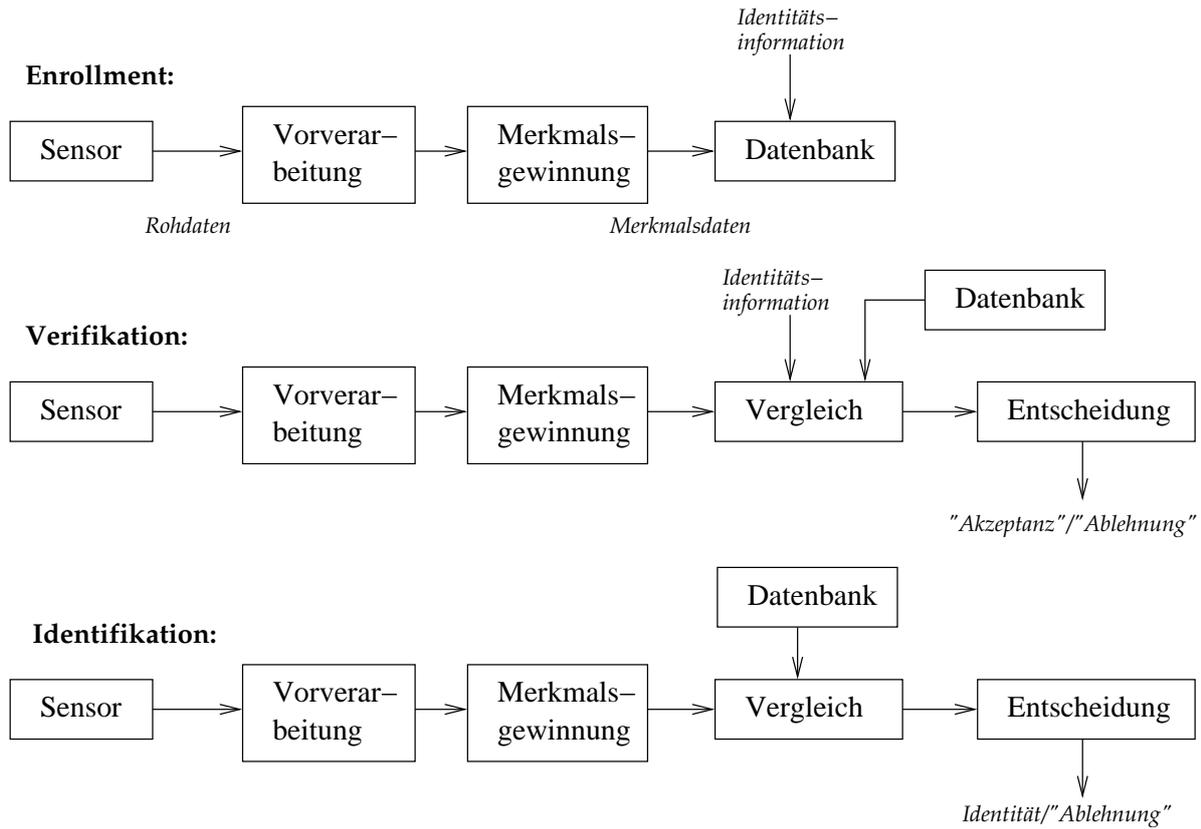


Abbildung 7.1: Verarbeitungsschritte beim biometrischen Enrollment, der Verifikation und der Identifikation

Ausgabe des Vergleichsmoduls ist im Falle der Verifikation ein Wert, der diesen Grad der Übereinstimmung ausdrückt. Im Falle einer Identifikation ist die Ausgabe des Vergleichsmoduls zumeist eine Liste potentieller Identitäten sowie ein Wert für den jeweiligen Grad an Übereinstimmung. Auf Basis dieser Ähnlichkeitsangaben führt das *Entscheidungsmodul* mithilfe von Schwellwerten eine Entscheidung herbei, die für eine Verifikation die Akzeptanz beziehungsweise die Ablehnung der Authentifikation sein kann. Im Falle einer Identifikation ist die Ausgabe des Entscheidungsmoduls die erkannte Identität des Inhabers des biometrischen Merkmals oder die Zurückweisung, falls keine hinreichende Übereinstimmung mit den in der Datenbank hinterlegten Identitäten vorliegt.

In der Praxis sind biometrische Systeme mit einer Reihe von Problemen konfrontiert. Zum einen gibt es biometrische Merkmale, die nicht bei jedem Menschen ausreichend gut oder überhaupt ausgeprägt sind. Hierzu zählen etwa Fingerabdrücke, deren Linienmuster bei einem gewissen Anteil der Bevölkerung zu schwach ausgeprägt sind, um daraus die so genannten Minutien zu bestimmen. In diesem Fall wird also das Enrollment scheitern. Desweiteren kann es passieren, dass zum Zeitpunkt der Authentifikation das biometrische Merkmal nicht messbar ist, etwa wenn ein Verband verletzungsbedingt die Finger verdeckt oder wenn infolge des Umgangs mit chemischen Substanzen oder eines mechanischen Abriebs die Fingerabdrücke augenblicklich nicht erkennbar sind. Für biometrische Merkmale, deren

Ausprägung genetisch determiniert⁵ ist, beispielsweise im Falle der Gesichtsgeometrie, ist eine Unterscheidung von nahen Verwandten mitunter schwierig und bei eineiigen Zwillingen oft unmöglich. Und schließlich gibt es bei jedem biometrischen Verfahren das Problem des Fehlers bei der Erkennung aufgrund der unscharfen Natur biometrischer Sensorausgaben. So ist die Gesichtserkennung unter anderem stark von der Beleuchtungssituation abhängig, die Fingerabdruckerkennung von der genauen Positionierung des Fingers auf dem Sensor, die Unterschriftenerkennung von der Stifthaltung und so weiter. Diese aufgezählten Probleme können mithilfe der Fehlertypen *FTE* (*failure to enroll*), *FTA* (*failure to acquire*), *FAR* (*false acceptance rate*), *FRR* (*false rejection rate*) und *FIR* (*false identification rate*) quantifiziert und bewertet werden (siehe hierzu etwa [Way99, Bro07]).

Mithilfe verschiedener *Fusionsstrategien* wird versucht, diesen Problemen zu begegnen. So ist es möglich, neben dem Fingerabdruck beispielsweise die Gesichtsgeometrie als zusätzliches beziehungsweise alternatives biometrisches Merkmal zu verwenden, um somit bei Erfassungsproblemen des einen Merkmals auf das zweite Merkmal zurückgreifen zu können. Auch lässt sich die Zuverlässigkeit biometrischer Systeme dadurch erhöhen, dass mehrere Merkmale ausgewertet werden. *J. Czyz, J. Kittler* und *L. Vanderdorpe* unterscheiden hierbei zwischen *Multimodal Expert Fusion* und *Intramodal Expert Fusion* [CKV04]. Eine weitaus präzisere Systematisierung biometrischer Fusion mit Blick auf die Art von Daten, die fusioniert werden, geben *A. Ross, K. Nandakumar* und *A. Jain* in [RNJ06]. Sie unterscheiden dabei:

- **multimodale Systeme:** Kombination verschiedener biometrischer Modalitäten (etwa Gesichts-, Fingerabdruck- und Handgeometrie [RJ03], Stimm- und Handschriftbiometrie [VSVS05] oder Stimm-, Gesichts- und Handschriftbiometrie [SPC⁺05]),
- **multisensorische Systeme:** Erfassung eines einzelnen biometrischen Merkmals mithilfe verschiedener Sensoren (beispielsweise Kombination von Normallicht- und Infrarotkameras für Gesichtserkennung [CFB05] oder gleichzeitige Verwendung zweier unterschiedlicher Geräte für die Erfassung der Stiftbewegung beim Schreiben [SVO07]),
- **multialgorithmische Systeme:** Verwendung unterschiedlicher Erkennungsverfahren für Daten derselben biometrischen Modalität (beispielsweise die Fusion zweier Gesichtserkennungsalgorithmen [CKV02, CSKV04, CKV04] oder die Fusion verschiedener Abstandsmaße [SVD05] beziehungsweise verschiedener Erkennungssysteme [SVVS05] für die Signaturerkennung),
- **Multi-Sample-Systeme:** Mehrfache Erfassung und Verarbeitung der selben biometrischen Eigenschaft (mehrfache Abgabe der Unterschrift oder Verwendung einer größeren Anzahl an Gesichtsbildern [KMJS97, SPC⁺05]),
- **Multi-Instanz-Systeme:** Erfassung und Verarbeitung mehrerer Instanzen derselben biometrischen Modalität (beispielsweise Berücksichtigung der Fingerandrucke mehrerer Finger [JPR99] oder Verwendung der Unterschrift gemeinsam mit weiteren Handschriftsemantiken [SVD07b]),

⁵Biometrische Merkmale können danach unterschieden werden, ob sie *genotypisch* (durch Vererbung), *randomtypisch* (zufällig im Laufe der embryonalen Entwicklung) oder *konditioniert* (durch Training erlernt) entstehen [Bro07, Liu08].

- **hybride Systeme:** Kombination verschiedener der oben aufgeführten Systemtypen (beispielsweise Stimm- und Handschriftbiometrie sowie zwei verschiedene Algorithmen für die Handschriftverifikation [VS05]).

Zusätzlich können der Vollständigkeit halber die so genannten *multifaktoralen Systeme* (engl. *multi factor authentication*) in diese Aufzählung aufgenommen werden, auch wenn bei diesen zumeist nur ein einziges singlebiometrisches System zum Einsatz kommt [BAZ03, VHD05]. Die Fusion besteht bei diesen Systemen in der Kombination der Biometrie mit einer Authentifikation auf Basis der *Preisgabe von Wissen* in Form von beispielsweise *Passworten*, *Passphrasen*, *PINs* (engl. *personal identification number*) oder *TANs* (Transaktionsnummern), der *Präsentation oder Verwendung eines Besitzes*, etwa in Form von Chipkarten oder Schlüsseln und/oder der *Bestimmung des aktuellen Kontextes* des Benutzers, etwa die Position, die Anwesenheit weiterer Personen oder die Tageszeit [SH04].

Neben dieser Unterscheidung hinsichtlich der Art der zu fusionierenden Daten (in [RNJ06, S. 44] als »*biometric sources*« bezeichnet), werden multibiometrische Verfahren danach unterteilt, auf welcher Verarbeitungsebene (siehe Abbildung 7.1) die Fusion stattfindet. Ross *et al.* [RNJ06, S. 55ff] unterscheiden grob danach, ob die Fusion vor oder nach dem biometrischen Merkmalsvergleich (*fusion prior to matching* oder *fusion after matching*) stattfindet. Zur *fusion prior to matching* zählen die Fusion auf *Sensorebene* (engl. *sensor level*) und auf *Merkmalsebene* (engl. *feature level*); zur *fusion after matching* zählen die Fusion auf *Vergleichsebene* (engl. *score level* oder *matching level*) und *Entscheidungsebene* (engl. *decision level*).⁶ In Abbildung 7.2 wird das Ablaufschema der biometrischen Authentifikation aus Abbildung 7.1 um ein *Fusionsmodul* für die vier Fusionsebenen erweitert.

In [RNJ06, S. 59f] wird angenommen, die Effizienz eines biometrischen Systems, basierend auf einer Fusion sei umso höher, je »eher« die Fusion durchgeführt würde, da im Laufe der Verarbeitungsschritte die vorhandene Information abnehme. Zumindest für die Fusion auf Vergleichs- und Entscheidungsebene ist dies plausibel. Während bei einer *Fusion auf Vergleichsebene* quantitative Angaben über den Grad der einzelnen biometrischen Ähnlichkeiten für die Fusion verwendet werden, basiert die *Fusion auf Entscheidungsebene* (im Falle einer Verifikation) auf einer Verknüpfung binärer Ausdrücke (»*Akzeptanz*« / »*Ablehnung*«) der biometrischen Einzelentscheidungen.

In der Praxis ist eine Fusion auf einer anderen als der *Entscheidungsebene* unter Umständen schwierig, wenn verschiedene geschlossene Einzelbiometriesysteme verwendet werden⁷, auf deren innere Verarbeitung von außen kein Zugriff möglich ist und die als Ausgabe lediglich die biometrische Entscheidung liefern, nicht jedoch beispielsweise ein Ähnlichkeitsmaß.

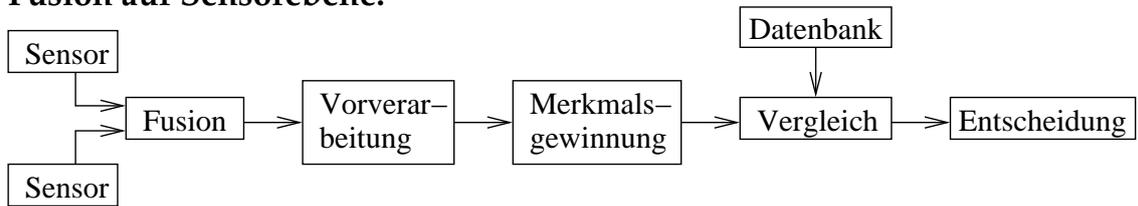
Im Folgenden soll anhand von Beispielen das Wesen der verschiedenen Fusionsebenen illustriert werden:

- **Sensorebene:** Eine Fusion auf dieser Ebene der biometrischen Datenverarbeitung setzt

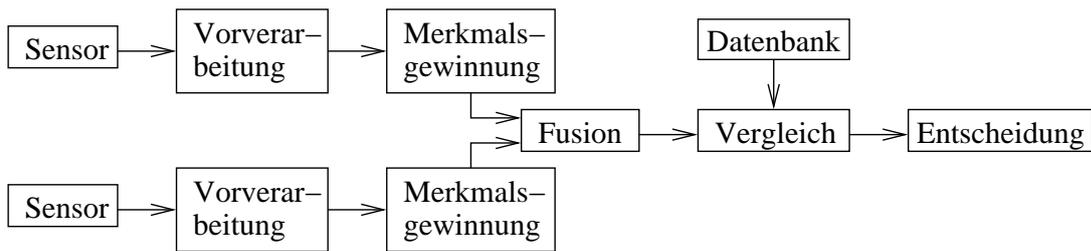
⁶Für den speziellen Fall der Authentifikation im Identifikationsmodus führen Ross *et al.* in [RNJ06, S. 56, 70ff] zusätzlich die *Rank-Level-Fusion* an, auf die hier jedoch nicht eingegangen werden soll.

⁷»In a multibiometric system, fusion is carried out at the abstract or decision level when only the decision output of the individual biometric matchers are available. Many commercial off-the-shelf (COTS) biometric matchers provide access only to the final recognition decision. When such COTS matchers are used to build a multibiometric system, only decision level fusion is feasible.« [RNJ06, S. 73f]

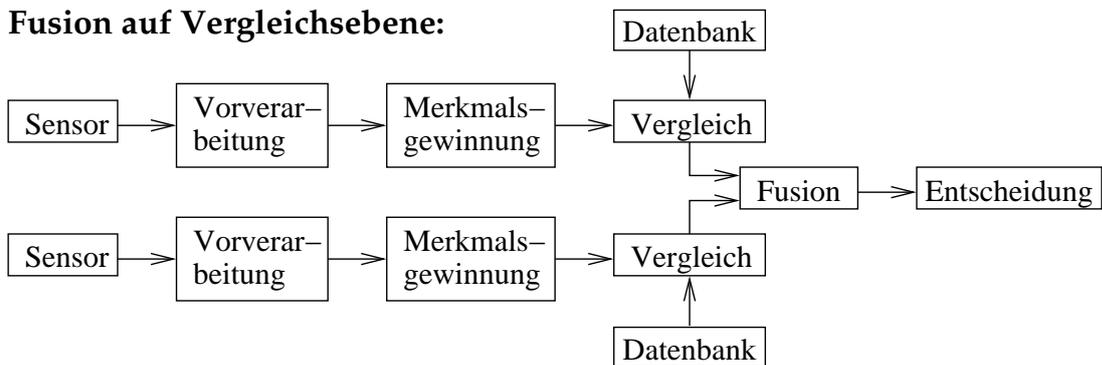
Fusion auf Sensorebene:



Fusion auf Merkmalsebene:



Fusion auf Vergleichsebene:



Fusion auf Entscheidungsebene:

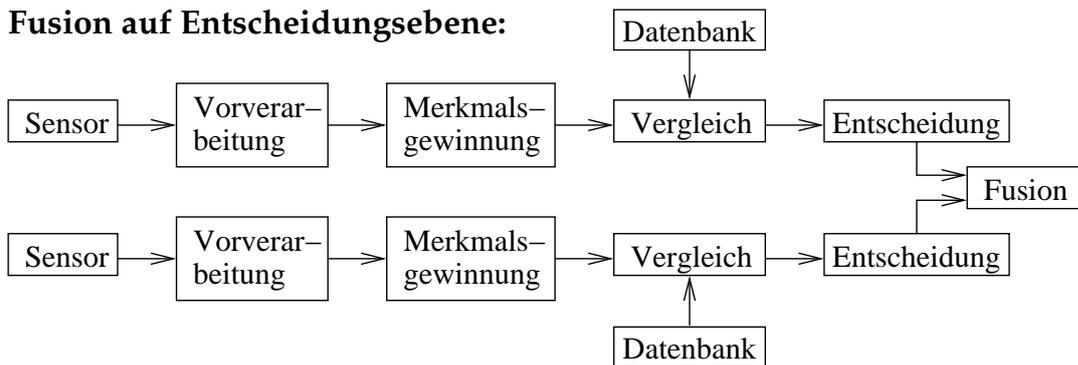


Abbildung 7.2: Die vier diskutierten Ebenen der biometrischen Fusion

voraus, dass die zu fusionierenden Sensordaten in irgendeiner Weise sinnvoll fusionierbar, das heißt kompatibel sind. Es ist schwerlich möglich, die Helligkeitsinformationen der Pixelwerte eines Gesichtsbildes mit den Amplitudenwerten einer zeitdiskret abgetasteten Schallwelle der menschlichen Stimme zu verknüpfen. Hingegen ist es praktisch möglich, etwa aus mehreren kleinen Einzelaufnahmen von Fingerlinienbildern aus leicht verschiedenen Perspektiven ein größeres Gesamtbild eines Fingerabdrucks zu generieren (engl. *fingerprint mosaicking*), um hierdurch mehr Informationen für die Fingerabdruckerkennung zu gewinnen [JR02, SRSC05, MMJP03, S. 77].

Ein weiteres Beispiel ist die Bestimmung von räumlichen Informationen der Gesichtsoberfläche auf Grundlage von Bildinformationen mehrerer Kameras [Hsu02]. Dieses Prinzip ist vergleichbar mit dem menschlichen Vermögen, mithilfe der beiden Augen dreidimensional sehen zu können.

- **Merkmalsebene:** Wie zuvor bei der Ebene der Sensordaten ist es auch für die Fusion auf Merkmalsebene nötig, dass die zu fusionierenden Daten überhaupt fusionierbar (kompatibel), das heißt, gemeinsam im folgenden Verarbeitungsschritt (*Vergleich*, siehe Abbildungen 7.1 und 7.2) vergleichbar sind.

Für *Multi-Sample-Systeme* mit Merkmalsdaten (Merkmalsvektoren) einer festen Größe könnte eine Fusion auf Merkmalsebene dadurch realisiert werden, dass beispielsweise ein Durchschnittsvektor der einzelnen Merkmalsvektoren bestimmt wird, welcher in den folgenden biometrischen Verarbeitungsschritten genauso verwendet wird, wie dies in einem singlebiometrischen System der Fall wäre [RNJ06, S. 65f].

Für eine biometrische Fusion singlebiometrischer Teilsysteme, deren Merkmalsdaten sich als Vektoren ausdrücken lassen, welche jedoch untereinander nicht dieselbe Länge haben müssen, ließe sich eine Fusion auf Merkmalsebene dadurch erreichen, dass die einzelnen Merkmalsvektoren miteinander *konkateniert* werden, wodurch die Länge des entstehenden Vektors gleich der Summe der einzelnen Vektorlängen wäre. Hierbei können die einzelnen zu fusionierenden Systeme beziehungsweise ihre Merkmalsdaten gänzlich verschieden voneinander sein, etwa *Mel-Frequenz-Cepstral-Koeffizienten* der menschlichen Stimme, kombiniert mit geometrischen Merkmalen der Lippenbewegung [RNJ06, S. 69f]. Eine solche Fusion setzt jedoch voraus, dass das Vergleichsmodul gegenüber den singlebiometrischen Systemen angepasst wird, um die nunmehr längeren Merkmalsvektoren miteinander vergleichen und für diese einen Ähnlichkeitswert bestimmen zu können.

- **Vergleichsebene:** Die in der wissenschaftlichen Literatur am häufigsten anzutreffende Art von biometrischer Fusion ist jene, die auf der Vergleichsebene, also auf Basis von Ähnlichkeitswerten (engl. *matching scores*) stattfindet. Der Grund dafür mag sein, dass hierfür jede Kombination beliebiger singlebiometrischer Systeme möglich ist, die einen Zugriff auf die zur biometrischen Entscheidung nötigen Ähnlichkeitswerte gestatten. Praktisch ist es zumeist nötig, die unterschiedlichen Ähnlichkeitswerte der Einzelsysteme zu normalisieren und eventuell individuell zu gewichten. Beispiele für die biometrische Fusion auf der Vergleichsebene finden sich im Bereich der

multimodalen [SPC⁺05, UHW⁺06], *multisensorischen* [SVO07], *multialgorithmischen* [SVD05, SVVS05], *Multi-Sample-* [CKV04], *Multi-Instanz-* [SVD07b] und *hybriden Systeme* [VS05].

- **Entscheidungsebene:** Wie im Falle der Fusion auf der Vergleichsebene können für biometrische Systeme auf Basis einer Fusion auf Entscheidungsebene diverse single-biometrische Systeme kombiniert werden, jedoch ohne die Einschränkung auf solche Systeme, die einen Zugriff auf die Ähnlichkeitswerte gestatten. Die biometrischen Entscheidungen der verschiedenen Einzelsysteme werden zumeist mittels boolescher Algebra oder einer Art von Mehrheitsentscheidung miteinander fusioniert. Beispiele sind etwa die *multialgorithmische Fusion* für die Fingerabdruck- [PJ02, HG07], Gesicht- [CSKV04] oder Sprechererkennung [SSY03], die *multi-sensorische Fusion* von zweidimensionalen Textur- und dreidimensionalen Formdaten für die Gesichtserkennung [TRV⁺07] oder die *multimodale Fusion* von audio-visuellen Daten zur Erkennung anhand von Sprache und Gesichtsbildern [WCM05].

In der Literatur ist durch Verwendung der verschiedenen Fusionsstrategien in den meisten Fällen eine tatsächliche Verbesserung der biometrischen Leistungsfähigkeit gegenüber den einzelnen Teilsystemen dokumentiert. Beispielsweise *Scheidat et al.* beschreiben in [SVO07] eine relative Verbesserung der Erkennungsgenauigkeit ihres multisensorischen Systems zur biometrischen Handschriftenerkennung um etwa 36,2 %. In [SPC⁺05] dokumentieren *Stylianou et al.* einen EER-Wert von 0,0009 für die multimodale Fusion von Gesichts-, Sprach- und Unterschriftsdaten im Gegensatz zum EER-Wert von 0,0401 der besten einzelnen Modalität (Sprache). Jedoch sind den Verbesserungen der Leistungsfähigkeit in der Praxis Grenzen gesetzt. *Kittler et al.* beschreiben dies in [KMJS97, S. 847] etwa für die Multi-Sample-Fusion in der Gesichtsbio-metrie wie folgt:

»We show that the performance gains achieved by means of fusion are initially monotonic but soon reach saturation (after three or four frames in our experiments).«

Für das Problem der Suche in handschriftlichen Daten wird sich zeigen müssen, inwieweit diese Aussagen über die Möglichkeiten und Grenzen von Fusionstechniken gültig sind.

7.2 Fusionsstrategien der Handschriftsuche

Neben einer Reihe von Gemeinsamkeiten zwischen biometrischen Authentifikationssystemen auf der einen und Handschriftsuchsystemen auf der anderen Seite, etwa im abstrakten Systemaufbau und in der Art der Datenverarbeitung, existieren entscheidende Unterschiede, welche eine Adaptierbarkeit der im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Fusionsstrategien nicht trivial machen. Im Falle der Biometrie ist einer der wichtigsten Verarbeitungsschritte der Vergleich des Merkmalsdatensatzes eines biometrischen Musters einer Person mit anderen Merkmalsdatensätzen derselben Person (Verifikation) oder mit den Merkmalsdatensätzen verschiedener Personen (Identifikation). Es kommt also zumeist zu einer mehrfachen Ausführung eines Vergleiches von mehr oder minder ähnlichen Objekten. Hingegen berücksichtigt

das in dieser Arbeit entwickelte System Sequenzdaten sehr unterschiedlicher Längen; kürzere Sequenzen als Suchmuster und längere Sequenzen als Dokumentdaten. Daher findet kein unmittelbarer Vergleich ähnlicher Objekte statt.

Auf der Ebene der Resultate unterscheidet sich die biometrische Authentifikation vom Problem der Handschriftsuche darin, dass im ersten Fall einem unbekanntem Objekt (biometrisches Muster) eine Klasse⁸ zugewiesen wird, beziehungsweise zurückgegeben wird, mit welchen Wahrscheinlichkeiten das unbekannte Objekt zu den möglichen Klassen gehört. Im Gegensatz dazu besteht das Ergebnis einer Suchanfrage an das hier entwickelte System aus einer zuvor unbekanntem Anzahl von Treffern sowie dem jeweiligen Grad an Übereinstimmung mit dem Suchmuster.

In den folgenden Abschnitten 7.2.1 und 7.2.2 werden neue Ansätze für die Übertragung von Techniken biometrischer *Multi-Sample*- und *multialgorithmischer Systeme* auf das Problem der Suche in handschriftlichen Dokumenten diskutiert. Hierbei werden speziell die Fusion auf der Merkmals-, der Vergleichs- und der Entscheidungsebene berücksichtigt.

7.2.1 Multi-Sample-Fusion

In Abschnitt 7.1 über biometrische Fusion wurde kurz angedeutet, dass die Fusion in Multi-Sample-Systemen darauf basiert, dass ein einzelnes biometrisches Merkmal, etwa der Fingerabdruck oder die Unterschrift, mehrfach hintereinander präsentiert und erfasst wird. Abhängig von der Fusionsebene werden die Daten der einzelnen Erfassungen miteinander kombiniert oder die biometrische Erkennung mehrfach durchgeführt und die Resultate miteinander verknüpft.

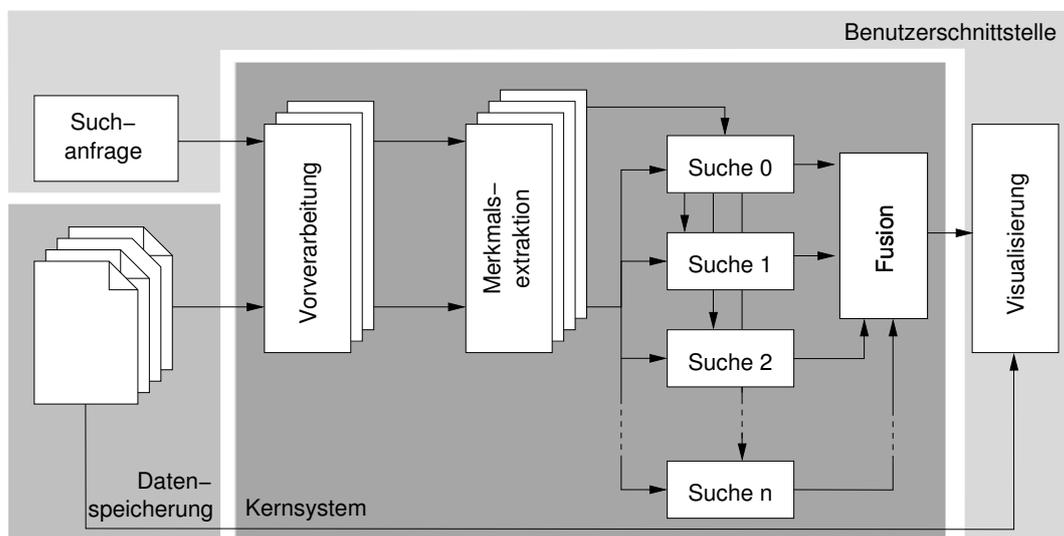


Abbildung 7.3: Schematischer Ablauf der Handschriftsuche mit Multi-Sample-Fusion

⁸Im Falle der Verifikation existieren zwei mögliche Klassen: »akzeptiert« und »nicht akzeptiert«; im Falle der Identifikation existieren $n + 1$ mögliche Klassen für n verschiedene Identitäten und zusätzlich die Klasse »nicht akzeptiert«.

Für die handschriftliche Suche würde ein analoges Vorgehen bedeuten, dass die Suchanfrage in Form mehrfacher Realisierungen des zu suchenden Begriffes erfolgen müsste. Damit wäre für den Benutzer ein gewisser Mehraufwand verbunden, welcher hier durch ein alternatives Vorgehen umgangen werden soll. Statt der mehrfachen Eingabe eines Suchbegriffes werden einzelne Treffer einer klassischen Suchanfrage in weiteren Durchläufen (Iterationen) als Suchbegriffe verwendet. Schematisch ist dieser Vorgang in Abbildung 7.3 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine Erweiterung des Schemas der einfachen Suche ohne Fusion aus Abbildung 4.1 (Kapitel 4, S. 47). Ein entscheidender Parameter bei dieser Art von Fusion betrifft die Auswahl der für die Suchiterationen als Suchbegriffe verwendeten Treffer der ersten Suchanfrage. Zweckmäßig ist hierfür die Verwendung der n besten Treffer unter Berücksichtigung eines Schwellwertes für die maximal erlaubte Abweichung von der Suchanfrage.

Die Fusion kann bei diesem Vorgehen auf der *Vergleichs-* oder der *Entscheidungsebene* erfolgen. Für eine Fusion der Treffermengen H_0, H_1, \dots, H_n der Einzelanfragen auf **Entscheidungsebene** können die Operationen der *Mengenlehre* verwendet werden. Insbesondere die *Schnittmenge* (engl. *intersection*) und die *Vereinigungsmenge* (engl. *union*) der einzelnen Treffermengen sind dabei denkbar:

$$H_{\cap} = \bigcap_{i=0}^n H_i = H_0 \cap H_1 \cap \dots \cap H_n \quad \text{und} \quad H_{\cup} = \bigcup_{i=0}^n H_i = H_0 \cup H_1 \cup \dots \cup H_n \quad (7.1)$$

$$\text{mit } H_{\cap}, H_{\cup}, H_0, H_1, \dots, H_n \in \mathbb{H}^*, \quad 0 \leq i \leq n \quad (7.2)$$

Hierbei ist H_0 die Treffermenge der originalen Suchanfrage; H_1 bis H_n sind die Treffermengen der n Suchiterationen; H_{\cap} und H_{\cup} sind die durch Mengenschnitt beziehungsweise -vereinigung fusionierten Ergebnistreffermengen.

Für eine Fusion der Ergebnisse der einzelnen Suchanfragen auf der Ebene der Ähnlichkeitswerte, das heißt der **Vergleichsebene**, ist es zweckmäßig, statt lediglich der Ähnlichkeitswerte der einzelnen Treffer vielmehr die Distanzmatrizen der einzelnen Suchvorgänge heranzuziehen. Wie in Abschnitt 6.2 zur approximativen Stringsuche erörtert, enthält die Distanzmatrix D eines Suchvorgangs die Editierabstände zwischen bestimmten Teilen der Such- und der Dokumentzeichenketten. Insbesondere die *unterste Zeile* D_m enthält die für die Suche relevanten Editierabstände zwischen der Suchzeichenkette und jeder Position der Dokumentzeichenkette (vergleiche Abbildung 6.4). Bei Berücksichtigung des Einflusses der Länge der Suchzeichenkette auf die Editierabstände lässt sich, wie in Gleichung 6.18 definiert, aus der Matrixzeile D_m der Vektor S der entsprechenden Ähnlichkeitswerte erzeugen.

Die Fusion der Ergebnisse der verschiedenen Suchanfragen lässt sich somit durch eine Verknüpfung der jeweiligen Ähnlichkeitsvektoren realisieren. Bei Verwendung derselben Merkmalszeichenketten der Dokumentdaten (das heißt, bei Nutzung desselben *Feature Extractor* mit gleichbleibender Parametrisierung, beziehungsweise bei »Wiederverwendung« der einmal gewonnenen Merkmalsdaten) für alle Suchiterationen ergibt sich eine konstante Länge der $n + 1$ Ähnlichkeitsvektoren S^0, S^1 bis S^n . Die Verknüpfung dieser Ähnlichkeitsvektoren kann beispielsweise durch elementweises Bilden des arithmetischen Mittelwertes geschehen:

$$\bar{S} = \frac{1}{n+1} \cdot \sum_{i=0}^n S^i \quad (7.3)$$

Eine andere Möglichkeit wäre die Verwendung einer gewichteten Summe:

$$\hat{S} = \sum_{i=0}^n (w_i \cdot S^i) \quad \text{mit} \quad \sum_{i=0}^n w_i = 1 \quad (7.4)$$

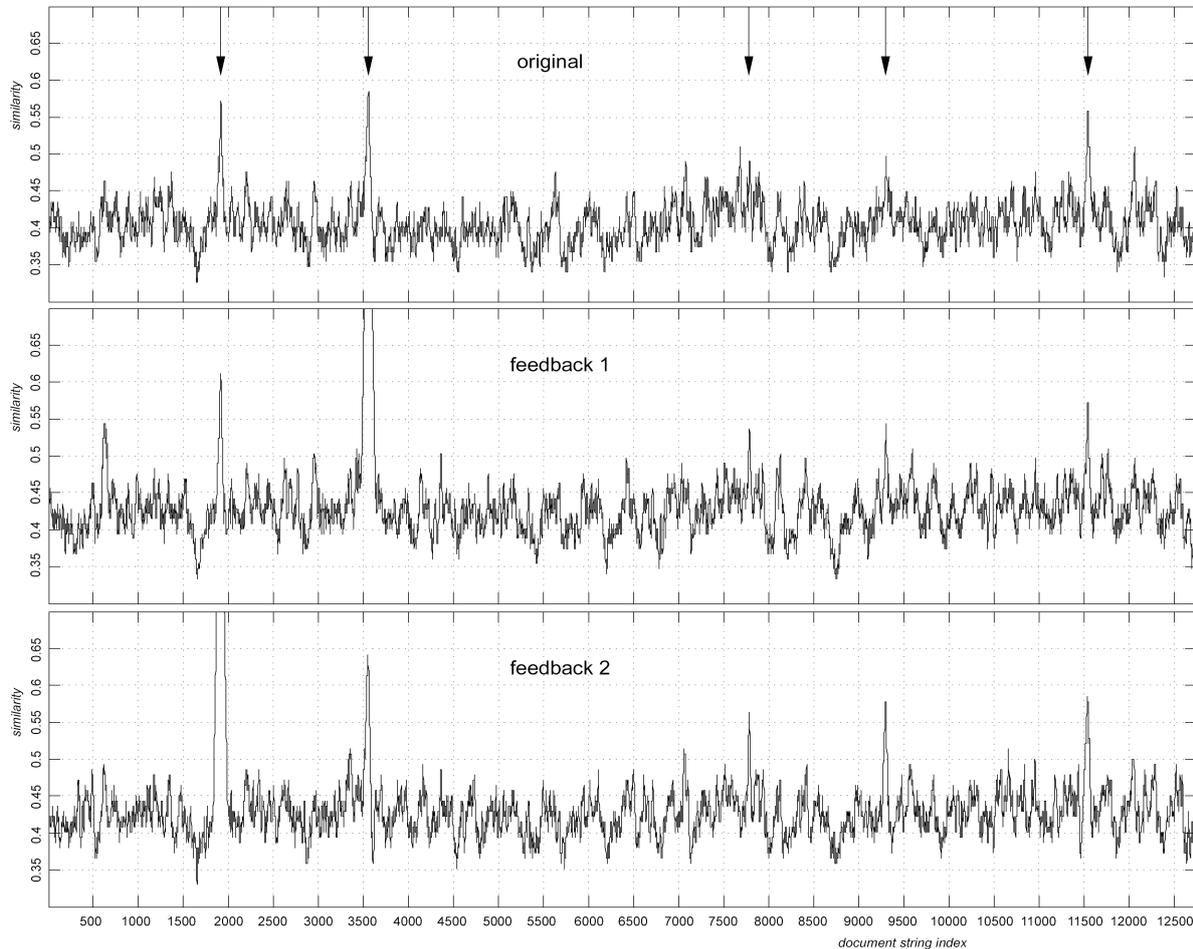


Abbildung 7.4: Grafische Darstellung der Ähnlichkeitsvektoren bei der Suche mittels Multi-Sample-Fusion. (oben – originale Suche; Mitte – Suche nach dem besten Treffer der originalen Suche; unten – Suche nach dem zweitbesten Treffer der originalen Suche)

Bei Wahl eines gemeinsamen Wertes aller Gewichtungen $w_0 = w_1 = \dots = w_n = 1/(n+1)$ ergäbe sich $\hat{S} = \bar{S}$. Neben diesen Fusionen der Ähnlichkeitsvektoren durch arithmetische Mittelwertbildung oder gewichteter Summierung der separaten Ähnlichkeitswerte sind weitere Kombinationen denkbar, wie etwa die elementweise Maximierung oder Minimierung und die Verwendung des geometrischen Mittelwertes. Die meisten dieser Kombinationsverfahren lassen sich durch spezielle Parametrisierung des k -Potenzmittelwertes⁹ (engl. k -th power mean)

⁹»Die ältesten Mittelwerte sind [...] das arithmetische Mittel A , das geometrische Mittel G und das harmoni-

zusammenfassen:

$$\bar{S}(k) = \sqrt[k]{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^n S^i} \quad \text{mit } k \in \mathbb{R} \quad (7.5)$$

Bei Wahl von $k = 1$ ergäbe sich erneut das arithmetische, bei $k = 2$ das quadratische, bei $k = -1$ das harmonische und bei $k \rightarrow 0$ das geometrische Mittel. Die Funktionen *min* und *max* entsprechen den Fällen $k \rightarrow \infty$ beziehungsweise $k \rightarrow -\infty$.

Die Diagramme in Abbildung 7.4 zeigen die Werte der Ähnlichkeitsvektoren dreier Suchanfragen. Das oberste Diagramm stellt dabei den Vektor der originalen Suche dar. Zusätzlich zu den Ähnlichkeitswerten sind jene fünf Indexstellen durch Pfeile markiert, an denen im optimalen Fall Treffer erwartet werden. (Diese manuelle Auszeichnung erfolgte nach Kontrolle des Handschriftdokumentes.) Das mittlere und das untere Diagramm zeigt jeweils den Ähnlichkeitsvektor für die Suche nach dem besten beziehungsweise zweitbesten Treffer aus der oberen Suche.

In Abbildung 7.5 sind beispielhaft die Verknüpfungen der zuvor beschriebenen Ähnlichkeitsvektoren mittels der Maximum-, Minimum- und Durchschnittsfunktion zu sehen. Erkennbar ist, dass durch die Maximumfunktion eine Anhebung der Ähnlichkeitswerte an den relevanten Indexstellen durchgeführt wird.

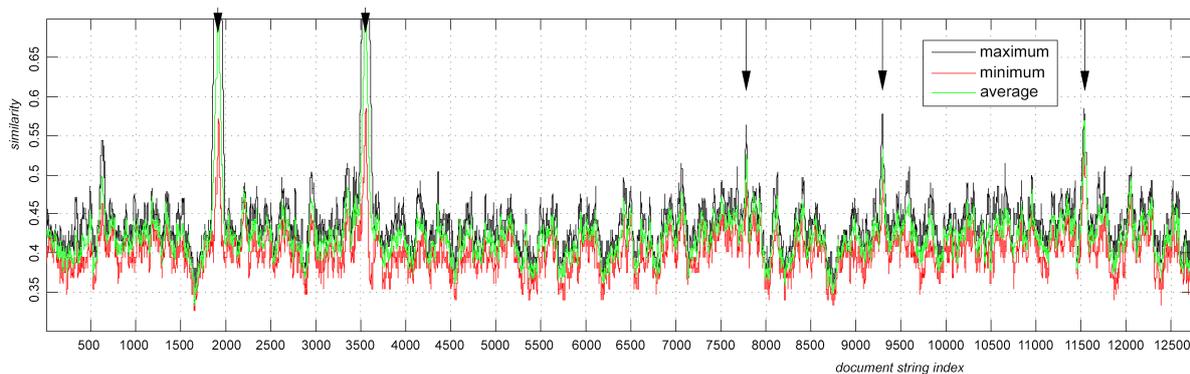


Abbildung 7.5: Fusion der Ähnlichkeitsvektoren aus Abbildung 7.4 mittels Maximum-, Minimum- und Durchschnittsfunktion

7.2.2 Multialgorithmische Fusion

Die multialgorithmische Fusion in dem Sinne, wie sie im Abschnitt 7.1 über biometrische Fusionsverfahren beschrieben wurde, beruht darauf, dass für ein und dieselben biometrischen Ausgangsdaten mehrere Algorithmen zum Einsatz kommen. Die Fusion kann hierbei auf verschiedenen Ebenen der Verarbeitung geschehen. Für das vorliegende Problem der Suche in Handschriftdaten werden in diesem Abschnitt die Fusion auf Merkmals-, Vergleichs- und auf Entscheidungsebene diskutiert.

sche Mittel H. [...] Die erste wichtige Verallgemeinerung dieser drei Mittelwerte ist der Potenzmittelwert.
[Jäg05]

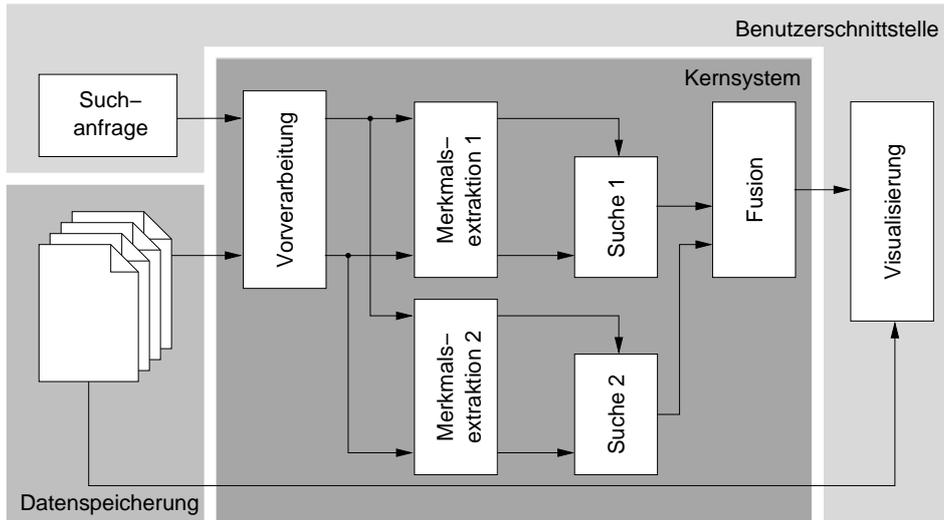


Abbildung 7.6: Schematischer Ablauf der Handschriftsuche mit multialgorithmischer Fusion

Unter dem Begriff des »Suchalgorithmus« soll hier die Gesamtheit all jener Programmteile und -module verstanden werden, die als Eingabe die ursprünglichen Abtastdaten der sich beim Schreibvorgang verändernden Positionsdaten der Stiftspitze erhalten und deren Ausgabe eine Menge der für die jeweilige Suchanfrage relevanten Textpositionen in Verbindung mit den entsprechenden Bewertungen der Ähnlichkeit zwischen Suchanfrage und -treffer ist. Der *Suchalgorithmus*, im Sinne der multialgorithmischen Fusion umfasst also die Datenvorverarbeitung und die Merkmalsgewinnung (siehe Kapitel 5) sowie die eigentliche Suche und die Auswahl der Treffer (siehe Kapitel 6), jeweils inklusive der Parametrisierung. In Abbildung 7.6 ist der schematische Aufbau des Handschriftsuchsystems dargestellt, wie er aus Kapitel 4 bekannt ist, erweitert um die Funktionalität der multialgorithmischen Fusion, beispielhaft für die Entscheidungsebene.

Die Fusion von Handschriftdaten auf der **Merkmalsebene** bedeutet im Kontext der sequenzförmigen Merkmalsdaten eine Fusion auf Sequenzebene oder, konkreter, auf der Ebene der Alphabete zur Kodierung lokaler Eigenschaften der Schriftgestalt (siehe Kapitel 5). Für eine Fusion von Sequenzen verschiedener Merkmalstypen ist es nötig, dass eine elementweise Zuordnung der einzelnen Merkmalssequenzen existiert. Seien $s_1 \in \mathbb{A}_1^*$ ($s_1 = s_{1,1}s_{1,2}s_{1,3} \dots s_{1,n}$), $s_2 \in \mathbb{A}_2^*$ ($s_2 = s_{2,1}s_{2,2}s_{2,3} \dots s_{2,n}$) und $s_3 \in \mathbb{A}_3^*$ ($s_3 = s_{3,1}s_{3,2}s_{3,3} \dots s_{3,n}$) drei Sequenzen über unterschiedliche Alphabete \mathbb{A}_1 , \mathbb{A}_2 und \mathbb{A}_3 . Falls eine elementweise Zuordnung von s_1, s_2 und s_3 der Form $(s_{1,i}, s_{2,i}, s_{3,i})$ für $1 \leq i \leq n$ existiert, so lässt sich eine Fusion der drei Merkmalssequenzen s_1, s_2 und s_3 durch Definition eines aus $\mathbb{A}_1, \mathbb{A}_2$ und \mathbb{A}_3 gebildeten Alphabetes \mathbb{A}_{fusion} realisieren.

$$s_{fusion} = s_1 \circ s_2 \circ s_3 \quad \text{mit} \quad s_1 \in \mathbb{A}_1^*, s_2 \in \mathbb{A}_2^*, s_3 \in \mathbb{A}_3^*, s_{fusion} \in \mathbb{A}_{fusion}^* \quad (7.6)$$

$$s_{fusion,i} = (s_{1,i} \cdot |\mathbb{A}_2| + s_{2,i}) \cdot |\mathbb{A}_3| + s_{3,i} \quad \text{für} \quad 1 \leq i \leq n, n = |s_1| = |s_2| = |s_3| \quad (7.7)$$

Dabei drückt der binäre Operator \circ die Fusion zweier Merkmalssequenzen aus.

Verallgemeinert für eine Fusion von k Alphabeten \mathbb{A}_1 bis \mathbb{A}_k lassen sich die Elemente

7 Fusion

$s_{fusion} \in \mathbb{A}_{fusion}$ wie folgt definieren:

$$s_{fusion} = \left(\left((s_1 \cdot |\mathbb{A}_2| + s_2) \cdot |\mathbb{A}_3| + s_3 \right) \dots \right) \cdot s_k + |\mathbb{A}_k| \quad \text{mit } s_k \in \mathbb{A}_k \quad (7.8)$$

$$= \begin{cases} s_k & \text{für } k = 1, \\ s_{k-1} \cdot |\mathbb{A}_k| + s_k & \text{sonst.} \end{cases} \quad (7.9)$$

Hierbei gilt für die Größe des entstehenden Alphabetes \mathbb{A}_{fusion} :

$$|\mathbb{A}_{fusion}| = \prod_{i=1}^k |\mathbb{A}_i| \quad (7.10)$$

Die oben geforderte eindeutige Zuordnung der Elemente der zu fusionierenden Merkmalssequenzen schränkt die Menge der fusionierbaren Merkmalstypen deutlich ein. Konkret lassen sich ohne weitere Verarbeitungsschritte nur solche Merkmale verwenden, für deren Gewinnung die selben Abtastpunkte verwendet wurden. Dies gilt für die Merkmale φ der *lokalen Schriftneigung* aus Abschnitt 5.3 und die Merkmale ψ der *lokalen Schriftkrümmung* aus Abschnitt 5.4. Der jeweilige Parameter q der Größenquantisierung für φ und ψ kann frei gewählt werden. Für eine Fusion von Schriftrichtungsmerkmalen mit beispielsweise $q_\varphi = 16$ und Schriftkrümmungsmerkmalen mit $q_\psi = 8$ ergäbe sich ein Alphabet \mathbb{A}_{fusion} , dessen Größe $|\mathbb{A}_{fusion}| = 16 \cdot 8$ betragen würde.

Der Parameter w der vorangehenden *äquidistanten Neuabtastung* muss für die Schriftneigung und die -krümmung identisch sein, andernfalls ergäben sich Merkmalssequenzen unterschiedlicher Länge, was zu einem Verlust der eindeutigen Zuordenbarkeit der Elemente führen würde.

Eine multialgorithmische Fusion auf der **Entscheidungsebene** lässt sich in der selben Weise durchführen, wie dies für die Multi-Instanz-Fusion im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurde (siehe Gleichungen 7.1 und 7.2); die Treffermengen der Einzelanfragen werden mittels Mengenalgebra zu einer einzigen Treffermenge vereinigt.

Genauso wie für die Multi-Instanz-Fusion lässt sich eine multialgorithmische Fusion auf der **Vergleichsebene** realisieren. Wie im Fall der Fusion auf Merkmalsebene bieten sich hierfür insbesondere Verfahren der Merkmalsgewinnung an, die eine elementweise Zuordenbarkeit der Merkmalssequenzen untereinander gestatten. Dies liegt im Fall der Fusion auf Vergleichsebene darin begründet, dass bei der Suche je ein Ähnlichkeitswert für jedes Symbol der Merkmalssequenzen der Dokumentdaten bestimmt wird. (Wie in Abschnitt 6.2 erläutert, wird für die Suche der Editierabstand zwischen der Suchsequenz und bestimmten Teilen der Dokumentsequenz bestimmt, wobei jedes Element der Dokumentsequenz genau einmal das Ende einer solchen Teilsequenz ist.) Analog zur, im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen, Fusion auf Vergleichsebene lässt sich diese auch für die multialgorithmische Fusion durch gewichtete Summen oder durch Bestimmung von Mittelwerten der Vergleichswerte der Einzelanfragen umsetzen (siehe Gleichungen 7.4 und 7.5).

7.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel identifiziert relevante Techniken aus dem Bereich der biometrischen Benutzerauthentifikation und dort speziell der biometrischen Fusion, um diese für die Problemstellung der Suche in Handschriftdaten nutzbar zu machen. Ausgehend von der Betrachtung der einzelnen Verarbeitungsschritte (Merkmalsgewinnung, Vergleich, Entscheidung), die für Biometrie- und Suchsysteme gleichermaßen existieren, werden neue Fusionsmöglichkeiten auf der Ebene dieser verschiedenen Verarbeitungsschritte entwickelt. Hierbei wird für jede Verarbeitungsebene detailliert das Vorgehen für die Fusionierung der jeweils relevanten Daten beschrieben.

Parallel dazu wird auch die Unterscheidung aus der biometrischen Fusion nach der Art der zu fusionierenden Daten für das Problem der Suche in Handschriftdaten übernommen und auf dieser Basis die Multi-Sample- und die multialgorithmische Fusion entsprechend adaptiert.

Die unterschiedlichen Grade der durch die Fusionsstrategien erreichbaren Verbesserungen der Suchqualität gegenüber dem fusionslosen System aus dem vorangegangenen Kapitel 6 werden in den Abschnitten 9.2 und 9.3 des Kapitels 9 beschrieben.

8 Evaluation

*Evaluation: Das Unwichtigste läßt sich am genauesten messen.
Aber wie stellt man fest, was wichtig ist?
Es ist das, was übrigbleibt, wenn alles gemessen wurde.*
(Rainer Kohlmayer)

Ziel dieses Kapitels ist es, die Evaluation der Leistungsfähigkeit des in dieser Arbeit entwickelten Handschriftsuchsystems zu beschreiben. Hierzu werden im ersten Abschnitt (8.1) die grundlegenden Größen erklärt, die für eine solche Evaluation von Interesse sind. Insbesondere handelt es sich hierbei um eine Reihe von Qualitätsmaßen. Im sich daran anschließenden Abschnitt 8.2 wird die für die Evaluation benötigte Datenbasis dargestellt und Abschnitt 8.3 schließlich beschreibt das konkrete Vorgehen bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeit des in dieser Arbeit entwickelten Systems. Die Resultate dieser Evaluation finden sich im folgenden Kapitel 9.

8.1 Grundlagen

Im Bereich des Information Retrieval gibt es eine Reihe von Qualitätsmaßen zur Beurteilung unterschiedlicher Systeme in Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit, relevante Dokumente aufzufinden. Häufig verwendete Qualitätsmaße sind die Treffergenauigkeit (engl. *precision*) und die Vollständigkeit der Treffer (engl. *recall*). Ein weiteres relevantes Qualitätsmaß ist der *Fallout*-Wert [Rij79, Fra92, MKSW99, Sch04].

Die Grundlage dieser Qualitätsmaße bildet die Überlegung, dass ein Retrievalsystem auf eine Suchanfrage für die Menge D aller durchsuchten Dokumenten eine Ergebnismenge A ($A \subset D$) aller Treffer liefert. Aus Sicht des Benutzers existiert eine Menge B ($B \subset D$) der für diese Suchanfrage relevanten, das heißt, erwarteten Dokumente. Die Komplemente der Mengen A und B , also die Menge der nicht gefundenen beziehungsweise nicht relevanten Dokumente, werden mit \bar{A} und \bar{B} bezeichnet. Die oben erwähnten Qualitätsmaße *Precision*, *Recall* und *Fallout* lassen sich mit Mitteln der Mengenlehre wie folgt formulieren:

$$precision = \frac{|A \cap B|}{|A|} \quad (8.1)$$

$$recall = \frac{|A \cap B|}{|B|} \quad (8.2)$$

$$fallout = \frac{|A \cap \bar{B}|}{|\bar{B}|} = \frac{|A \setminus B|}{|\bar{B}|} \quad (8.3)$$

Diese drei Werte bewegen sich im Intervall $[0 \dots 1]$ und werden bisweilen auch als Prozentwerte angegeben. Die Precision beschreibt das Verhältnis der Anzahl korrekter Treffer

(*korrekt positiv*) zur Anzahl aller Treffer. Der Recall ist das Verhältnis der Anzahl der korrekten Treffer zur Anzahl aller erwarteten Treffer. In einer alternativen Deutung beschreibt die Precision die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein zufällig ausgewähltes Element x aus der Menge A aller gefundenen Dokumente auch Element der Menge B aller erwarteten Dokumente ist. Umgekehrt beschreibt der Recall die bedingte Wahrscheinlichkeit eines zufällig ausgewählten Elementes x aus B , auch Element in A zu sein.

$$precision = P(x \in B | x \in A) = \frac{P(x \in A \cap B)}{P(x \in A)} \quad (8.4)$$

$$recall = P(x \in A | x \in B) = \frac{P(x \in A \cap B)}{P(x \in B)} \quad (8.5)$$

Eine hohe Precision bedeutet, dass nur wenige der von einem Retrievalsystem gefundenen Dokumente aus Sicht des Benutzers irrelevant sind und ein hoher Recall bedeutet, dass nur wenige relevante Dokumente bei einer Suche nicht gefunden wurden. Es ist unmittelbar einsichtig, dass die Güte eines Retrievalsystems umso höher ist, je höher die beiden Qualitätsmaße Precision und Recall sind. Wie sich im weiteren Verlauf dieses Kapitels zeigen wird, besteht zwischen beiden Qualitätsmaßen ein Zusammenhang, der dazu führt, dass beide Werte nicht unabhängig voneinander betrachtet werden dürfen. Es ließe sich beispielsweise leicht ein Retrieval-System konstruieren, welches alle Dokumente der Menge D als Ergebnis liefert (d. h. $A = D$) und somit einen Recall von 1 beziehungsweise 100 % hätte. Die Precision eines solchen Systems wäre sehr gering, ebenso wie der Nutzen für den Anwender.

Der Fallout gibt das Verhältnis der Anzahl der irrelevanten Treffer zur Gesamtzahl aller irrelevanten Treffer an. Dieses Qualitätsmaß drückt also die bedingte Wahrscheinlichkeit aus, dass irgendein irrelevantes Dokument x fälschlicherweise gefunden wird:

$$fallout = P(x \in A | x \in \bar{B}) \quad (8.6)$$

Ein Retrievalsystem gilt als umso besser, je kleiner der Fallout ist. In Abbildung 8.1 sind die drei Qualitätsmaße in 3-Mengen-Venn-Diagrammen [Edw04] als Verhältnis der jeweils dunkleren grauen Fläche zur Summe beider grauen Flächen dargestellt.

Um die Bewertung eines Retrievalsystems mittels der Qualitätsmaße Precision und Recall unter Berücksichtigung des oben skizzierten Zusammenhangs zwischen beiden Werten zu vereinfachen, wird in der Literatur häufig der F -Wert oder, präziser, der F_1 -Wert (engl. *F₁-measure*) herangezogen, welcher laut [YL99, Ren04] erstmals in [Rij79] verwendet wurde. Dabei handelt es sich um den harmonischen Mittelwert aus Precision und Recall:

$$F_1 = \frac{2 \times precision \times recall}{precision + recall} \quad (8.7)$$

Während bei den meisten Retrievalsystemen das Auffinden von Dokumenten mit bestimmten Eigenschaften im Vordergrund steht, zielt das in dieser Arbeit entwickelte System auf das Auffinden von Teilen von Dokumenten, das heißt von Textstellen (Worte, Teilworte, Wortgruppen, Symbole, ...) innerhalb von Handschriftdokumenten ab, woraus folgt, dass zur Bewertung der Güte des Retrievalsystems auch die Fähigkeit untersucht wird, fehlerfrei alle

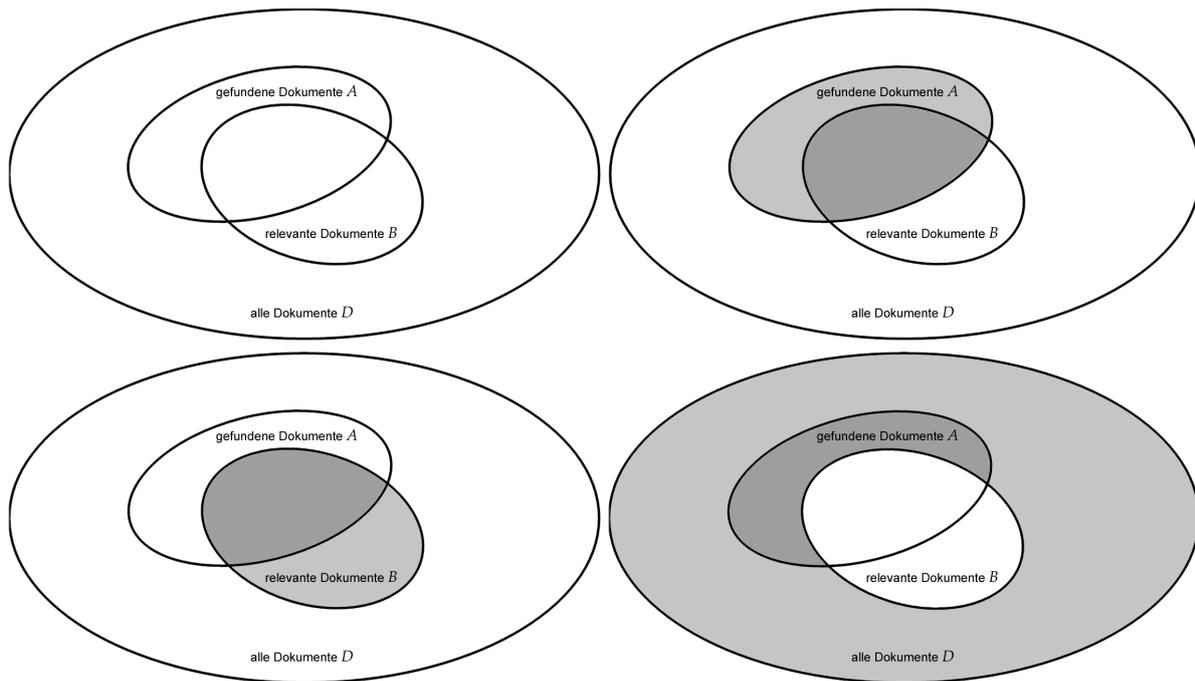


Abbildung 8.1: Die Mengen der relevanten und gefundenen Dokumente als Venn-Diagramm: Übersicht (oben links), Darstellung der Precision (oben rechts), des Recalls (unten links) und des Fallout (unten rechts)

erwarteten Textstellen zu finden. Bei beiden Arten von Retrievalsystemen (*Suche nach Dokumenten* vs. *Suche in Dokumenten*) ist es möglich, für eine Suchanfrage die Menge der tatsächlichen Treffer mit der Menge der erhofften und relevanten Treffer zu vergleichen und somit nach Formel 8.1 und 8.2 die Precision und den Recall zu bestimmen. Es fällt jedoch schwer, für den Fall der Suche in Dokumenten die Mächtigkeit $|\bar{B}|$ der Menge aller irrelevanten Textstellen zu bestimmen. Aus diesem Grund soll hier auf die Bestimmung des Fallout verzichtet werden.

Ein weiterer Unterschied gegenüber den meisten anderen Retrievalsystemen besteht darin, dass das hier entwickelte System zur Suche in handschriftlichen Dokumenten stark abhängig vom Benutzer, das heißt, vom Schreiber der Dokumente ist. Damit verhält sich das System sehr ähnlich zu beispielsweise biometrischen Authentifikationssystemen, deren Evaluation laut [Bro07] personenweise zu erfolgen hat (hier am Beispiel der Fehlerrate *FRR*; siehe auch Abschnitt 7.1):

»Bei der Bestimmung der *FRR* werden nur erfolgreich enrollte Nutzer berücksichtigt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Misserfolg $FRR(n)$ für eine bestimmte Person [...] n ist gegeben durch:

$$FRR(n) = \frac{\text{Zahl der zurückgewiesenen Verifikationsversuche für eine berechnete Person } n}{\text{Zahl aller Verifikationsversuche einer berechtigten Person } n}$$

Die Genauigkeit steigt dabei mit zunehmender Zahl unabhängiger Versuche pro Person [...] n . Die globale *FRR* für N Versuchsteilnehmer ist definiert als der

Mittelwert über alle $FRR(n)$:

$$FRR = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N FRR(n) \ll$$

In Anlehnung an dieses Vorgehen soll für die Evaluation des hier entwickelten Retrievalsystems gelten:

$$precision_n(\tau) = \frac{\text{Zahl korrekter Treffer bei Suche nach Dokumenten von Person } n}{\text{Zahl aller Treffer bei Suche nach Dokumenten von Person } n} \quad (8.8)$$

$$recall_n(\tau) = \frac{\text{Zahl korrekter Treffer bei Suche nach Dokumenten von Person } n}{\text{Zahl der erwarteten Treffer bei Suche nach Dokumenten von Person } n} \quad (8.9)$$

Hierbei seien $precision_n(\tau)$ und $recall_n(\tau)$ die Precision und der Recall für einen Schreiber n . Der Funktionsparameter τ ist der Toleranz- oder Schwellwert für die Anfrage (vgl. Kapitel 6). Für N verschiedene Schreiber ergeben sich damit die globalen Präzisions- und Recallwerte wie folgt:

$$precision(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N precision_n(\tau) \quad (8.10)$$

$$recall(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N recall_n(\tau) \quad (8.11)$$

Die Precision und der Recall als Funktionen des Parameters τ lassen sich als Graphen in Diagrammen darstellen. Dadurch ist zum einen der Einfluss des Schwellwertes τ auf diese Qualitätsmaße erkennbar, zum anderen ist hierdurch ein Vergleich unterschiedlicher Retrievalsysteme möglich. Abbildung 8.2 (links) zeigt das Beispiel eines solchen Diagramms für zwei verschiedene Retrievalsysteme, dargestellt als durchgezogene beziehungsweise gestrichelte Kurven.

Der Schnittpunkt der Precision- und Recall-Kurve des jeweiligen Retrievalsystems entspricht etwa dem *EER*-Punkt¹ (engl. *equal error rate*) biometrischer Systeme, mit dem Unterschied, dass ein biometrisches System als umso besser gilt, je kleiner der EER-Wert ist, während für Retrievalsysteme möglichst hohe Werte der Precision und des Recalls im Schnittpunkt wünschenswert sind. Im Beispiel in Abbildung 8.2 wäre daher das System 1 besser als das System 2.

Die rechte Seite der Abbildung 8.2 zeigt die Precision als Funktion des Recalls. Diese Art der Darstellung wird als Precision-Recall-Diagramm bezeichnet² [Rij79, S. 115] und ist

¹Der *EER*-Punkt ist der Schnittpunkt der Fehlerkurven der *FRR* und *FAR*.

²In der Literatur finden sich mitunter auch Diagramme, die den Recall in Abhängigkeit von der Precision darstellen, und die als Recall-Precision-Diagramme bezeichnet werden [Mal06].

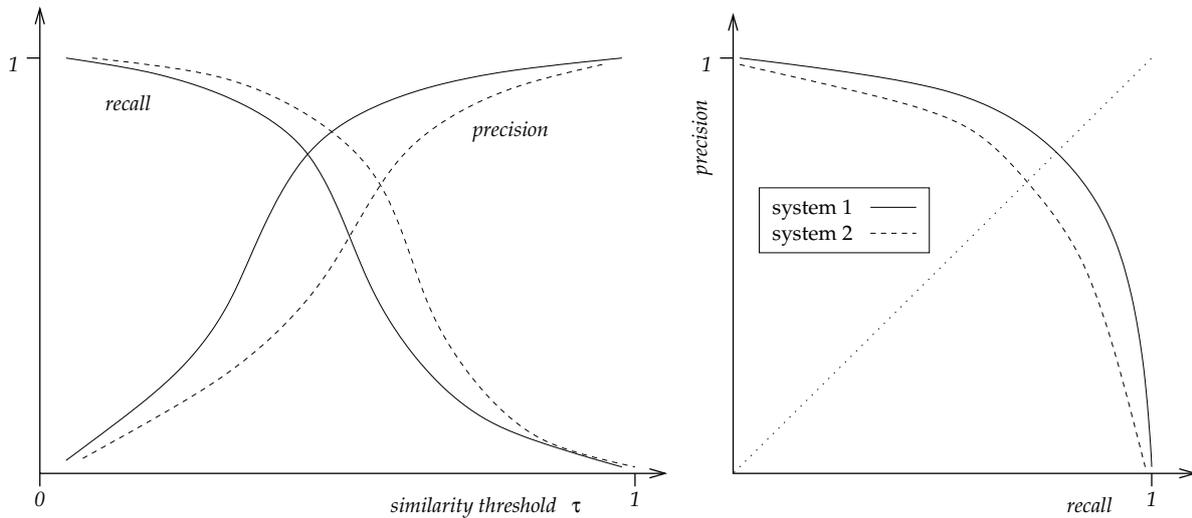


Abbildung 8.2: Grafische Darstellung der Precision und des Recalls zweier Retrievalsysteme als Funktionen eines Ähnlichkeitsschwellwertes (links) sowie als Precision-Recall-Diagramm (rechts)

verwandt mit den klassischen ROC-Kurven (engl. *receiver operating characteristic*), welche für Klassifikatoren die Abhängigkeit der *korrekt positiven* von den *falsch positiven* Entscheidungen visualisieren [Faw06, HMS01, S. 454]. Die Schnittpunkte der Kurven in diesem Precision-Recall-Diagramm mit der Hauptdiagonalen (hier dargestellt als gepunktete Linie) entsprechen den Werten der Schnittpunkte der Precision- und Recall-Kurven im linken Diagramm.

Jeder Punkt auf der Precision-Recall-Kurve eines Retrievalsystems entspricht einem anderen Schwellwert τ . Um den Vergleich von Retrievalsystemen zu vereinfachen, werden oftmals nur einzelne Größenwerte statt der kompletten Precision-Recall- oder ROC-Kurven herangezogen³; zum einen die bereits erwähnten Schnittpunkte mit der Hauptdiagonalen [HMS01, S. 455] und zum anderen die Flächen unter den Precision-Recall-Kurven (*AUC*, engl. *area under curve*) [Faw06]. Beide Größen können einen Wert im Intervall $[0, 1]$ annehmen.

Für n diskrete Ähnlichkeitsschwellwerte τ_1 bis τ_n seien $precision(\tau_1)$ bis $precision(\tau_n)$ und $recall(\tau_1)$ bis $recall(\tau_n)$ die ermittelten Werte der Precision und des Recalls. Es gilt hierbei

$$0 \leq precision(\tau_1) \leq precision(\tau_2) \leq \dots \leq precision(\tau_n) \leq 1 \quad (8.12)$$

und

$$1 \geq recall(\tau_1) \geq recall(\tau_2) \geq \dots \geq recall(\tau_n) \geq 0 \quad (8.13)$$

mit $0 \leq \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n \leq 1$. Die *AUC* einer Precision-Recall-Kurve, die durch n Ähnlichkeitsschwellwerte τ_1 bis τ_n definiert ist, kann wie folgt bestimmt werden:

$$AUC = \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} \cdot \left(precision(\tau_i) + precision(\tau_{i+1}) \right) \cdot \left(recall(\tau_i) - recall(\tau_{i+1}) \right) \quad (8.14)$$

³»To compare classifiers we may want to reduce ROC performance to a single scalar value representing expected performance.« [Faw06]

Hierbei wird die Fläche unter der Precision-Recall-Kurve als Summe von Teilflächen in Trapezform berechnet. Die Werte für τ_0 und τ_{n+1} sollen mit 0 beziehungsweise 1 festgelegt sein. Weiterhin gelte $precision(0) = recall(1) = 0$ und $precision(1) = recall(0) = 1$. Alternativ lässt sich die Fläche auch durch eine Zerlegung in Rechtecke annähern, wobei die Resultate dabei pessimistischer sind als bei der Trapezmethode:

$$AUC' = \sum_{i=1}^n precision(\tau_i) \cdot (recall(\tau_i) - recall(\tau_{i+1})) \quad (8.15)$$

Grafisch werden beide Methoden in Abbildung 8.3 veranschaulicht. Die Trapezmethode ist im linken Diagramm, die Rechteckmethode im rechten Diagramm dargestellt.

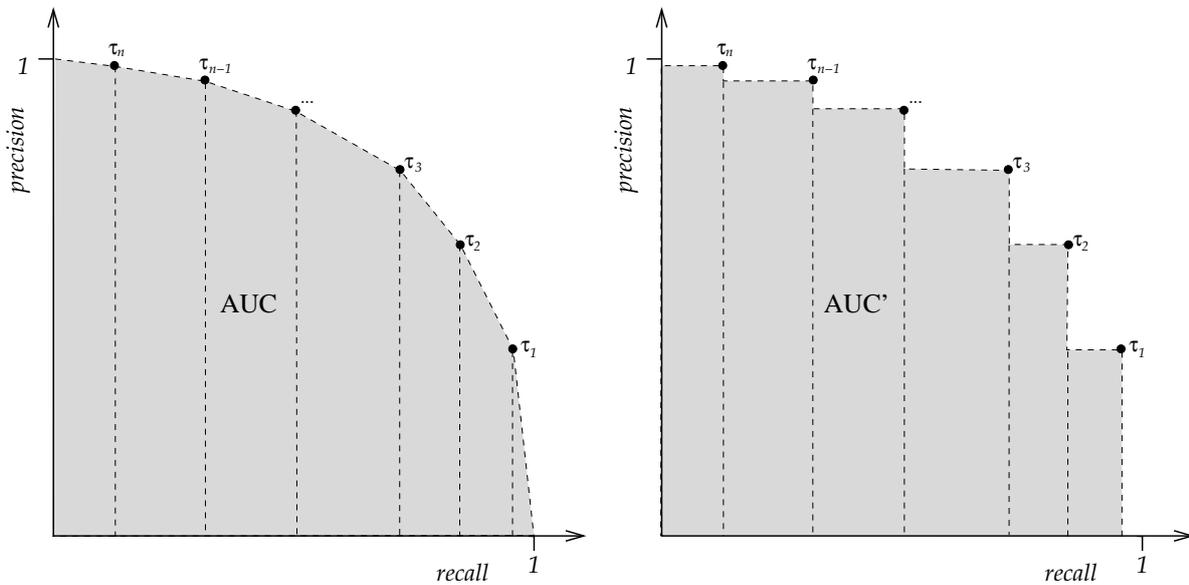


Abbildung 8.3: Berechnung der Fläche unter einer Precision-Recall-Kurve mittels der Trapez- und der Rechteckmethode

Der erwähnte Schnittpunkt einer Precision-Recall-Kurve mit der Hauptdiagonalen lässt sich nicht in jedem Fall exakt bestimmen, da bei lediglich endlich vielen Suchanfragen sich die Werte der Precision und des Recalls auch bei kontinuierlich steigenden Ähnlichkeitsschwellwerten in diskreten Schritten verändern. Der Schnittpunkt kann jedoch dadurch approximiert werden, dass für jenes Precision-Recall-Paar einer Kurve, welches der Hauptdiagonalen am nächsten liegt, der F_1 -Wert bestimmt wird; das der Hauptdiagonalen am nächsten liegende Precision-Recall-Paar minimiert den Wert $|precision - recall|$.

$$F_1 = \frac{2 \times precision(\tau_{EER}) \times recall(\tau_{EER})}{precision(\tau_{EER}) + recall(\tau_{EER})} \quad (8.16)$$

mit

$$\tau_{EER} = \underset{\tau}{\operatorname{argmin}} |precision(\tau) - recall(\tau)| \quad (8.17)$$

Für die Evaluierung der verschiedenen Varianten (Merkmalstypen und Parametrisierungen) des in dieser Arbeit entwickelten Handschriftsuchsystems im folgenden Kapitel sollen die Größen $precision(\tau_{EER})$, $recall(\tau_{EER})$, F_1 und AUC bestimmt werden.

8.2 Datenbank

Zur Ermittlung der zuvor beschriebenen Qualitätsmaße für das in dieser Arbeit entwickelte Retrievalsystem wurde eine möglichst umfangreiche Sammlung von handschriftlichen online Dokumenten benötigt, also eine Testdatenbank. Um für diese Zwecke geeignet zu sein, muss eine Datenbank Textdokumente enthalten, in denen eine größere Anzahl von Worten, Wortgruppen, gezeichneten Symbolen und ähnlichen Eingaben *wiederholt* vorkommen, so dass *nach diesen Wiederholungen gesucht* werden kann. Des Weiteren dürfen diese Datenbanken nicht zu klein sein, damit die Evaluation eine statistische Signifikanz aufweist. In der Literatur sind eine Reihe von verfügbaren Handschriftdatenbanken erwähnt, die jedoch für andere Zwecke erstellt wurden und für eine Evaluierung des hier vorgestellten Systems aus verschiedenen Gründen zumeist nicht geeignet sind.

Ein Teil der Datenbanken diene primär der Evaluierung von biometrischen Systemen zur stiftbasierten Authentifikation⁴, etwa die mit einer Videokamera erfasste Signaturdatenbank von *Munich et al.* [MP98], die *PlataSign*-Datenbank von *Vielhauer et al.* [ZV03, Vie04, SWV06], die Datenbanken des Wettbewerbs SVC 2004 (engl. *Signature Verification Competition*) [YCX⁺04], die *eNTERFACE'05*-Biometrie-Datenbank [SPC⁺05] oder der *MYCT-Baseline-Corpus* [OFS⁺03, FFOG06].

Andere öffentliche Handschriftdatenbanken bestehen nur aus separaten Buchstaben und Worten, jedoch nicht aus kompletten Texten. Beispiele sind die *train_r01_v07* Datenbank [GSP⁺94] des UNIPEN-Projektes, die *Pendigits-Datenbank* [AA96, AA01] oder die *IRON-OFF* Datenbank [VGLBK99]. Ziel dieser Datenbanken ist das Trainieren von Handschrifterkennungssystemen.

Eine möglicherweise für den Zweck der Evaluierung des Retrievalsystems nützliche Quelle für Handschriftdokumente ist das *Nakagawa Laboratory* der Universität Tokio (*TUAT – Tokyo University of Agriculture & Technology*). Dort entstanden zwei Datenbanken (*Kuchibue* und *Nakayosi*), die Schriftproben von 120 beziehungsweise 163 Personen enthalten [JN01, OKON04, ON05]. Da jedoch die Texte mehrheitlich in japanischer Sprache und entsprechender Schrift verfasst sind (Abschriften aus japanischen Zeitungen), hat der Autor dieser Arbeit keine Möglichkeit, sinnvoll Suchanfragen zu stellen und die Resultate einer Suche zu bewerten, weswegen diese Datenbanken für die Evaluation in dieser Arbeit nicht verwendet werden können.

Das von *Jain und Namboodiri* in [JN03] vorgestellte System zur Handschriftsuche wurde von den Autoren mit einer eigenen Datenbank getestet, die jedoch nicht öffentlich verfügbar ist. Zudem war die Datenbank, bestehend aus 3.872 Worten, aufgezeichnet von einer einzigen Person, sehr klein. Ähnliches gilt für die Datenbasis in [LT94], die aus Handschriftdaten von lediglich zwei Personen besteht und ebenfalls nicht öffentlich ist.

⁴Verifikation oder Identifikation von Personen anhand ihrer Unterschrift, individuellen oder vorgegebenen Ziffernfolgen, Symbolen oder ähnlichen Eingaben.

Im Bereich der off-line-basierten Suche in Handschriftdokumenten wäre die Verfügbarkeit an passenden Datenbanken weitaus höher. So existiert mit der *IAM-Handwriting-Database* [MB99, ZB00], bestehend aus 1.500 Seiten gescannten Textes von 500 verschiedenen Schreibern eine außergewöhnlich umfangreiche Basis für statistisch signifikante und miteinander vergleichbare Tests verschiedener Systeme zur Texterkennung oder -suche. Darüberhinaus ist es im off-line Bereich weitaus einfacher, selbst solche Datenbanken zu erstellen, da handschriftliche Dokumente auf Papier im Alltag weit verbreitet sind [SHS05] und zudem viele Bibliotheken historische Manuskripte archivieren [RKL⁺02, RM03, GX04, BKD⁺04].

Eine Ausnahme unter den frei verfügbaren on-line Handschriftdatenbanken stellt die *IAM-OnDB* Datenbank [LB05b, LB05a] des *Institutes für Informatik und angewandte Mathematik* der Universität Bern dar. Diese Datenbank besteht aus Sätzen, die dem *LOB Corpus* [JNLG78] entstammen und an einem Whiteboard geschrieben wurden. Die Datenerfassung erfolgte mit dem *eBeam* System [Lui07] der Firma Luidia (siehe Abschnitt 3.3). Insgesamt 221 Personen schrieben zusammen mehr als 82.000 Worte, wobei darauf geachtet wurde, dass die Personen jeweils möglichst viele verschiedene Worte schrieben, was umgekehrt bedeutet, dass die einzelnen Personen kaum Worte wiederholten.⁵ Dieser Umstand, der diese Datenbank möglicherweise für das Trainieren von Handschrifterkennungssystemen besonders geeignet macht [LB06], führt dazu, dass eine Suche nach wiederholten Wortvorkommen ein und derselben Person nur in wenigen Fällen möglich ist.

Aus Mangel an geeigneten, öffentlich verfügbaren Datenbanken wurde für diese Arbeit eine *eigene Sammlung* von handschriftlichen on-line Dokumenten erstellt. In der Anfangszeit wurden die Testpersonen gebeten, Texte ihrer Wahl aus Zeitschriften oder Büchern abzuschreiben oder eigene Texte zu verfassen. Später diente ein systematischerer Testplan (siehe Anhang B) als Grundlage für die Schriftdatenerfassung. Als Geräte zur Erfassung der Schreibsignale dienten Schreibgeräte, die auf Basis dreier verschiedener physikalischer Effekte die Stiftposition bestimmen: die optische Erfassung der Schreiboberfläche (*io Personal Digital Pen* [Log07] der Firma Logitech; siehe Abschnitt 3.1), die Messung der Laufzeitverzögerung des Schalls (*PC Notes Taker* [Peg07] der Firma Pegasus Technologies; siehe Abschnitt 3.3) sowie die Nutzung des elektromagnetischen Feldes einer speziellen Schreibunterlage (*DigiMemo Digital Notepad* [ACE07] der Firma ACE CAD; siehe Abschnitt 3.2). Für den einfachen Zugriff auf die Rohdaten der so erfassten Handschriftdaten wurden diese in einer Datenbank gespeichert. Das Datenmodell dazu ist in Anhang C näher beschrieben.

Um die Evaluation des hier vorgestellten Retrievalsystems mittels der erstellten Dokumentendatenbank automatisieren zu können, ist es nötig, ein bestimmtes *apriorisches Wissen*, die so genannte *Ground-Truth*, zu definieren. Das heißt, es müssen für alle in der Evaluation gestellten Suchanfragen die erwarteten Treffer, also die relevanten Textstellen manuell ausgezeichnet werden. Hierfür kommt ein Zusatzmodul des Retrievalsystems zum Einsatz, das in Abbildung 8.4 dargestellt ist. Zu sehen ist ein handschriftliches Dokument. Hervorgehoben sind die Positionen einer Auswahl von Wörtern.

Die Ground-Truth-Informationen⁶ für alle im Test verwendeten Suchanfragen sind in ei-

⁵»To acquire a database of handwritten sentences contained in the corpus we split the texts in the corpus into fragments of about 50 words each. [...] To make sure that many different word samples are obtained from each writer, we have chosen these [...] texts from different text categories in the LOB corpus.« [LB05b]

⁶Dokumentenkenntnis und Start- und Endzeitpunkt aller Vorkommen von für die Suche relevanten Worten,

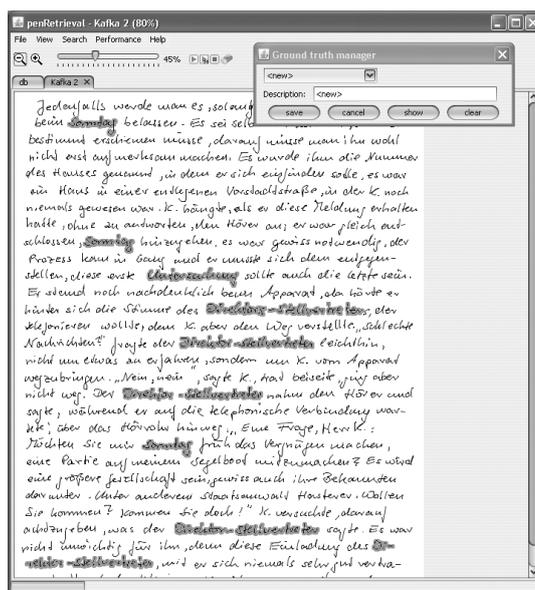


Abbildung 8.4: Ground-Truth-Manager Modul des Retrievalsystems

ner Datenbank separat von den Handschriftrohdaten gespeichert (siehe Anhang C). Die für die Evaluation verwendete Datenbasis besteht aus 181 Dokumenten von 23 Personen (siehe Tabelle 8.1). Die Dokumente enthalten insgesamt 21.894 Wörter sowie 173 Symbole. 83 der Dokumente sind in deutscher, 51 in englischer Sprache und 41 in Urdu [Mah07], einer in Indien und Pakistan verwendeten Sprache. 158 verschiedene Begriffe oder Wortgruppen in insgesamt 1.632 Wiederholungen wurden mittels des Moduls aus Abbildung 8.4 manuell ausgezeichnet und für die Suche als Query sowie als Ground-Truth verwendet. Die Suche fand dabei personenweise separat statt, das heißt, es wurde nur innerhalb der Dokumente jeweils eines Benutzers gesucht.

In Abbildung 8.5 ist das Systemschema aus Kapitel 4 (Abbildung 4.1) zu sehen, welches für die Evaluation um die entsprechenden Module erweitert wurde.

	<i>ioPen</i>	<i>DigiMemo</i>	<i>Notes Taker</i>	gesamt
Anzahl Schreiber	13	4	9	23
Anzahl Dokumente	72	22	87	181
Anzahl Worte	10.607	2.176	9.111	21.894
Anzahl Symbole	173	0	0	173
Anzahl der Suchanfragen	527	113	992	1.632

Tabelle 8.1: Übersicht der Evaluationsdatenbasis

Wortgruppen und Symbolen

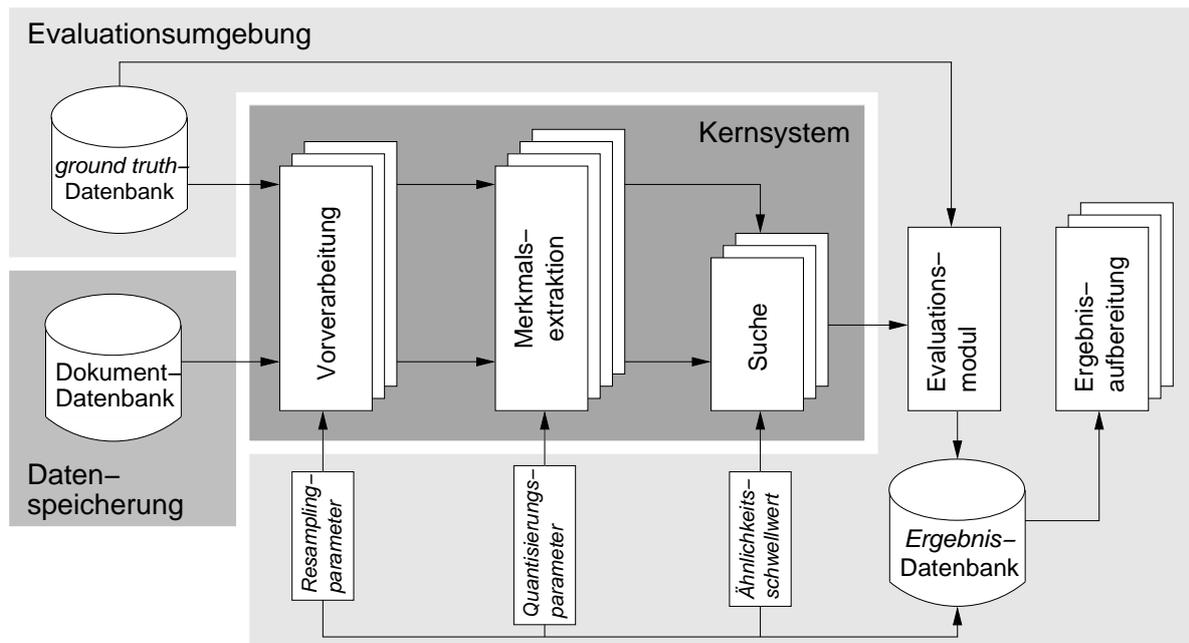


Abbildung 8.5: Angepasstes Systemschema für die Evaluation der Handschriftsuche

8.3 Vorgehen bei der Evaluation

Für die Evaluation wurden die Größen F_1 und AUC sowie die Precision-Recall-Kurven (das heißt, die Precision und der Recall bei verschiedenen Ähnlichkeitsschwellwerten) für die in Kapitel 5 beschriebenen Merkmalstypen mit jeweils einer Auswahl an Parametereinstellungen bestimmt, welche im folgenden Kapitel 9 sowie in den Anhängen D und E diskutiert und einzeln dargestellt werden.

8.3.1 Evaluation der Systemteile ohne Fusion

Die Merkmalsextraktion, basierend auf *quadratischen beziehungsweise dreieckigen Gittern*, ist nur durch die Gitterbreite parametrisierbar. Wie in Abschnitt 5.2 diskutiert, steigt mit kleiner werdenden Gitterweiten die Länge der extrahierten Zeichenkette einer handschriftlichen Eingabe und damit auch der Berechnungsaufwand. Aus diesem Grund wurde als untere Grenze der Gitterweite der Wert von sieben Längeneinheiten gewählt, was je nach Auflösung des verwendeten Gerätes 0,14 bis 0,26 mm entspricht⁷. Je größer die Gitterweite ist, umso geringer ist die geometrische Beschreibungskraft der extrahierten Merkmale. Daher wurde als Obergrenze der Gitterweite der Wert von 35 Längeneinheiten (0,74 bis 1,3 mm) gewählt. In Abbildung 8.6 (links) ist der Verlauf der Precision und des Recall in Abhängigkeit des Ähnlichkeitsschwellwertes beispielhaft für drei Experimente mit Gitterweiten von 10, 15 und 20 Längeneinheiten veranschaulicht. Die hier dargestellten Retrievalergebnisse ergaben sich für

⁷Die räumlichen Auflösungen der Geräte betragen 677,33 ppi (Logitech ioPen), 1000 ppi (ACE CAD DigiMemo) und 1200 ppi (Pegasus PC NotesTaker).

Dokumente, die mit dem Gerät *Logitech ioPen* erfasst wurden. In Abbildung 8.6 (rechts) sind dieselben Daten als Precision-Recall-Kurven erkennbar. Die vollständigen Daten aller drei Geräteklassen sowie für weitere Parametereinstellungen finden sich im folgenden Kapitel sowie in den Anhängen D und E.

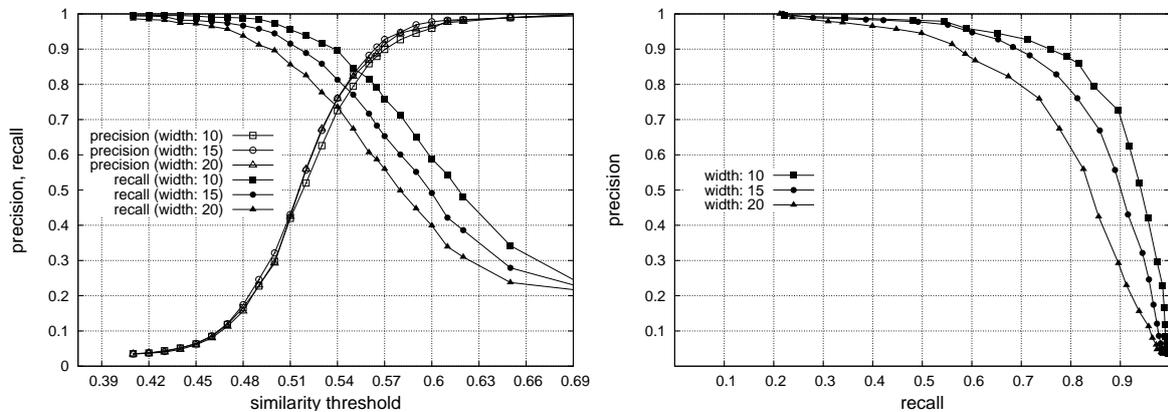


Abbildung 8.6: Precision- und Recallwerte, ermittelt für quadratische Gittermerkmale (Weiten: 10, 15, 20), dargestellt als Funktionen des Ähnlichkeitsschwellwertes (links) und als Precision-Recall-Diagramm (rechts)

Der Merkmalstyp der *lokalen Schriftrichtung* hat zwei Parameter; den Abstand aufeinanderfolgender Punkte nach dem Resampling sowie den Grad der Quantisierung der Winkel, das heißt, die Anzahl unterscheidbarer Richtungen. Wie im Falle der gitterbasierten Merkmale, besteht ein Zusammenhang zwischen dem Punktabstand und der Länge der resultierenden Merkmalssequenz. Für diesen Parameter wurde als untere Grenze der Wert sieben und als obere Grenze erneut 35 verwendet. Für die untere Grenze des Quantisierungsgrades wurde *drei*, als obere Grenze 20 gewählt. Werte kleiner als *drei* erschienen nicht sinnvoll, da mit lediglich zwei unterscheidbaren Richtungen zweidimensionale Formen nicht sinnvoll beschrieben werden können; ein Wert von *eins* würde bedeuten, dass überhaupt keine Unterscheidungsfähigkeit von Merkmalen bestünde.

Merkmale auf Basis der *lokalen Schriftkrümmung*, wenn sie entsprechend der Gleichung 5.29 bestimmt wird, besitzen dieselben Parameter wie die Merkmale der lokalen Schriftrichtung, nämlich den Resamplingabstand und den Quantisierungsgrad. Für die Evaluation wurden dieselben Parameterbelegungen wie für die Schriftrichtung verwendet.

Der Merkmalstyp der *lokalen Schriftneigung* besitzt als einzigen Parameter den Grad der Quantisierung des Neigungswinkels aufeinanderfolgender vertikaler Minima und Maxima (siehe Gleichung 5.36). Wie bei den zuvor erwähnten Merkmalstypen wird der Quantisierungsgrad für Zwecke der Evaluation auf Werte zwischen drei und 20 gesetzt.

8.3.2 Evaluation der Fusionsstrategien

Das Ermitteln der Leistungsfähigkeit von Systemen, die auf einer Fusion von Teilsystemen beruhen, ist eine komplexe und zeitaufwändige Aufgabe. Der Grund hierfür ist die zum Teil

große Anzahl freier Parameter, welche idealerweise in all ihren Ausprägungen untersucht werden müssten. Da dies aufgrund des hohen Bedarfes an Ressourcen nicht zweckmäßig ist, wurde in dieser Arbeit nur eine kleine Auswahl von Parameterausprägungen der Teilsysteme berücksichtigt, und an diesen untersucht, wie sich die Fusion auf die Leistungsfähigkeit auswirkt.

Multi-Sample-Fusion

Für die in Abschnitt 7.2.1 beschriebene Multi-Sample-Fusion auf der **Entscheidungsebene** ist der Wert n (die Anzahl der Suchwiederholungen) der einzige Parameter, zusätzlich zu denen des zugrunde liegenden fusionslosen Systems. Der Zeitaufwand für den eigentlichen Suchvorgang erhöht sich um den Faktor $n + 1$ im Gegensatz zur ursprünglichen Suchzeit. Daher wurde die Evaluation nur für Werte $n \leq 3$ durchgeführt.

Neben diesem Parameter n der Suchwiederholungen existiert bei der Multi-Sample-Fusion auf der **Vergleichsebene** ein weiterer Parameter: die Auswahl der Fusionsfunktion der Ähnlichkeitsvektoren. Hierbei wurden die *Minimum-*, die *Maximumfunktion* sowie der *Durchschnitt* untersucht. Für den Parameter n galt hier ebenfalls $n \leq 3$.

Multialgorithmische Fusion

Ein Retrievalsystem, das auf der **Merkmalsebene** eine multialgorithmische Fusion durchführt (siehe Abschnitt 7.2.2), hat einen Zeitaufwand für die Suche, der den eines Systems ohne Fusion nicht übersteigt, da sich die Längen der Merkmalszeichenketten durch die Fusion nicht vergrößern; lediglich die Alphabetgröße steigt. Die im Abschnitt 7.2.2 diskutierten, für eine solche Fusion geeigneten Merkmalstypen sind die lokale Schriftrichtung und -krümmung. Beide Merkmalstypen besitzen zwei Parameter: den Resamplingabstand und den jeweiligen Quantisierungsgrad. Für die Fusion beider Merkmalstypen ist es nötig, dass der Parameter des Resamplingabstandes der fusionierten Merkmale gleich ist. Damit ergibt sich eine Gesamtzahl von drei unabhängigen Parametern des fusionierten Gesamtsystems: der Resamplingabstand und zwei Quantisierungsgrade q_1 und q_2 . Als Resamplingabstand wurden für die Tests die Werte 10, 15, 20 und 30 verwendet. Für q_1 und q_2 wurden die Werte 1, 4, 8 und 16 berücksichtigt (ohne $q_1 = q_2 = 1$).

Die multialgorithmische Fusion auf der **Entscheidungsebene** ist ohne Weiteres für jede Kombination beliebiger Einzelsysteme, unabhängig von ihren jeweiligen Merkmalstypen und deren Parametern möglich. Aufgrund des hohen Zeitbedarfs für das Testen aller möglichen Kombinationen wurde in dieser Arbeit eine Teilmenge dieser Kombinationsmöglichkeiten berücksichtigt: es wurden jeweils zwei Teilsysteme miteinander fusioniert, wobei eines der Teilsysteme stets jenes war, welches die besten Einzelergebnisse erbrachte. Auf diese Weise sollte untersucht werden, ob die Resultate dieses besten Einzelsystems durch eine Fusion mit weniger leistungsstarken Einzelsystemen weiter gesteigert werden können.

Für eine multialgorithmische Fusion auf der Entscheidungsebene wurden die Schwellwerte der Einzelsysteme unabhängig voneinander variiert und für jede Schwellwertkombination die Precision und der Recall der Fusion ermittelt. Die Fusion wurde durchgeführt sowohl mittels Bestimmung der Schnitt-, als auch der Vereinigungsmenge der Ergebnismengen der Ein-

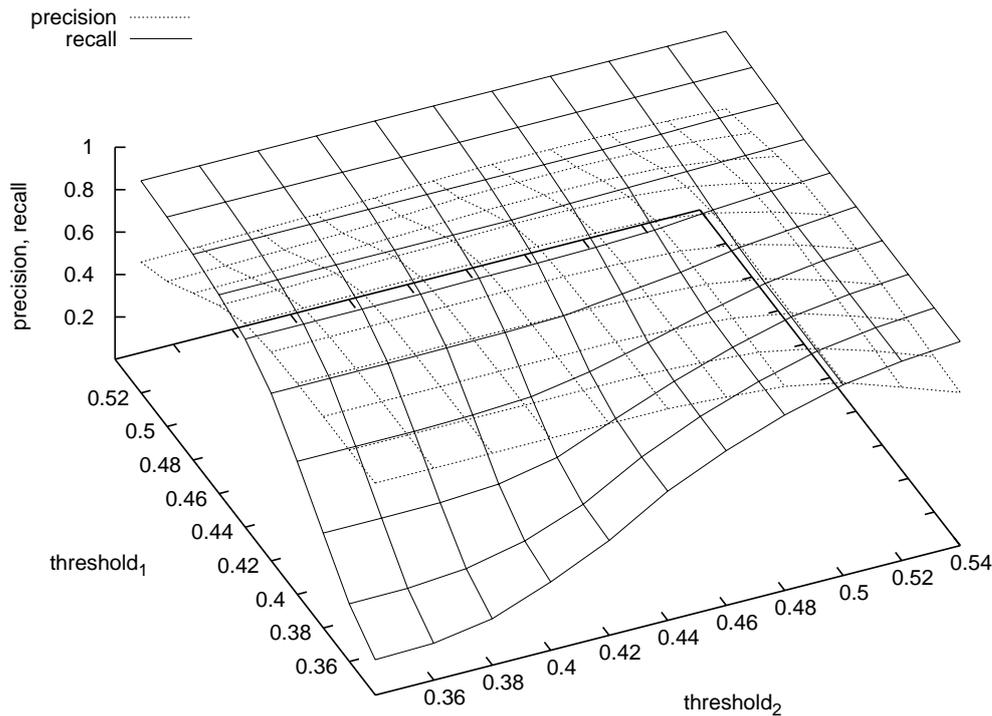


Abbildung 8.7: Exemplarische Precision- und Recallflächen bei der multialgorithmischen Fusion zweier Systeme auf der Entscheidungsebene mittels Mengenvereinigung

zelsysteme. In Abbildung 8.7 sind exemplarisch die Resultate der Fusion zweier Einzelsysteme mittels Vereinigungsmenge als dreidimensionales Diagramm dargestellt. Die Achsen $threshold_1$ und $threshold_2$ stehen für die Ähnlichkeitsschwellwerte der Einzelsysteme und die durch Gitternetze dargestellten Flächen beschreiben die Precision und den Recall. Im Gegensatz zu zweidimensionalen Diagrammen für die Darstellung der Abhängigkeit der Precision und des Recall vom Ähnlichkeitsschwellwert eines einzelnen Retrievalsystems (vergleiche etwa Abbildung 8.6), sind im vorliegenden dreidimensionalen Diagramm in Abbildung 8.7 die Funktionswerte der Schnittlinie beider Flächen nicht leicht erkennbar. Aus diesem Grund wird im Folgenden für die grafische Darstellung der Evaluationsergebnisse einer multialgorithmischen Fusion auf der Entscheidungsebene ein dreidimensionales Diagramm gewählt, welches die F_1 -Werte als Fläche in Abhängigkeit der Ähnlichkeitsschwellwerten $threshold_1$ und $threshold_2$ abbildet. Abbildung 8.8 zeigt die F_1 -Fläche, welche sich aus den Werten in der vorigen Abbildung ergibt. Diese Art der Darstellung scheitert jedoch bei der multialgorithmischen Fusion auf der Entscheidungsebene von mehr als zwei Teilsystemen, da die Darstellbarkeit mit zweidimensionalen Druckverfahren sowie das menschliche Vorstellungsvermögen begrenzt sind.

Aufgrund der Abhängigkeit der Precision und des Recall von zwei Ähnlichkeitsschwellwerten bei der Fusion zweier Systeme auf der Entscheidungsebene, ist es nicht möglich, eine

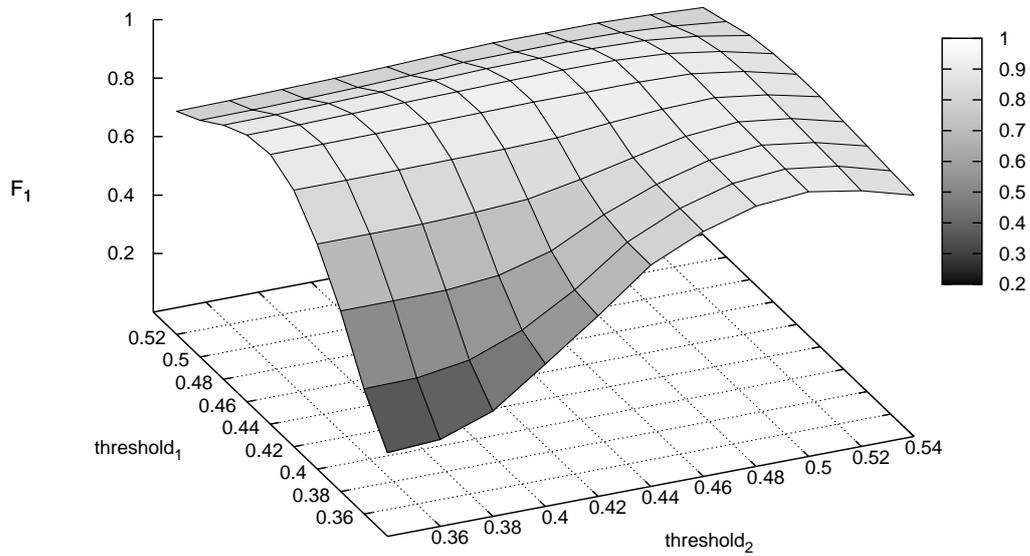


Abbildung 8.8: Exemplarische F_1 -Fläche bei der multialgorithmischen Fusion zweier Systeme auf der Entscheidungsebene mittels Mengenvereinigung

Precision-Recall-Kurve wie in Abbildung 8.2 zu bestimmen. Folglich lässt sich der Wert AUC für eines solchermaßen fusionierten Gesamtsystems nicht ermitteln.

Die multialgorithmische Fusion auf der **Vergleichsebene** wurde analog zum Vorgehen bei der Multi-Sample-Fusion auf derselben Ebene durchgeführt. Hier wie dort wurde die Fusion mittels der *Minimum-* und *Maximumfunktion* sowie der *Durchschnittbildung* realisiert. Anders als bei der Multi-Sample-Fusion ist jedoch bei der multialgorithmischen Fusion eine Normalisierung der Ähnlichkeitswerte nötig, da die optimalen Ähnlichkeitswerte für unterschiedliche Merkmalstypen und Parametrisierungen variieren können. Hierzu wurden die Elemente von n zu fusionierenden Ähnlichkeitsvektoren S^0 bis S^{n-1} (siehe Gleichung 6.18) wie folgt angepasst:

$$\hat{S}_j^i = \begin{cases} S_j^i \cdot 1/\mu_i & \text{falls } S_j^i \cdot 1/\mu_i \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{mit } 0 \leq i < n, 1 \leq j \leq |S^i| \quad (8.18)$$

$$\mu_i = \frac{1}{|S^i|} \cdot \sum_{j=1}^{|S^i|} S_j^i \quad (8.19)$$

Hierbei ist μ_i also das arithmetische Mittel der Elemente $S_1^i, S_2^i, S_3^i, \dots$ eines Ähnlichkeitsvektors S^i . Für die Fusion werden die solchermaßen definierten Vektoren \hat{S}^0 bis \hat{S}^{n-1} verwendet.

8.3.3 Automatische Bestimmung individueller Schwellwerte

Die in Abschnitt 8.1 beschriebenen Qualitätsgrößen Precision und Recall sowie die aus ihnen abgeleiteten Werte AUC und F_1 werden typischerweise dadurch ermittelt, dass ein System mit denselben Schwellwerteinstellungen für die Suchanfragen aller Benutzer evaluiert wird. Es wird also global für alle Benutzer der Einfluss des Ähnlichkeitsschwellwertes auf die Precision und den Recall untersucht. In Abbildung 8.9 sind die individuellen Precision- und Recallkurven als Funktionen des Ähnlichkeitsschwellwertes für 13 Schreiber der in dieser Arbeit verwendeten Handschriftdatenbank dargestellt. Wie zu erkennen ist, gibt es keinen einzelnen Schwellwert, der für die Suchanfragen aller Personen optimale Werte liefert. Stattdessen ergeben sich für jenen Schwellwert, welcher insgesamt der beste für alle 13 Personen ist (der Schnittpunkt der als gepunktete Linien dargestellten Kurven in Abbildung 8.9), für einzelne Personen individuell sehr schlechte Resultate.

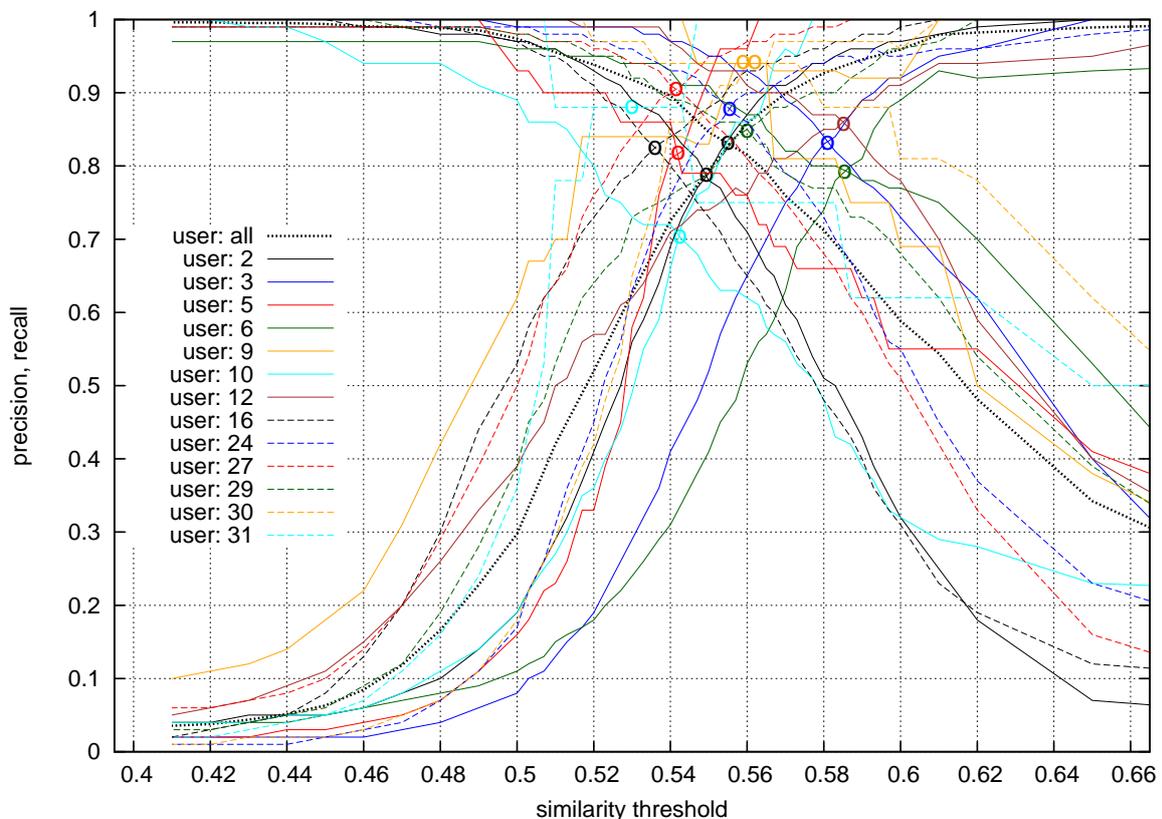


Abbildung 8.9: Precision und Recall als Funktion des Ähnlichkeitsschwellwertes, individuell für 13 Personen aus der Testdatenbasis dargestellt

Durch das Auffinden individueller optimaler Ähnlichkeitsschwellwerte könnte die Gesamtleistung des Systems verbessert werden. Für eine Dokumentdatenbank einer begrenzten Anzahl von Personen wäre es trivial, anhand von individuellen Precision-Recall-Schwellwert-Kurvenpaaren den lokalen optimalen Schwellwert manuell einzustellen. Dies setzt jedoch das Vorhandensein von entsprechendem *a priori Wissen* (Ground-Truth-Informationen) für die

Berechnung der Werte Precision und Recall voraus (siehe Abschnitt 8.2). Besser wäre es, für die Dokumente jedes einzelnen Benutzers n automatisch einen individuellen optimalen Ähnlichkeitsschwellwert $\tau_{opt}(n)$ zu ermitteln. Hierbei soll der Wert τ_{EER} als optimal betrachtet werden, der für jeden Benutzer n individuell zu bestimmen ist.

Um die Möglichkeit einer automatischen Bestimmung optimaler Ähnlichkeitsschwellwerte aus Handschriftdaten zu untersuchen, soll für jeden Benutzer der Zusammenhang dargestellt werden, der zwischen $\tau_{EER}(n)$ und beispielsweise der Entropie H der jeweiligen Merkmalszeichenketten besteht [Sha48]. Die Entropie H reduziert hierbei, verkürzt ausgedrückt, die Merkmalszeichenketten auf den mittleren Informationsgehalt pro Merkmalszeichen. Auf diese Weise wird es möglich, in einem Streudiagramm (engl. *scatter plot*), welches den Schwellwert τ_{EER} und die Entropie H jedes Benutzers als einen Punkt in der Ebene abbildet, etwaige Zusammenhänge zwischen diesen Werten zu erkennen. Die Entropie $H(s)$ einer Zeichenkette $s \in \mathbb{A}^*$ möge in der folgenden Weise definiert sein:

$$H(s) = - \sum_{i=1}^{|\mathbb{A}|} p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (8.20)$$

Hierbei sei der Wert p_i die relative Häufigkeit für das Auftreten des i -ten Elementes des Alphabetes \mathbb{A} in der Zeichenkette s :

$$p_i = \frac{1}{|s|} \sum_{j=1}^{|s|} \begin{cases} 1 & \text{falls } s_j = i, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (8.21)$$

Es sei hierbei $i \in \mathbb{A}$ dieses i -te Element von \mathbb{A} .

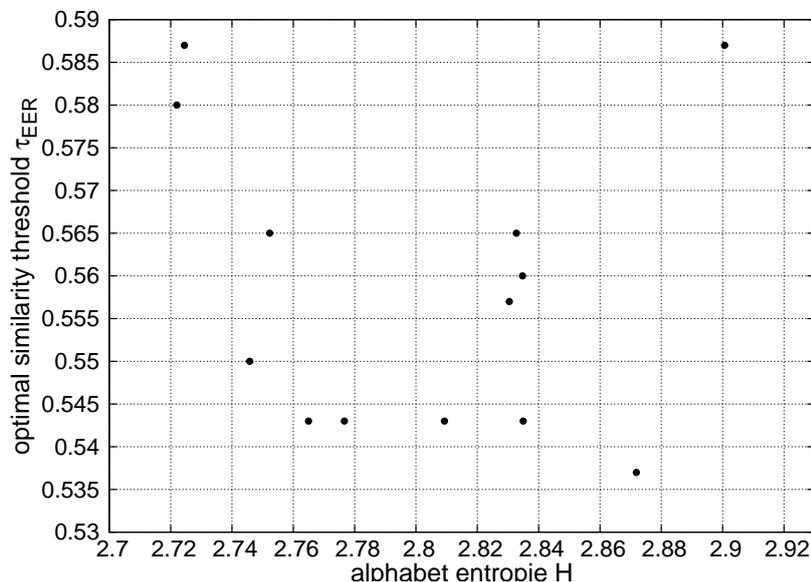


Abbildung 8.10: Zusammenhang zwischen den individuellen Ähnlichkeitsschwellwerten τ_{EER} und der Entropie der jeweiligen Merkmalszeichenketten am Beispiel der quadratischen Gitterquantisierung (Gitterweite 10)

In Abbildung 8.10 ist für die 13 Personen aus Abbildung 8.9 der Zusammenhang zwischen der Entropie der Merkmalszeichenketten ihrer jeweiligen Dokumente und dem individuellen optimalen Ähnlichkeitsschwellwert dargestellt. Aus dieser Abbildung lässt sich kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen diesen Werten ablesen, welcher für eine automatische Schwellwertoptimierung herangezogen werden kann.

Abschnitt 9.4 im folgenden Kapitel untersucht diesen möglichen Zusammenhang zwischen dem individuellen optimalen Ähnlichkeitsschwellwert und der Entropie der Merkmalssequenzen der jeweiligen Person für die weiteren Merkmalstypen sowie für diverse Parametereinstellungen.

8.4 Zusammenfassung

Nach einem generellen Überblick über die Evaluation von Retrievalsystemen und die Beschreibung von dafür typischen Messgrößen wie Precision, Recall, F_1 und AUC im ersten Abschnitt dieses Kapitels, folgte in den Abschnitten zwei und drei eine ausführliche Betrachtung der Möglichkeiten und Anforderungen der Evaluation des in dieser Arbeit entwickelten Handschriftsuchsystems. Hierbei wurde zuerst die Datenbasis beschrieben und dabei frei verfügbare Handschriftdatenbanken auf ihre Eignung für den aktuellen Zweck untersucht sowie anschließend die eigene Datenbank diskutiert. Der dritte Abschnitt behandelt die eigentliche Evaluation der verschiedenen relevanten Teile des Handschriftsuchsystems sowie der Fusionsstrategien. Außerdem wurde im dritten Abschnitt ein Ansatz zur automatisierten Bestimmung individueller Schwellwerte vorgestellt. Die Darstellung und Diskussion der bei der Evaluation erzielten Resultate findet im folgenden Kapitel statt.

9 Diskussion der Resultate

Dieses Kapitel präsentiert die Resultate, die bei der Evaluation des in dieser Arbeit entwickelten Handschriftretrievalsystems unter Verwendung der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Testdaten ermittelt wurden. Hierfür wurden die in Kapitel 5 vorgestellten Merkmalstypen mit einer Vielzahl von Parametereinstellungen untersucht.

Zunächst sollen die Resultate für die Merkmalstypen separat dargestellt und diskutiert werden. Im Anschluss daran werden die verschiedenen in Kapitel 7 diskutierten Fusionsstrategien hinsichtlich der durch sie erreichten Verbesserungen untersucht.

9.1 Resultate der Suche ohne Fusion

Dieser Abschnitt betrachtet die Ergebnisse, die für die verschiedenen Merkmalstypen bei unterschiedlichen Parametrisierungen erzielt wurden, wobei hier zunächst auf jegliche Fusionierung verzichtet wurde.

9.1.1 Quadratische Gitter

Der Merkmalstyp, basierend auf quadratischen Gittern, verfügt über einen Parameter: die Gitterweite. Die Tests dieses Merkmalstyps wurden für Gitterweiten zwischen sieben und 35 Längeneinheiten durchgeführt. Eine kleine Gitterweite korrespondiert mit langen, eine große Gitterweite mit kurzen Merkmalszeichenketten. Es wurde angenommen, dass die geometrische Gestalt einer Stifteingabe umso besser durch eine Abfolge von Gittermerkmalen angenähert werden kann, je kleiner die Gitterweite gewählt wird. Somit würde eine kleinere Gitterweite besser geeignet sein für die Suche als größere Gitterweiten. Dieser Zusammenhang zwischen der Gitterweite und der Leistungsfähigkeit des Suchsystems kann in Abbildung 9.1 tatsächlich beobachtet werden. Dargestellt sind die Precision-Recall-Kurven für quadratische Gittermerkmale bei Gitterweiten von 7, 10, 15, 20, 25, 30 und 35 Längeneinheiten, ermittelt mit dem Gerätetyp *ioPen*. Die besten Resultate stellen sich zumeist bei einer Gitterweite von 7 Längeneinheiten ein; die Precision beträgt 84,8 %, der Recall 87,0 %, woraus sich ein F_1 -Maß von 0,859 ergibt. Die Fläche unter der Precision-Recall-Kurve beträgt 0,926.

In Tabelle 9.1 sind die Daten des Diagramms aus Abbildung 9.1 zusammengefasst in Form von Precision- und Recallwerten sowie als F_1 -Maße und als *AUC* (*area under curve*). Des Weiteren findet sich hier auch die durchschnittliche Dauer für die Bearbeitung einer Suchanfrage in Millisekunden pro Dokument¹. Diese Bearbeitungszeit ist umso länger, je kleiner die Gitterweite und je länger die resultierenden Merkmalszeichenketten sind. Zusätzlich finden

¹Für die Tests wurde das Retrievalsystem in Java (1.5.0) implementiert und lief auf einem Desktop-PC mit AMD-Athlon-Prozessor (2,8 GHz) mit 1 GB Arbeitsspeicher unter dem Linux-Betriebssystem (2.6.13).

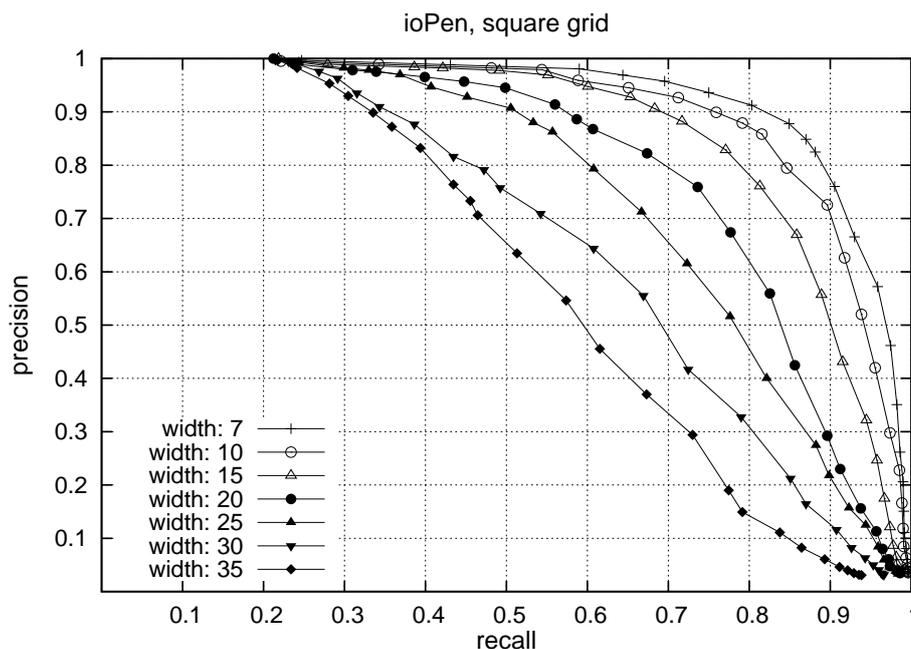


Abbildung 9.1: Precision-Recall-Diagramm für quadratische Gittermerkmale für den Gerätetyp *ioPen*

sich in dieser Tabelle die Daten für die Gerätetypen *DigiMemo* und *Notes Taker*. Eine vollständige Übersicht der Precision-Recall-Diagramme für alle Gerätetypen sowie die Daten für weitere Parametereinstellungen der Gitterweite sind in den Anhängen D.1 und E.1 zu finden.

<i>w</i>	<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>					<i>Notes Taker</i>				
	<i>P</i>	<i>R</i>	F_1	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$	<i>P</i>	<i>R</i>	F_1	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$	<i>P</i>	<i>R</i>	F_1	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$
7	84.8	87.0	0.859	0.926	576	92.0	90.8	0.914	0.974	802	72.8	75.6	0.741	0.796	544
10	82.0	83.8	0.829	0.901	295	90.3	93.5	0.918	0.976	419	74.3	72.0	0.731	0.786	268
15	76.1	81.3	0.786	0.863	140	91.3	89.3	0.902	0.965	208	70.9	71.8	0.713	0.766	127
20	75.9	73.6	0.748	0.798	84	86.5	86.3	0.864	0.938	127	68.7	68.0	0.683	0.734	76
25	71.2	66.7	0.689	0.749	59	86.5	80.5	0.834	0.926	88	65.6	63.7	0.646	0.693	51
30	64.4	60.8	0.625	0.663	44	77.5	79.5	0.785	0.881	65	64.0	59.0	0.614	0.653	39
35	54.6	57.4	0.560	0.594	34	77.3	73.8	0.755	0.844	51	54.7	60.6	0.575	0.606	30

Tabelle 9.1: Evaluationsmaße (*P* – Precision, *R* – Recall, F_1 und *AUC*) und durchschnittliche Suchdauer (Zeit (ms) pro Dokument) für quadratische Gittermerkmale in Abhängigkeit von der Gitterweite *w*

Der Zusammenhang zwischen steigenden Precision- und Recallwerten bei kleiner werdender Gitterweite ist für alle drei untersuchten Gerätetypen erkennbar. Jedoch ergeben sich zwischen den einzelnen Geräteklassen markante Unterschiede bezüglich der erreichbaren Leistungsfähigkeit. Während im besten Fall für den Gerätetyp *DigiMemo* ein F_1 -Wert von 0,918 (Precision: 90,3 %, Recall: 93,5 %) erreicht wird, beträgt der beste F_1 -Wert für die Geräte vom

Typ *Notes Taker* lediglich 0,741 (Precision: 72,8 %, Recall: 75,6 %). Ein möglicher Grund hierfür sind die unterschiedlichen Abtastgenauigkeiten der verschiedenen Geräte. Zwar besitzt der *Notes Taker* mit 1200 ppi theoretisch die höchste räumliche Auflösung, diese jedoch wird dadurch reduziert, dass nicht die Position der Stiftspitze ermittelt wird, sondern die der Ultraschallquelle im Stift; deren relative Position gegenüber der Stiftspitze als Folge von sich ändernder Stiftneigung variiert (vergleiche Abschnitt 3.3, Fußnote 10). Ein weiterer möglicher Grund für die unterschiedlichen Suchresultate der drei Gerätetypen ist die Tatsache, dass die Datenbasis nicht homogen ist; die Identität und Anzahl der Schreiber sowie die Art der Dokumente ist verschieden. Dennoch wurden in der Literatur für verwandte Suchprobleme bei Verwendung eines mit dem *DigiMemo* vergleichbaren Stiftgerätes ähnliche Precision- und Recallwerte ermittelt ([JN03], IBM *CrossPad*, Precision: 92,3 %, Recall 90 %).

9.1.2 Dreiecksgitter

Der zweite in dieser Arbeit untersuchte Merkmalstyp basiert auf Gittern, bestehend aus gleichseitigen Dreiecken. Wie im Falle der quadratischen Gitter wurde dieses Merkmal für verschiedene Parametereinstellungen der Gitterweite getestet. Erneut wurden Gitterweiten von 7 bis 35 Längeneinheiten untersucht. Abbildung 9.2 zeigt die Precision-Recall-Kurven für einige dieser Gitterweiten bei der Evaluation der Suche in Dokumenten, welche mit dem Gerätetyp *ioPen* erfasst wurden.

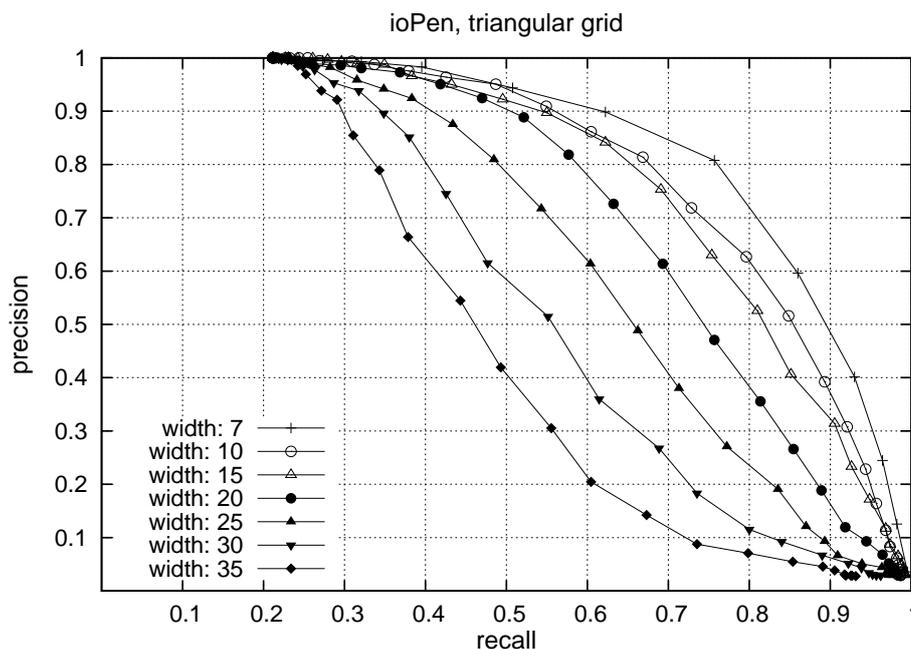


Abbildung 9.2: Precision-Recall-Diagramm für Dreiecksgittermerkmale für den Gerätetyp *ioPen*

In Tabelle 9.2 sind die zugehörigen Werte aller drei Gerätetypen dargestellt. Wie zuvor für die quadratischen Gittermerkmale ist die Leistungsfähigkeit der Suche, ausgedrückt durch den

<i>w</i>	<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>					<i>Notes Taker</i>				
	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$
7	80.8	75.7	0.781	0.846	715	89.8	91.0	0.904	0.966	1112	58.0	69.0	0.630	0.683	723
10	71.8	72.8	0.723	0.805	401	88.8	91.8	0.902	0.965	631	61.9	59.9	0.609	0.659	397
15	75.3	69.1	0.721	0.785	192	91.0	92.3	0.916	0.971	305	60.1	59.8	0.599	0.641	185
20	61.4	69.3	0.651	0.729	112	84.8	88.5	0.866	0.948	182	58.6	57.9	0.582	0.626	101
25	61.4	60.4	0.609	0.652	82	87.0	80.8	0.838	0.923	137	56.4	57.4	0.569	0.607	70
30	51.5	55.2	0.532	0.567	64	78.3	83.3	0.807	0.894	113	51.3	56.1	0.536	0.568	54
35	41.9	49.3	0.453	0.488	48	71.8	69.8	0.707	0.802	89	48.0	53.3	0.505	0.528	41

Tabelle 9.2: Evaluationsmaße (*P* – Precision, *R* – Recall, *F*₁ und *AUC*) und durchschnittliche Suchdauer für Dreiecksgittermerkmale in Abhängigkeit von der Gitterweite *w*

*F*₁-und den *AUC*-Wert, umso höher, je kleiner die Gitterweite ist. Auch ist erneut der Unterschied der Werte zwischen den drei Gerätetypen erkennbar. Die vollständigen Leistungsdaten sind in Anhang D.1, S. 147f sowie als Diagramme in Anhang E.1 zu finden.

Verglichen mit dem zuvor untersuchten Merkmalstyp basierend auf quadratischen Gittern ist die Suchqualität mit dreieckigen Gittermerkmalen geringer. Im besten Fall betragen die *F*₁-Werte 0,781 (Precision: 80,8 %, Recall: 75,7 %), 0,916 (Precision: 91,0 %, Recall: 92,3 %) und 0,63 (Precision: 58,0 %, Recall: 69,0 %) für die Gerätetypen *ioPen*, *DigiMemo* und *Notes Taker*. Ein Grund hierfür könnte in der geringeren Fähigkeit von Dreiecksgittern liegen, geometrische Formen auszudrücken, da nur sechs statt zuvor acht Richtungen unterschieden werden können.

9.1.3 Lokale Schriftrichtung

Der Merkmalstyp, basierend auf der lokalen Schriftrichtung, besitzt zwei Parameter (siehe Abschnitt 5.3). Zum einen ist dies der Abstand *w* der Abtastpunkte nach erfolgter äquidistanter Neuabtastung. Der zweite Parameter ist der Quantisierungsgrad *q* des Winkels, welcher die Schriftrichtung im jeweiligen Abtastpunkt beschreibt. Wie im Falle der beiden auf unterschiedlichen Gitterformen (Quadrat- und Dreiecksgitter) basierenden Merkmalstypen, wurden hier für die Punktweite *w* der Neuabtastung Werte zwischen 7 und 35 Längeneinheiten gewählt. Der Quantisierungsgrad *q* variierte zwischen 3 und 20. Aufgrund der Vielzahl möglicher Parameterkombinationen wurde für die in Abbildung 9.3 (links) dargestellten Tests zunächst der Quantisierungsgrad auf den Wert acht gesetzt, das heißt, es können hierbei acht voneinander verschiedene Schriftrichtungen ausgedrückt werden. Dies entspricht der Anzahl unterscheidbarer Richtungen in Quadratgittern. Wie für die gitterbasierten Merkmalstypen ist ein starker Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit des Suchsystems und der Punktweite erkennbar; je größer der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Abtastpunkten ist, umso geringer ist die Systemleistung. Die genauen Werte für *F*₁ und *AUC* bei unterschiedlichen Parametern *w* finden sich in Tabelle 9.3.

Um den Einfluss des Parameters *q* auf die Systemleistung zu untersuchen, wurden testweise die Punktweite *w* fest auf den Wert 7 gesetzt, der für die Gittermerkmale zumeist die besten Ergebnisse erbrachte. Die Ergebnisse dieser Tests sind in Abbildung 9.3 (rechts) sowie

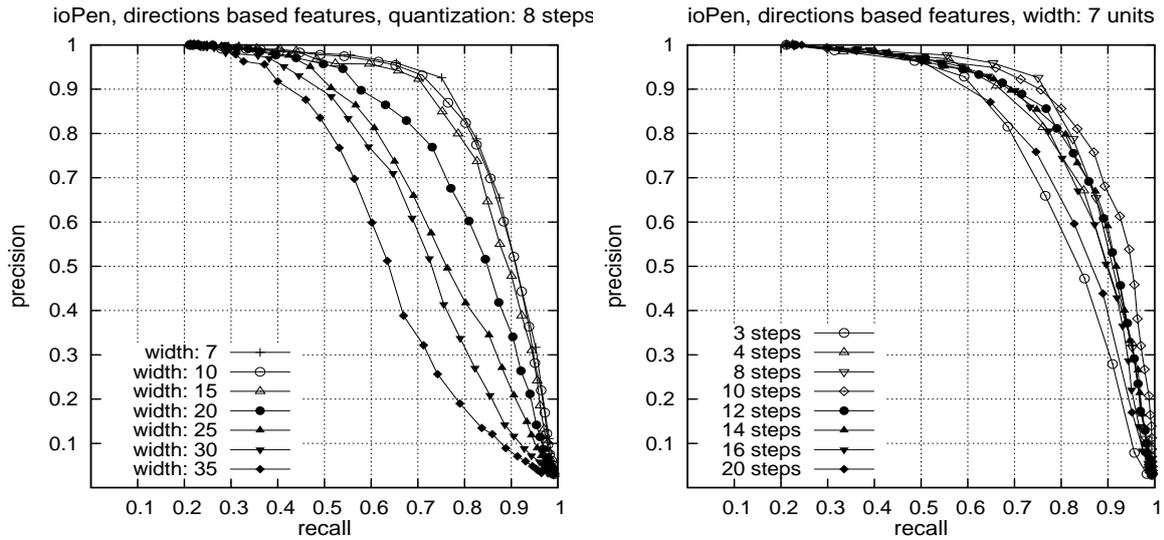


Abbildung 9.3: Precision-Recall-Diagramm für richtungsbasierte Merkmale bei Verwendung von 8 Richtungen (links) sowie bei einer Punktweite von 7 Längeneinheiten (rechts)

in Tabelle 9.4 zu sehen. Erkennbar ist, dass der F_1 -Wert hierbei ein gewisses Optimum für Werte q im Bereich von 8 bis 10 besitzt. Bezüglich der durchschnittlichen Bearbeitungszeiten der Suchanfragen lässt sich die gleiche Beobachtung machen wie zuvor im Falle der gitterbasierten Merkmale: Die Suche dauert umso länger, je geringer die Punktweite w ist. Eine Abhängigkeit zwischen der Suchdauer und dem Quantisierungsgrad q existiert jedoch nicht.

Die Testergebnisse für weitere Parameterkombinationen sind in Anhang D.1, S. 148f tabellarisch sowie in Anhang E.1 grafisch dargestellt.

<i>ioPen</i>						<i>DigiMemo</i>					<i>Notes Taker</i>				
<i>w</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	F_1	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$	<i>P</i>	<i>R</i>	F_1	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$	<i>P</i>	<i>R</i>	F_1	<i>AUC</i>	$\frac{ms}{doc}$
7	78.8	82.5	0.806	0.882	656	91.0	89.5	0.902	0.966	871	65.7	69.4	0.675	0.729	599
10	82.4	80.2	0.813	0.876	334	91.5	91.0	0.912	0.971	424	66.8	69.6	0.681	0.735	295
15	79.9	78.6	0.793	0.861	142	91.3	90.0	0.906	0.967	189	67.4	67.6	0.675	0.723	130
20	76.9	73.1	0.750	0.810	79	89.0	90.3	0.896	0.966	105	67.2	64.8	0.660	0.706	72
25	65.9	69.1	0.675	0.752	49	89.8	87.8	0.887	0.953	67	62.0	64.7	0.633	0.680	45
30	71.0	64.7	0.677	0.714	34	88.0	88.3	0.881	0.952	46	61.3	61.4	0.614	0.654	31
35	59.8	60.2	0.600	0.644	24	84.0	83.3	0.836	0.915	33	60.2	55.1	0.576	0.610	22

Tabelle 9.3: Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC sowie durchschnittliche Suchdauer) für richtungsbasierte Merkmale in Abhängigkeit von der Resamplingweite w für $q = 8$

q	<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>					<i>Notes Taker</i>				
	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$
3	65.9	76.6	0.709	0.803	663	88.0	77.5	0.824	0.922	871	63.7	59.6	0.615	0.652	599
4	81.4	76.1	0.786	0.859	662	86.5	91.5	0.889	0.952	872	60.4	60.9	0.607	0.661	615
8	78.8	82.5	0.806	0.882	656	91.0	89.5	0.902	0.966	871	65.7	69.4	0.675	0.729	601
10	81.1	83.5	0.823	0.898	658	83.5	86.0	0.847	0.931	904	66.4	68.3	0.674	0.725	600
12	81.2	79.1	0.801	0.871	663	88.3	91.0	0.896	0.964	870	65.6	68.6	0.670	0.720	599
14	79.8	80.9	0.803	0.870	661	82.3	84.3	0.832	0.924	870	66.3	63.3	0.648	0.697	602
16	80.6	77.3	0.789	0.856	753	85.0	84.5	0.847	0.929	867	63.3	62.9	0.631	0.673	596
20	75.8	74.6	0.752	0.822	651	81.8	79.0	0.804	0.895	859	54.2	64.1	0.588	0.637	595

Tabelle 9.4: Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC sowie durchschnittliche Suchdauer) für richtungsbasierte Merkmale in Abhängigkeit vom Quantisierungsgrad q der Richtungsdaten für $w = 7$

9.1.4 Lokale Schriftkrümmung

Für den Merkmalstyp der lokalen Schriftkrümmung (siehe Abschnitt 5.4) existieren die selben Parameter wie für die lokale Schriftrichtung; die Punktweite w nach erfolgter äquidistanter Neuabtastung der Bewegungssignale sowie die Anzahl q zu unterscheidender Winkelausprägungen. Wie zuvor wurden für Tests auch hier der Parameter w auf Werte zwischen 7 und 35 und der Parameter q auf Werte im Bereich von 3 bis 20 gesetzt. Die Resultate für Tests mit konstantem Quantisierungsgrad ($q = 8$) beziehungsweise einer konstanten Punktweite ($w = 10$) sind in den Diagrammen in Abbildung 9.4 sowie in den Tabellen 9.5 und 9.6 dargestellt. Ein besonderer Einfluss eines der beiden Parameter auf die Gesamtleistung des Suchsystems ist in diesen Diagrammen nicht erkennbar. Die vollständigen Ergebnisse dieses Merkmalstyps für alle drei Gerätetypen sowie weitere Parameterausprägungen finden sich in den Anhängen D.1, S. 149 und E.1.

w	<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>					<i>Notes Taker</i>				
	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$
7	43.5	38.6	0.409	0.404	664	58.3	59.8	0.590	0.650	898	29.3	30.8	0.300	0.281	614
10	45.3	39.8	0.424	0.419	349	58.5	64.3	0.612	0.661	442	26.2	31.6	0.286	0.276	302
15	38.4	41.5	0.399	0.436	145	64.8	58.5	0.615	0.689	195	29.9	30.0	0.299	0.273	135
20	42.2	40.0	0.410	0.440	80	61.5	67.8	0.645	0.709	108	29.2	29.1	0.292	0.266	74
25	38.8	44.2	0.414	0.445	50	63.0	62.5	0.627	0.687	69	28.8	28.6	0.287	0.264	46
30	43.0	39.5	0.412	0.423	34	69.0	57.0	0.624	0.722	47	27.7	27.6	0.276	0.254	32
35	40.7	39.8	0.402	0.415	24	59.0	66.0	0.623	0.685	33	26.9	27.8	0.273	0.259	23

Tabelle 9.5: Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC sowie durchschnittliche Suchdauer) für krümmungsbasierte Merkmale in Abhängigkeit von der Resamplingweite w für $q = 8$

q	<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>					<i>Notes Taker</i>				
	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$
3	60.7	31.2	0.412	0.408	324	59.8	48.0	0.532	0.641	420	22.1	30.9	0.258	0.270	288
4	29.9	43.8	0.355	0.402	318	57.0	56.8	0.569	0.636	454	29.8	28.3	0.290	0.272	313
8	45.3	39.8	0.424	0.419	320	58.5	64.3	0.612	0.661	433	26.2	31.6	0.286	0.276	319
10	33.1	42.5	0.372	0.424	341	59.8	66.3	0.628	0.680	473	24.4	33.4	0.282	0.280	359
12	37.8	41.2	0.394	0.435	362	59.5	66.3	0.627	0.693	490	36.0	29.2	0.323	0.282	325
16	43.6	40.1	0.418	0.440	341	65.0	61.8	0.633	0.709	434	34.7	31.7	0.331	0.288	294
20	44.2	42.6	0.434	0.448	316	69.5	61.0	0.650	0.736	434	36.4	31.4	0.338	0.289	298

Tabelle 9.6: Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC sowie durchschnittliche Suchdauer) für krümmungsbasierte Merkmale in Abhängigkeit vom Quantisierungsgrad q der Richtungsdaten für $w = 10$

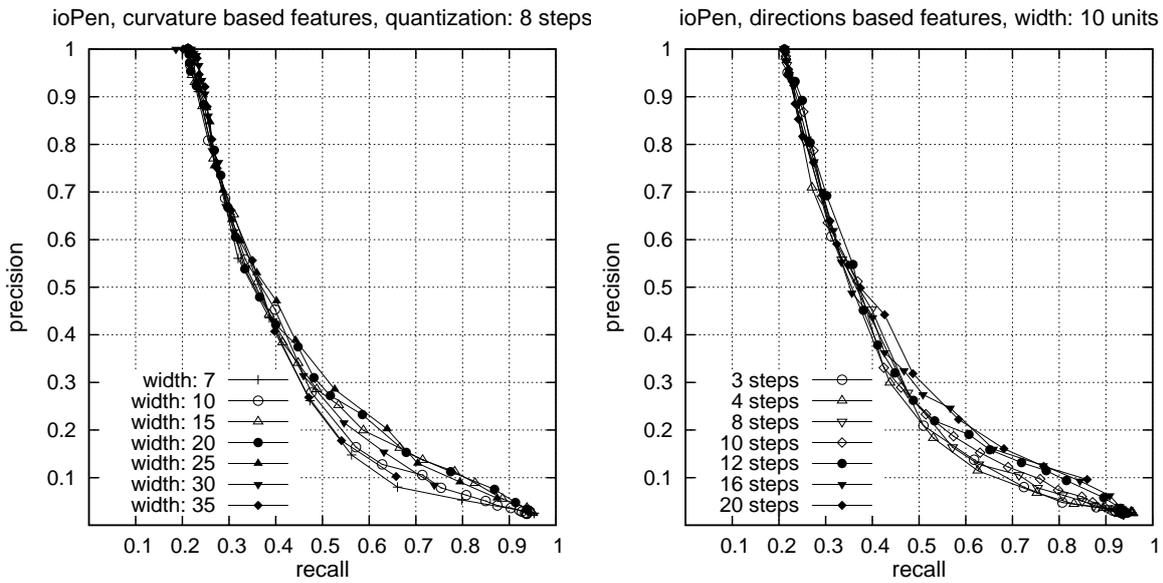


Abbildung 9.4: Precision-Recall-Diagramm für Merkmale auf Basis der Schriftkrümmung bei Verwendung von 8 Richtungen (links) sowie bei einer Punktweite von 7 Längeneinheiten (rechts)

9.1.5 Lokale Schriftnennung

Der letzte hier betrachtete Merkmalstyp basiert auf der Bestimmung der lokalen Schriftnennung als Richtung der Verbindung zweier aufeinander folgender y-Extrema der Stiftbewegung. Dieser Merkmalstyp besitzt einen einzigen Parameter, nämlich die Anzahl q zu unterscheidender Neigungswinkel, also der Grad der Quantisierung. Dieser Parameter wurde für Werte zwischen 3 und 36 untersucht. Im Unterschied zu den vier zuvor betrachteten Merkmalstypen ist in den Ergebnissen für die lokale Schriftnennung kein klarer Zusammenhang zwischen dem Parameter q und den Werten F_1 oder AUC feststellbar (siehe Anhang D.1, S. 151f sowie E.1). Dies wird besonders deutlich, wenn etwa der F_1 -Wert als Funktion des Quantisierungsgrades dargestellt wird, wie in Abbildung 9.5 geschehen. Die Unterschiede in den F_1 -Werten zwischen den drei Gerätetypen ist jedoch auch für diesen Merkmalstyp deutlich erkennbar.

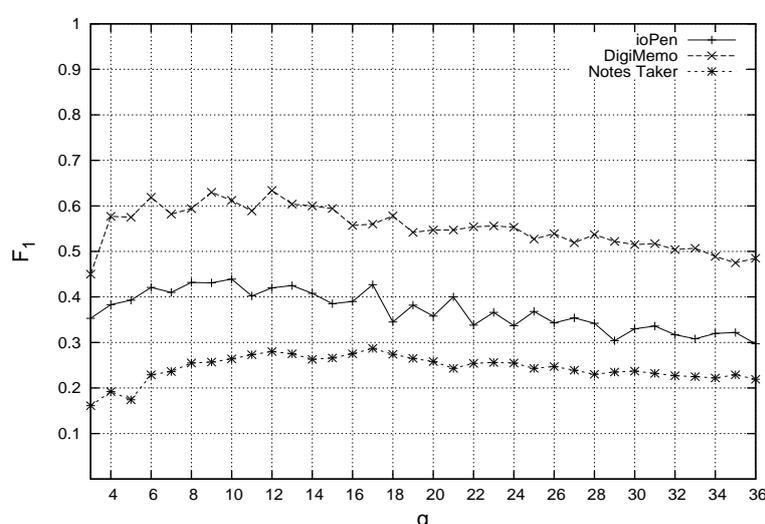


Abbildung 9.5: Qualitätsmaß F_1 als Funktion des Quantisierungsparameters q für den Merkmalstyp der lokalen Schriftnennung

q	<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>					<i>Notes Taker</i>				
	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$	P	R	F_1	AUC	$\frac{ms}{doc}$
3	37.2	33.7	0.353	0.315	6.0	46.3	43.8	0.450	0.479	4.5	22.4	21.7	0.220	0.161	3.0
10	46.2	41.8	0.439	0.442	5.8	60.5	62.0	0.612	0.648	4.5	28.4	28.4	0.284	0.264	2.9
15	36.1	41.2	0.385	0.418	5.8	57.0	62.0	0.594	0.616	4.4	28.1	28.4	0.283	0.266	2.9
20	32.8	39.5	0.358	0.397	5.7	55.0	54.5	0.547	0.576	4.4	27.9	27.4	0.277	0.258	2.9
25	38.7	35.1	0.368	0.373	5.5	53.8	51.8	0.527	0.544	4.2	27.0	25.3	0.261	0.243	2.7
35	33.9	30.7	0.322	0.328	5.5	50.5	44.8	0.475	0.469	4.2	27.9	23.7	0.256	0.229	3.0

Tabelle 9.7: Evaluationsmaße (P – Precision, R – Recall, F_1 und AUC) und durchschnittliche Suchdauer (Zeit (ms) pro Dokument) für den Merkmalstyp der lokalen Schriftnennung in Abhängigkeit vom Grad q der Quantisierung

9.2 Resultate für Multi-Sample-Fusion

Nach der Darstellung der fusionslosen Ergebnisse im vorigen Abschnitt folgen hier die Resultate für die Multi-Sample-Fusion auf der Vergleichs- und auf der Entscheidungsebene.

9.2.1 Fusion auf Vergleichsebene

Bei der Multi-Sample-Fusion auf der Vergleichsebene kommen zu den durch den jeweiligen Merkmalstyp vorgegebenen Parametern zwei weitere Parameter hinzu: die Anzahl n der zu wiederholenden Suchanfragen mit den besten Treffern der Ausgangssuchanfrage sowie die Art der Kombination der Vergleichswerte (Minimum, Durchschnitt, Maximum). Abbildung 9.6 stellt beispielhaft die Precision-Recall-Kurven für den Merkmalstyp der Quadratgitter bei unterschiedlichen Gitterweiten für die drei Kombinationsfunktionen dar. Als Parameter n wurden hierbei die Werte 1 (grün), 2 (türkis) und 3 (rot) gewählt. Hierbei wurden die Resultate in diesen Diagrammen für den Gerätetyp *ioPen* bestimmt. Die Resultate der anderen Gerätetypen sowie detaillierte Ergebnisse für weitere Parametrisierungen aller anderen Merkmalstypen finden sich in den Anhängen D.2.1 und E.2.1.

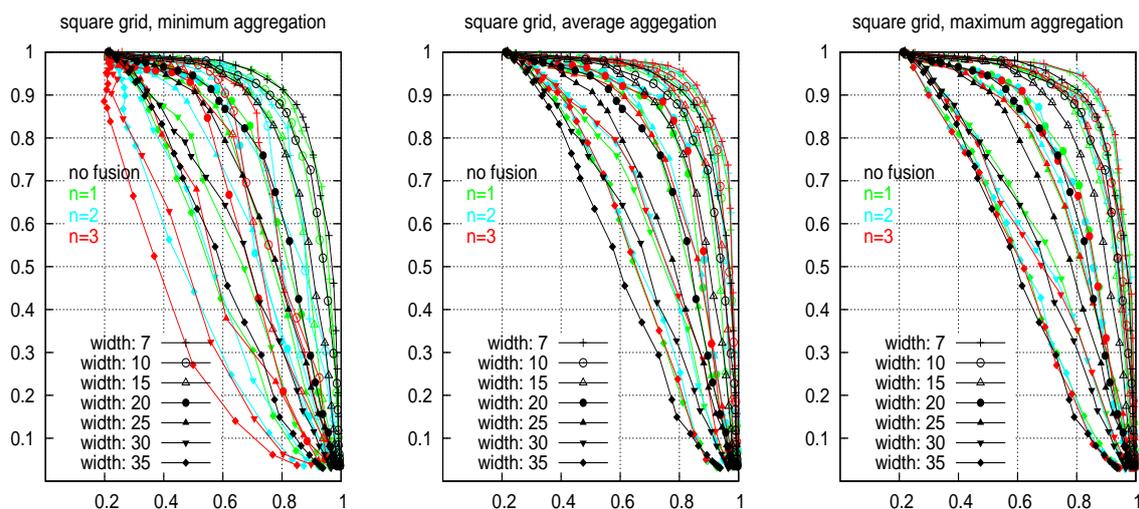


Abbildung 9.6: Precision-Recall-Diagramm für quadratische Gittermerkmale für den Gerätetyp *ioPen* bei Multi-Sample-Fusion auf Vergleichsebene

Bei Verwendung der *Minimumfunktion* zur Fusionierung der Vergleichswerte (linkes Diagramm in Abbildung 9.6) stellt sich in fast allen Fällen eine Verschlechterung der Resultate ein, verglichen mit dem fusionslosen System (in den Diagrammen als schwarze Kurven dargestellt). Die Verbesserungen durch eine Fusion mittels *Durchschnitts-* und *Maximumfunktion* sind hingegen klar erkennbar. Genaue Angaben über den Grad an Verbesserung finden sich in der folgenden Tabelle.

		<i>average</i>						<i>maximum</i>					
		<i>ioPen</i>		<i>DigiMemo</i>		<i>Notes Taker</i>		<i>ioPen</i>		<i>DigiMemo</i>		<i>Notes Taker</i>	
<i>w</i>	<i>n</i>	F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1
7	0	0.859		0.914		0.741		0.859		0.914		0.741	
	1	0.878	+0.019	0.934	+0.020	0.766	+0.025	0.879	+0.020	0.931	+0.017	0.762	+0.021
	2	0.887	+0.028	0.939	+0.025	0.778	+0.037	0.881	+0.022	0.946	+0.032	0.763	+0.022
	3	0.885	+0.027	0.936	+0.022	0.786	+0.045	0.880	+0.021	0.944	+0.030	0.761	+0.020
10	0	0.829		0.918		0.731		0.829		0.918		0.731	
	1	0.861	+0.032	0.938	+0.020	0.762	+0.031	0.853	+0.024	0.934	+0.016	0.752	+0.021
	2	0.864	+0.035	0.944	+0.026	0.776	+0.045	0.855	+0.026	0.945	+0.027	0.755	+0.024
	3	0.871	+0.042	0.950	+0.032	0.783	+0.052	0.855	+0.026	0.942	+0.024	0.749	+0.018
15	0	0.786		0.902		0.713		0.786		0.902		0.713	
	1	0.832	+0.046	0.922	+0.020	0.740	+0.027	0.811	+0.025	0.918	+0.016	0.733	+0.020
	2	0.833	+0.047	0.926	+0.024	0.757	+0.044	0.831	+0.045	0.930	+0.028	0.735	+0.022
	3	0.838	+0.052	0.939	+0.037	0.771	+0.058	0.832	+0.046	0.939	+0.037	0.733	+0.020
20	0	0.748		0.864		0.683		0.748		0.864		0.683	
	1	0.795	+0.047	0.899	+0.035	0.714	+0.031	0.761	+0.013	0.887	+0.023	0.697	+0.014
	2	0.803	+0.055	0.930	+0.066	0.739	+0.056	0.746	-0.002	0.895	+0.031	0.705	+0.022
	3	0.809	+0.061	0.936	+0.072	0.747	+0.064	0.742	-0.006	0.896	+0.032	0.699	+0.016
25	0	0.689		0.834		0.646		0.689		0.834		0.646	
	1	0.752	+0.063	0.890	+0.056	0.682	+0.036	0.714	+0.025	0.875	+0.041	0.668	+0.022
	2	0.759	+0.070	0.910	+0.076	0.702	+0.056	0.722	+0.033	0.881	+0.047	0.666	+0.020
	3	0.751	+0.062	0.916	+0.082	0.710	+0.064	0.719	+0.030	0.884	+0.050	0.661	+0.015
30	0	0.625		0.785		0.614		0.625		0.785		0.614	
	1	0.663	+0.038	0.832	+0.047	0.660	+0.046	0.625	± 0.000	0.821	+0.036	0.640	+0.026
	2	0.682	+0.057	0.852	+0.067	0.684	+0.070	0.602	-0.023	0.822	+0.037	0.643	+0.029
	3	0.658	+0.033	0.853	+0.068	0.698	+0.084	0.595	-0.030	0.808	+0.023	0.631	+0.027
35	0	0.560		0.755		0.575		0.560		0.755		0.575	
	1	0.603	+0.043	0.803	+0.048	0.630	+0.055	0.569	+0.009	0.792	+0.037	0.598	+0.023
	2	0.609	+0.049	0.821	+0.066	0.646	+0.071	0.582	+0.022	0.797	+0.042	0.599	+0.024
	3	0.610	+0.050	0.825	+0.070	0.659	+0.084	0.568	+0.008	0.794	+0.039	0.589	+0.014

Tabelle 9.8: F_1 -Werte für quadratische Gittermerkmale bei Multi-Sample-Fusion auf Vergleichsebene sowie die Unterschiede zu den F_1 -Werten für das System ohne Fusion ($n = 0$)

Die Tabelle 9.8 zeigt, dass die Fusionen in fast allen Fällen zu Verbesserungen des F_1 -Wertes führen und diese Verbesserungen in Einzelfällen bis zu 0.084 ($\equiv 8,4\%$) betragen. Ein Vergleich der Fusionsfunktionen ergibt, dass die Durchschnittsfunktion zumeist bessere Resultate liefert als die Maximumfunktion. Die Unterschiede in den Ergebnissen für eine Fusionierung von verschieden vielen Suchiterationen (Parameter n) sind nur marginal, jedoch liefern höhere Werte für n im Allgemeinen geringfügig bessere Ergebnisse. Damit ergeben

sich beispielsweise bei Verwendung quadratischer Gittermerkmale (siehe Anhang D.2.1, S. 152f) in den optimalen Fällen für die Geräteklassen *ioPen*, *DigiMemo* und *Notes Taker* F_1 -Werte von 0,887 (Precision: 88,7 %, Recall: 88,6 %), 0,95 (Precision: 95,8 %, Recall: 94,3 %) beziehungsweise 0,786 (Precision: 77,6 %, Recall: 79,7 %).

Auch die Diagramme und Tabellen für die restlichen Merkmalstypen in Anhang E.2.1 beziehungsweise E.2.1 zeigen Verbesserungen der Leistungsfähigkeit bei Verwendung der Maximum- und der Durchschnittsfunktion für eine Multi-Sample-Fusion auf der Vergleichsebene. Die Minimumfunktion führt jedoch zumeist zu einer Verschlechterung der F_1 -Werte und ist somit für diese Art der Fusionierung nicht geeignet.

9.2.2 Fusion auf Entscheidungsebene

Die Multi-Sample-Fusion auf der Entscheidungsebene besitzt gegenüber den fusionslosen Systemen einen weiteren Parameter n , zusätzlich zu denen des jeweiligen Merkmalstyps. Der Wert n steht hier, wie schon im Falle der Multi-Sample-Fusion auf Vergleichsebene, für die Anzahl der Suchiterationen mit den n besten Treffern aus der ursprünglichen Treffermenge. In diesem Abschnitt sollen lediglich die markantesten Resultate für diese Art der Fusion präsentiert werden. Eine vollständige Übersicht aller ermittelten Ergebnisse findet sich in den Anhängen D.2.2 und E.2.2.

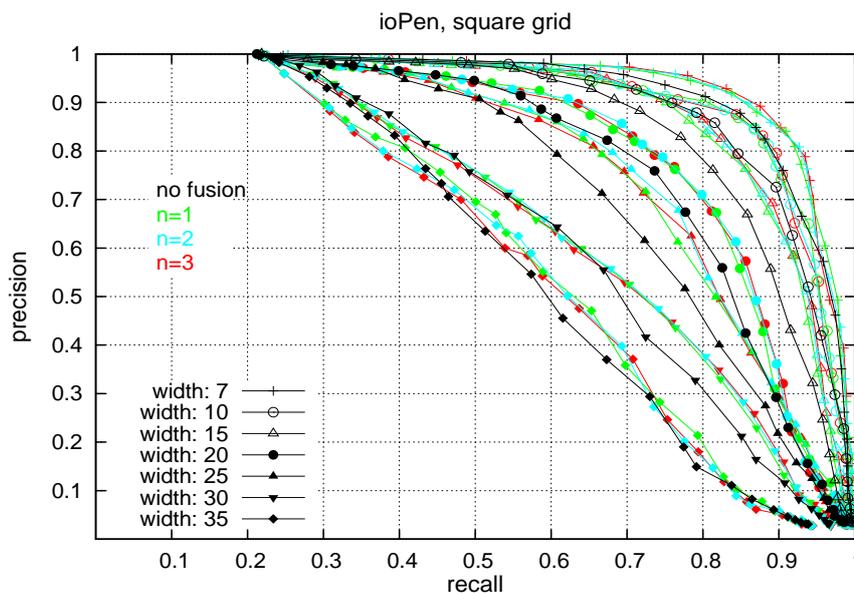


Abbildung 9.7: Precision-Recall-Diagramm für quadratische Gittermerkmale für den Gerätetyp *ioPen* bei Multi-Sample-Fusion auf Entscheidungsebene

In Abbildung 9.7 sind die Precision-Recall-Kurven für den Merkmalstyp der quadratischen Gitter bei Verwendung unterschiedlicher Gitterweiten für den Gerätetyp *ioPen* dargestellt. Die Daten entsprechen denen in Abbildung 9.1, mit dem Unterschied, dass zusätzlich zu den

9 Diskussion der Resultate

schwarz dargestellten fusionslosen Resultaten die Kurven für die Fusion auf der Entscheidungsebene in den Farben grün, türkis und rot für die Werte $n = 1, 2$ und 3 zu sehen sind.

Wie in Tabelle 9.9 zu sehen ist, beträgt die Verbesserung des F_1 -Wertes für das Beispiel des Merkmalstyps quadratischer Gitter infolge der Fusion bis zu 0.048 ($\equiv 4.8\%$), wodurch ein F_1 -Wert von 0,882 (Precision: 88,8 %, Recall: 87,8 %) erreicht wird. Durch die Multi-Sample-Fusion auf der Entscheidungsebene lässt sich im besten Fall (für den Gerätetyp *DigiMemo*) ein F_1 -Wert von 0,947 (Precision: 95,3 %, Recall: 94,3 %) erreichen.

w	n	<i>ioPen</i>		<i>DigiMemo</i>		<i>Notes Taker</i>	
		F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1
7	0	0.859		0.914		0.741	
	1	0.875	+0.016	0.936	+0.022	0.757	+0.016
	2	0.874	+0.015	0.947	+0.033	0.758	+0.017
	3	0.884	+0.025	0.942	+0.028	0.754	+0.013
10	0	0.829		0.918		0.731	
	1	0.859	+0.030	0.915	-0.003	0.748	+0.017
	2	0.856	+0.027	0.939	+0.021	0.746	+0.015
	3	0.860	+0.031	0.941	+0.023	0.743	+0.012
15	0	0.786		0.902		0.713	
	1	0.819	+0.033	0.916	+0.014	0.727	+0.014
	2	0.822	+0.036	0.947	+0.045	0.728	+0.015
	3	0.824	+0.038	0.937	+0.035	0.724	+0.011
20	0	0.748		0.864		0.683	
	1	0.763	+0.015	0.887	+0.023	0.695	+0.012
	2	0.767	+0.019	0.896	+0.032	0.694	+0.011
	3	0.765	+0.017	0.896	+0.022	0.687	+0.004
25	0	0.689		0.834		0.646	
	1	0.720	+0.031	0.872	+0.038	0.660	+0.014
	2	0.733	+0.044	0.876	+0.042	0.660	+0.014
	3	0.717	+0.028	0.882	+0.048	0.653	+0.007
30	0	0.625		0.785		0.614	
	1	0.619	-0.006	0.785	± 0.000	0.631	+0.016
	2	0.617	+0.009	0.821	+0.036	0.629	+0.015
	3	0.620	+0.005	0.785	± 0.000	0.624	+0.010
35	0	0.560		0.755		0.575	
	1	0.570	+0.010	0.798	+0.043	0.594	+0.019
	2	0.581	+0.021	0.786	+0.031	0.585	+0.010
	3	0.577	+0.017	0.786	+0.031	0.581	+0.006

Tabelle 9.9: F_1 -Werte für quadratische Gittermerkmale bei Multi-Sample-Fusion auf Entscheidungsebene

Ähnliche Verbesserungen des F_1 -Wertes sind auch für die verbleibenden Merkmalstypen möglich, wie dies den Anhängen D.2.1 und E.2.1 deutlich wird. Festzustellen ist hierbei jedoch, dass die Verbesserung der Leistungsfähigkeit bei Werten für $n > 1$ nur in wenigen Fällen

wirklich signifikant ist; während in einigen Fällen ein höherer Wert für n auch zu einer Verschlechterung des F_1 -Wertes und damit der Leistungsfähigkeit des Systems führen kann.

Im Vergleich der Verbesserungen durch eine Fusion bereits auf der Vergleichs- anstatt der Entscheidungsebene schneidet letztere geringfügig schlechter ab, wie man leicht anhand der Tabellen 9.8 und 9.9 sehen kann.

9.3 Resultate für multialgorithmische Fusion

In diesem Abschnitt finden sich die Ergebnisse der Evaluation der multialgorithmischen Fusion auf der Merkmals-, der Vergleichs- und der Entscheidungsebene.

9.3.1 Fusion auf Merkmalsebene

Für die multialgorithmische Fusion auf der Ebene der Merkmale kommen in dieser Arbeit, wie in den Abschnitten 7.2.2 und 8.3.2 diskutiert, nur die Merkmalstypen auf Basis der *lokalen Schriftrichtung* und *-krümmung* in Frage. Für die Fusion ergeben sich somit drei unterschiedliche Parameter; die Punktweite w nach erfolgter äquidistanter Neuabtastung der Stiftdaten sowie die Grade q_{dir} und q_{curv} der Quantisierung der Winkelinformationen beider Merkmale.

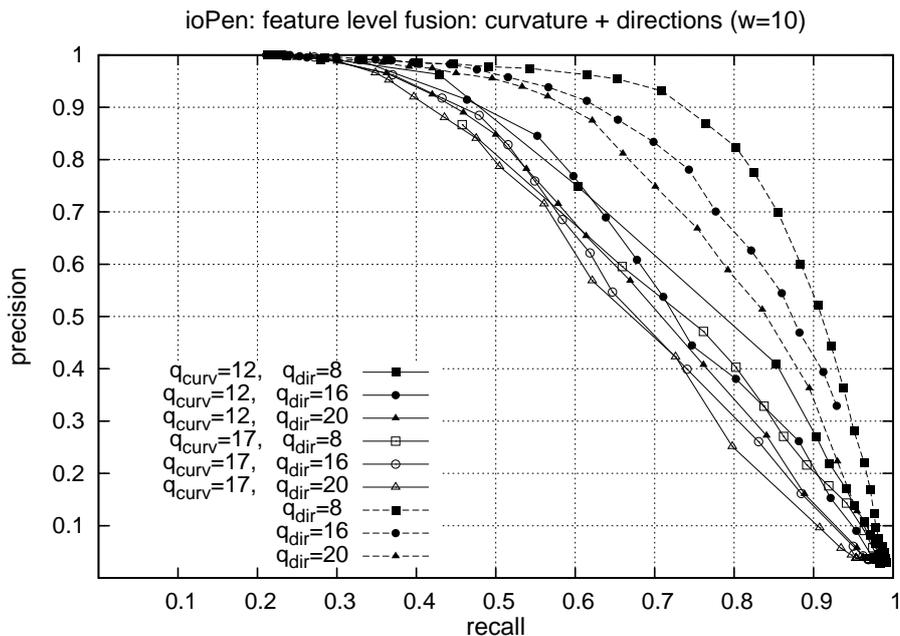


Abbildung 9.8: Precision-Recall-Diagramm für die multialgorithmische Fusion von Schriftrichtungs- und -krümmungsmerkmalen auf der Merkmalsebene sowie fusionslose Verwendung von Schriftrichtungsmerkmalen für den Gerätetyp *ioPen* ($w = 10$)

Aus der Vielzahl möglicher Parameterkombinationen wurden aufgrund des insgesamt hohen Zeitaufwandes für die Testläufe einige wenige ausgewählt. Der Parameter w wurde für

die Werte 7, 10, 20 und 35, der Parameter q_{dir} für die Werte 8, 16 und 20, der Parameter q_{curv} für die Werte 12 und 17 untersucht (siehe Anhang D.3.1 und E.3.1). In Abbildung 9.8 sind die Precision-Recall-Kurven bei Verwendung von $w = 10$ dargestellt. Zusätzlich sind in diesem Diagramm zum Vergleich die Precision-Recall-Kurven für den Merkmalstyp der lokalen Schriftrichtung, also ohne Fusion, bei Verwendung der selben Parametrisierung für w und q dargestellt (gestrichelte Kurven). Es ist leicht erkennbar, dass die durch die Fusion erreichten Resultate unter denen des fusionslosen Systems liegen. Ein Grund hierfür könnte sein, dass einer der beiden verwendeten Merkmalstypen, nämlich die lokale Schriftrichtung, bereits im fusionslosen Szenario sehr schlechte Resultate lieferte und sich diese schlechten Resultate die besseren Resultate der lokalen Schriftrichtung negativ beeinflussten.

9.3.2 Fusion auf Vergleichsebene

Eine multialgorithmische Fusion auf der Vergleichsebene kann, wie in den Abschnitten 7.2.2 und 8.3.2 beschrieben, ebenfalls nur für die Merkmalstypen auf Basis der lokalen Schriftrichtung und -krümmung durchgeführt werden. Analog zur Fusion auf Merkmalsebene (siehe Abschnitt 9.3.1) ergeben sich damit die Parameter w , q_{dir} und q_{curv} der Punktweite nach Neuabtastung und die Quantierungsgrade der beiden Merkmalstypen. Ein zusätzlicher Parameter betrifft die Fusionsfunktion: *Minimum*, *Maximum* und *Durchschnittsbildung*.

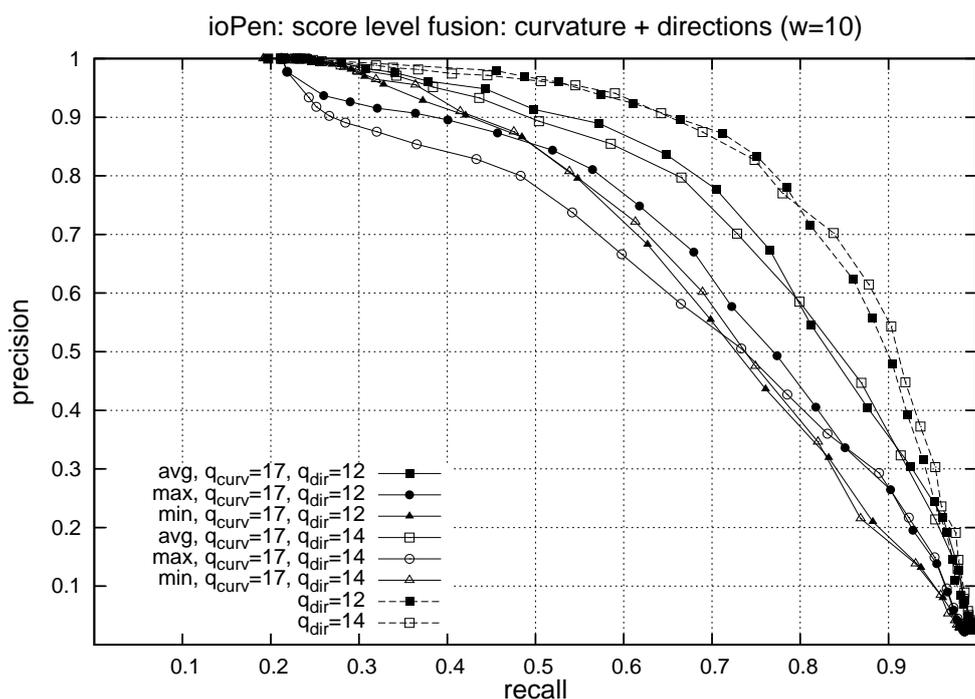


Abbildung 9.9: Precision-Recall-Diagramm für die multialgorithmische Fusion von Schriftrichtungs- und -krümmungsmerkmalen auf der Vergleichsebene sowie fusionslose Verwendung von Schriftrichtungsmerkmalen für den Gerätetyp *ioPen* ($w = 10$)

Der Parameter w wurde für die Testläufe auf die Werte 7, 10, 20 und 35 gesetzt; der Parameter q_{curv} betrug konstant 17 und für q_{dir} wurden die Werte 12 und 14 verwendet. Für die Fusion kamen alle drei Funktionen *Minimum*, *Maximum* und *Durchschnittsbildung* zum Einsatz. In Abbildung 9.9 sind die entsprechenden Precision-Recall-Kurven zu sehen, sowie zum Vergleich die Kurven für den Merkmalstyp der Schriftrichtung ohne Fusion. Wie im vorangegangenen Abschnitt über die Fusion auf Merkmalsebene führt auch hier die Fusion zu keiner Verbesserung gegenüber der fusionslosen Suche in Handschriftdaten. Da für die multialgorithmische Fusion auf der Vergleichsebene, wie auch auf der Merkmalsebene, ausschließlich die Merkmalstypen der lokalen Schriftrichtung und -krümmung in Frage kommen, kann vermutet werden, dass die Gründe für die schlechten Resultate dieselben sind wie im Abschnitt zuvor für die Fusion auf der Merkmalsebene.

Analog zur Multi-Sample-Fusion auf der Vergleichsebene ist auch hier zu beobachten, dass zumeist die Fusionierung mittels Durchschnittsbildung zu besseren Ergebnissen führt als die Minimum- oder Maximumfunktion. Zwischen den beiden letzteren Funktionen gibt es jedoch keine klar Bessere, wie beispielsweise in Abbildung 9.9 oder in Anhang D.3.2 erkennbar ist.

9.3.3 Fusion auf Entscheidungsebene

Im Gegensatz zur multialgorithmischen Fusion auf Merkmals- und Vergleichsebene können auf der Entscheidungsebene diverse Einzelsysteme, unabhängig von ihrem Merkmalstyp und ihrer jeweiligen Parametrisierung, miteinander fusioniert werden. Anders als die bisher betrachteten Fusionsstrategien existiert für die multialgorithmische Fusion auf der Entscheidungsebene jedoch kein einzelner Ähnlichkeitsschwellwert, in dessen Abhängigkeit die Precision und der Recall bestimmt werden kann. Stattdessen existiert für jedes in die Fusion einbezogene Einzelsystem ein eigener Schwellwert. Dies führt dazu, dass für ein solchermaßen fusioniertes Gesamtsystem keine Precision-Recall-Kurve angegeben werden kann, wie dies in Abschnitt 8.3.2 diskutiert und anhand der Abbildungen 8.7 und 8.8 illustriert wurde.

	<i>ioPen</i>		<i>DigiMemo</i>		<i>Notes Taker</i>	
	F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1	F_1	ΔF_1
Quadratgitter ($w_{g_{\square}} = 7$)	0.859		0.914		0.741	
Quadratgitter ($w_{g_{\square}} = 7$) \cup Dreiecksgitter ($w_{g_{\Delta}} = 7$)	0.871	+0.012	0.928	+0.014	0.758	+0.017
Quadratgitter ($w_{g_{\square}} = 7$) \cup Schriftrichtung ($w = 7, q = 12$)	0.876	+0.017	0.930	+0.016	0.763	+0.022
Quadratgitter ($w_{g_{\square}} = 7$) \cup Schriftkrümmung ($w = 7, q = 14$)	0.859	± 0.000	0.922	+0.008	0.730	-0.011
Quadratgitter ($w_{g_{\square}} = 7$) \cup Schriftneigung ($q = 17$)	0.864	+0.005	0.922	+0.008	0.751	+0.010

Tabelle 9.10: F_1 -Werte für die multialgorithmische Fusion auf der Entscheidungsebene sowie Differenzen gegenüber unfusionierten Quadratgittermerkmalen

Für die Testläufe wurde der beste einzelne Merkmalstyp (jener auf Basis quadratischer Gitter) nacheinander mit den anderen Merkmalstypen fusioniert. Dabei wurden die Treffermengen der Einzelsuchanfragen der unterschiedlichen Merkmalstypen sowohl mittels *Mengenschnitt* (\cap) als auch mittels *Mengenvereinigung* (\cup) kombiniert. Die Ergebnisse dieser Tests finden sich in Anhang D.3.3 und in den Diagrammen in Anhang E.3.3. Tabelle 9.10 fasst die wichtigsten Daten dieser Tests zusammen. Konkret sind in dieser Tabelle die F_1 -Werte der Fusion mittels Mengenvereinigung (\cup) sowie die Verbesserungen dieser F_1 -Werte im Vergleich zu jenen des besten Einzelsystems (Quadratgittermerkmale mit $w_g = 7$) dargestellt. Es ist eine Verbesserung von bis zu 2,2 % erkennbar für eine Fusion von Quadratgitter- und Schriftrichtungsmerkmalen bei Verwendung des Gerätetyps *Notes Taker*.

9.4 Versuch der automatischen Bestimmung individueller Schwellwerte

Wie in Abschnitt 8.3.3 des vorigen Kapitels beschrieben, soll im Rahmen der Evaluierung des in dieser Arbeit entwickelten Suchsystems für Handschriftdaten auch der Versuch unternommen werden, automatisch die optimalen individuellen Ähnlichkeitsschwellwerte für die verschiedenen Schreiber zu bestimmen. Hierzu wird untersucht, inwieweit ein Zusammenhang zwischen der Entropie der Merkmalssequenzen und dem als optimal angenommenen Schwellwert τ_{EER} existiert. Der Schwellwert τ_{EER} eines Schreibers ist dadurch definiert, dass bei dieser Einstellung die Precision und der Recall für diesen Schreiber den selben Wert annehmen.

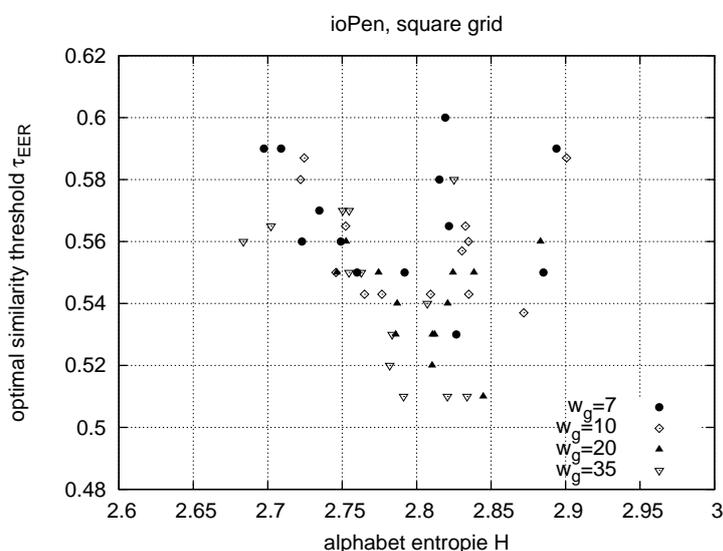


Abbildung 9.10: τ_{EER} -Entropie-Streudiagramm für Quadratgittermerkmale mit $w_g = 7, 10, 20, 30$

In Abbildung 9.10 sind in einem τ_{EER} -Entropie-Diagramm die Werte für Quadratgittermerkmale bei Berücksichtigung der Geräteklasse *ioPen* als Streudiagramm (engl. *scatter plot*)

dargestellt. Zu erkennen sind die verschiedenen Parametereinstellungen der Gitterweite $w_g = 7, 10, 20, 35$ (dargestellt durch verschiedene Punktsymbole). Pro Gitterweite entspricht jedes Symbol einer Person. Wie in diesem Diagramm erkennbar ist, besteht kein offensichtlicher Zusammenhang (etwa in Form einer direkten oder indirekten Proportionalität) zwischen der Entropie H und dem optimalen Schwellwert, welcher eine automatische Bestimmung $H \rightarrow \tau_{EE}$ ermöglichen würde.

In Anhang G sind die entsprechenden Diagramme für die Geräteklassen *ioPen*, *DigiMemo* und *Notes Taker* bei Verwendung der Merkmalstypen *Quadrat*- und *Dreiecksgitter* sowie der *lokalen Schriftrichtung* und *-krümmung*, jeweils für verschiedene Parametereinstellungen, dargestellt. Auch in diesen Diagrammen findet sich kein Hinweis auf eine Möglichkeit, die individuellen Werte τ_{EE} automatisiert mittels der Entropie zu bestimmen. Somit scheint der Versuch einer automatischen individuellen Schwellwertbestimmung auf diese Weise gescheitert zu sein.

9.5 Resultate verwandter Suchverfahren

Ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren und Systeme aus der Literatur im Bereich der Handschriftsuche ist mit dem Problem konfrontiert, dass keine allgemein akzeptierte und verbreitete Testbasis für die Evaluation der Systeme existiert. Daneben sind die konkreten Implementierungen der anderen Forscher nicht öffentlich verfügbar. Ein drittes Problem stellt die zum Teil unzureichende Veröffentlichung der vollständigen Testresultate in der Literatur dar. In diesem Abschnitt wird dennoch versucht, die wenigen verwandten Resultate in einheitlicher Art und Weise zu präsentieren, um einen Vergleich mit den eigenen Resultaten aus den vorangegangenen Abschnitten zu ermöglichen.

Lopresti und *Tomkins* geben in [LT94] die Werte Precision und Recall ihres *ScriptSearch*-Verfahrens (siehe 2.1.2) für verschiedene Schwellwertausprägungen an, woraus der F_1 - und der *AUC*-Wert sowie die Precision-Recall-Kurve bestimmt werden können. Siehe hierzu Tabelle 9.11 und Abbildung 9.11 (gepunktete Kurve).

Jain und *Namboodiri* stellen in [JN03] die Resultate ihres *Word-Spotting*-Systems denen von *Lopresti* und *Tomkins* gegenüber, indem sie ein Precision-Recall-Diagramm präsentieren, welches auch in Abbildung 9.12 zu sehen ist. Zusätzlich geben sie für ihr eigenes System den Mittelwert der Precision aller Schreiber mit 92,3 % bei einem Recall von 90 % an. Aus dem in [JN03] präsentierten Diagramm (siehe Abbildung 9.12) lassen sich die Werte der einzelnen Schreiber nicht sinnvoll bestimmen, sodass hier für das Verfahren von *Jain* und *Namboodiri* auf eine »echte« Precision-Recall-Kurve in Abbildung 9.11 verzichtet werden muss. Stattdessen wird ihr Verfahren in Abbildung 9.11 nur als singulärer Punkt dargestellt.

Im Falle des Suchverfahrens mittels Texterkennung von *Perrone et al.* [PRZ02, RPCZ02] ist die Situation eine ähnliche wie bei *Jain* und *Namboodiri*. Auch hier sind die Resultate nur in grafischer Form präsentiert worden, sodass eine direkte Übernahme ihrer Ergebnisse für einen Vergleich schwerfällt. Aus den Diagrammen in [PRZ02] lassen sich jedoch Resultate von etwa 70% sowie 90% (abhängig von der Länge der Suchanfragen) für die Precision und den Recall abschätzen, welche ebenfalls jeweils in Form eines Punktes anstatt einer Kurve in Abbildung 9.11 erscheinen.

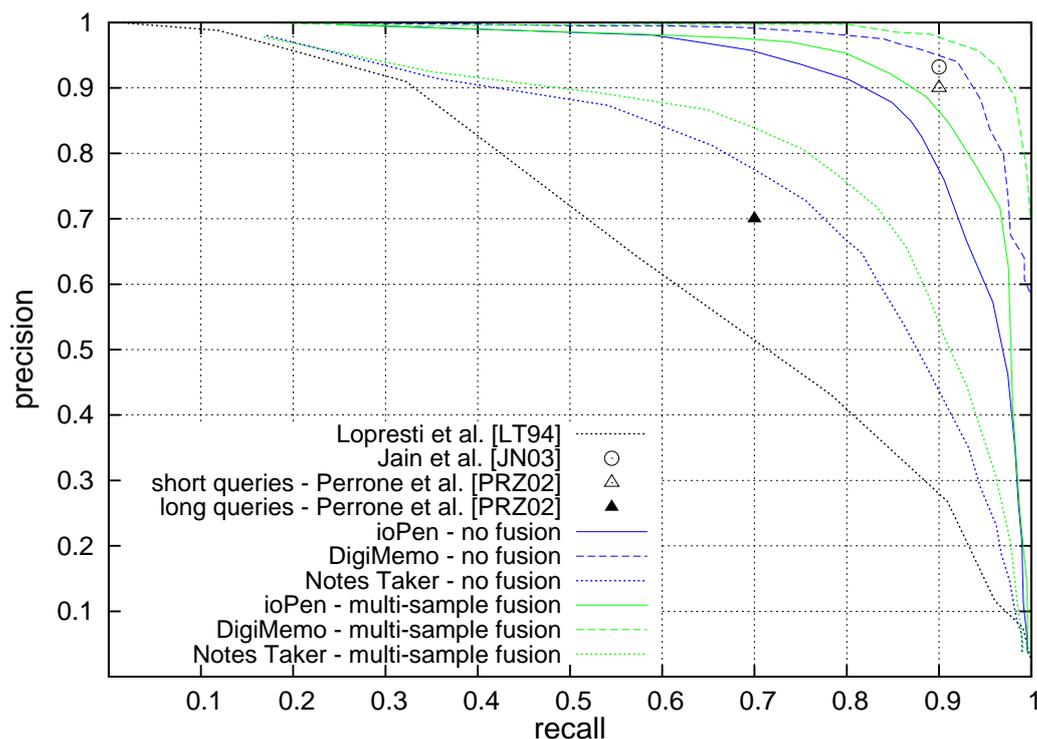


Abbildung 9.11: Vergleich verschiedener Suchverfahren hinsichtlich ihrer Precision- und Recallwerte

Description	Precision	Recall	F_1	AUC
Lopresti et al. [LT94]	57,2%	64,3%	0,605	0,676
Jain et al. [JN03]	92,3%	90,0%	0,911	— ²
Perrone et al. [PRZ02] (Einzelwortanfragen)	≈ 70%	≈ 70%	≈ 0,7	—
Perrone et al. [PRZ02] (längere Anfragen)	≈ 90%	≈ 90%	≈ 0,9	—
ioPen, (<i>Quadratgitter</i> , $w_g = 7$)	84,8%	87,0%	0,859	0,926
DigiMemo, (<i>Quadratgitter</i> , $w_g = 8$)	94,0%	92,0%	0,930	0,976
NotesTaker, (<i>Quadratgitter</i> , $w_g = 7$)	72,8%	75,6%	0,741	0,796
ioPen, (<i>Quadratgitter</i> , $w_g = 7$, <i>multi-sample fusion</i> , $n = 2$, <i>scorelevel</i>)	88,7%	88,6%	0,887	0,947
DigiMemo, (<i>Quadratgitter</i> , $w_g = 10$, <i>multi-sample fusion</i> , $n = 3$, <i>scorelevel</i>)	95,8%	94,3%	0,950	0,989
NotesTaker, (<i>Quadratgitter</i> , $w_g = 7$, <i>multi-sample fusion</i> , $n = 2$, <i>scorelevel</i>)	77,6%	79,7%	0,786	0,837

Tabelle 9.11: Vergleich verschiedener Suchverfahren hinsichtlich ihrer Precision und ihres Recalls sowie der Werte F_1 und AUC ²Nicht genügend Informationen in der Literatur verfügbar für die Bestimmung der AUC .

Das System von *Poon et al.* in [PWC95] wurde mit einem eher ungewöhnlichen Korrektheitsmaß (*matching accuracy*) $A = (TP - 0.5(FP))/P$ evaluiert³ und erreichte einen Wert von $A = 75,2\%$. Da klassische Maße wie Precision und Recall oder der F_1 -Wert nicht angegeben wurden, ist ein Vergleich dieses Verfahrens mit anderen nicht möglich.

Zum Vergleich dieser Verfahren aus der Literatur mit dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Retrievalsystem sind in Abbildung 9.11 und in Tabelle 9.11 für jeden verwendeten Gerätetyp die entsprechenden Precision-Recall-Kurven beziehungsweise F_1 - und AUC -Werte der besten Parametrisierungen für das System mit und ohne Fusion dargestellt.

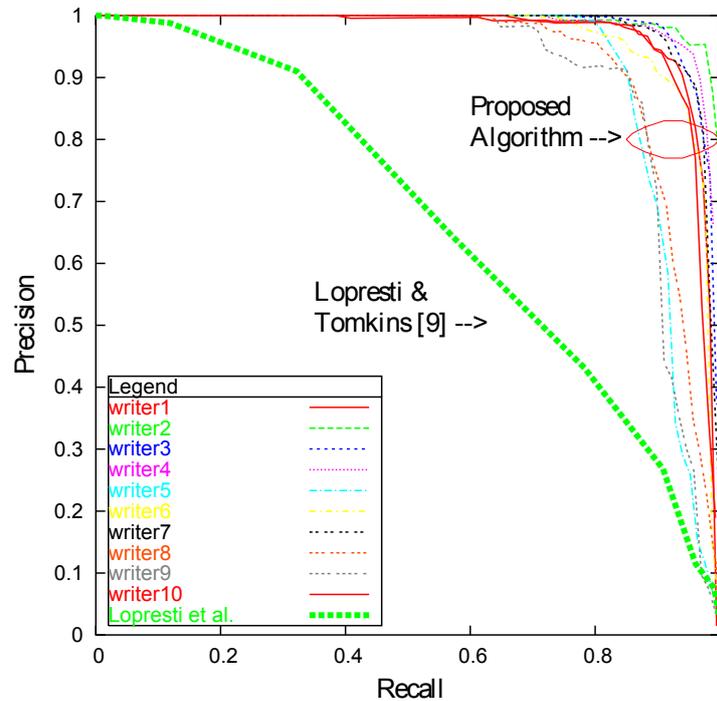


Abbildung 9.12: Originales Precision-Recall-Diagramm des Verfahrens von *Jain und Namboodiri* aus [JN03]

9.6 Zusammenfassung

Die Resultate in diesem Kapitel belegen die generelle Funktionsfähigkeit des in dieser Arbeit entwickelten Suchsystems für Handschriftdaten. Im Rahmen der verwendeten Testdokumente erwies sich das System als mindestens ebenbürtig, im Vergleich zu verwandten, in der Literatur veröffentlichten Verfahren; in Teilen überstieg seine Leistungsfähigkeit sogar die der anderen Verfahren.

Eine genauere Betrachtung der untersuchten Merkmalstypen zeigt jedoch große Unterschiede hinsichtlich der mit ihnen erzielbaren Resultate. Während etwa mit Hilfe des Merk-

³»*TP is the number of true positive matches, FP is the number of false positives, and P is the correct total number of matches.*« [PWC95]

malstyps auf Basis quadratischer Gitter sehr gute F_1 -Werte im Bereich von über 0,9 erzielt wurden⁴, konnten beispielsweise die Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung oder -neigung nur F_1 -Werte von etwas mehr als 0,6 erreichen. Es kann hieraus geschlussfolgert werden, dass diese Merkmalstypen für Zwecke der Suche in Handschriftdaten wenig geeignet sind, anders etwa als für die Bereiche der handschriftbasierten Biometrie oder Forensik, in denen diese Merkmale mit Erfolg zum Einsatz kommen [Pfa54, SS99].

Besonders interessant erscheinen dem Autor die Ergebnisse der verschiedenen Fusionsstrategien. Während durch die Multi-Sample-Fusion in fast allen Fällen eine Verbesserung der Suchfunktionalität erreicht werden konnte, und hierbei besonders die Fusion auf der Vergleichsebene gute Ergebnisse erbrachte, erwies sich die multialgorithmische Fusion nicht als zielführend. Lediglich die multialgorithmische Fusion auf der Entscheidungsebene führte zu geringfügigen Verbesserungen. Wie im Bereich der biometrischen Fusion konnte in dieser Arbeit beobachtet werden, dass die Fusion zu einem früheren Verarbeitungszeitpunkt bessere Resultate liefert als zu einem späteren Zeitpunkt (vergleiche Abschnitt 7.1 und [RNJ06, S. 59f]); zumindest gilt dies für die Fusionen auf der Vergleichs- beziehungsweise der Entscheidungsebene. Während erstere einen F_1 -Wert von bis zu 0,95 ergab, stellte sich im letzteren Fall nur ein F_1 -Wert von 0,947 ein. Hingegen deckt sich die Beobachtung hinsichtlich des Verhältnisses von multialgorithmischer zur Multi-Sample-Fusion nicht mit den Resultaten aus der Biometrie. Während die multialgorithmische Fusion (auf der Entscheidungsebene) im besten Fall nur bei $F_1 = 0,93$ und damit unter den Resultaten der Multi-Sample-Fusion lag, können im Bereich der Biometrie regelmäßig sehr gute Ergebnisse auch für die Fusion unterschiedlicher Algorithmen beobachtet werden [CKV04, SVD07a, RNJ07, WHY07].

Die automatische Bestimmung individueller Ähnlichkeitsschwellwerte für die verschiedenen Personen auf Basis der Alphabetentropie führte zu keinen nützlichen Ergebnissen. Ein hierfür nötiger Zusammenhang zwischen den empirisch bestimmten individuell optimalen Ähnlichkeitsschwellwerten der einzelnen Personen und der für ihre jeweiligen Dokumente ermittelten Werte der Alphabetentropie konnte experimentell nicht nachgewiesen werden.

⁴In Einzelfällen betrug die Precision 95,8 % und der Recall 94,3 %, was einem F_1 -Wert von 0,95 beziehungsweise einem Fehler von 5 % entspricht.

10 Fazit und Ausblick

Der Anfang ist die Hälfte des Ganzen
(Aristoteles)

Die Verbreitung von tragbaren Computern mit Stiftbedienung sowie von autonomen digitalen Stiftgeräten nimmt seit einigen Jahren zu; namhafte Hersteller von Notebook-Computern brachten eigene TabletPC-Modelle auf den Markt. Diese Computer gestatten es dem Benutzer, Textdokumente nicht mehr nur mittels der Tastatur zu erstellen, sondern sie ermöglichen zusätzlich explizit die Eingabe von handschriftlichen Daten und realisieren damit eine Notizbuchfunktionalität im engsten Wortsinn. Damit liegt es nahe, dem Benutzer Möglichkeiten einzuräumen, seine so entstehenden Handschriftdokumente zu durchsuchen, um sie auf diese Weise einfacher verwalten zu können.

10.1 Fazit

Mit der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel verfolgt, Verfahren zur Suche in on-line erfassten digitalen Handschriftdokumenten zu entwickeln und zu evaluieren. Diese Suchverfahren basieren auf verschiedenen Verarbeitungsschritten, die im Laufe dieser Arbeit im Detail beschrieben wurden. Der erste Schritt ist die Gewinnung von lokalen Merkmalen aus den handschriftlichen Rohdaten. Neben der Identifizierung von relevanten Typen von Merkmalen aus der wissenschaftlichen Literatur und der Adaption dieser Merkmale, welche ursprünglich für gänzlich andere Zwecke gedacht waren, bestand ein Teil der Arbeit auch darin, einen neuen Merkmalstyp zu entwickeln. Der Merkmalsgewinnung ging unmittelbar eine Aufbereitung (Vorverarbeitung) der Rohdaten voraus, welche unter anderem eine äquidistante Neuabtastung der Handschriftsignale umfasste. Durch diese Neuabtastung wurde eine Normalisierung der Handschriftsignale bezüglich der Schreibgeschwindigkeit erreicht. Die Suche in den Handschriftdokumenten erfolgte mit Techniken der unscharfen Teilstringsuche (engl. *fuzzy string searching*) innerhalb der Sequenzen lokaler Merkmale aus dem vorigen Verarbeitungsschritt. Diese Algorithmen wurden in der Vergangenheit unter anderem auch im Bereich der Bioinformatik für die Suche innerhalb von Gen- oder Aminosäuresequenzen verwendet.

Ein zusätzlicher wissenschaftlicher Beitrag dieser Arbeit ist der Versuch, die zuvor beschriebenen Suchtechniken durch den Einsatz verschiedenster Fusionen zu verbessern. Die Fusion als Kombinationstechnik beispielsweise verschiedener Klassifizierungsalgorithmen ist unter anderem aus dem Bereich der biometrischen Benutzerauthentifikation oder der medizinischen Bildverarbeitung bekannt. Aufgrund von Vorwissen des Autors im Bereich der Biometrie sowie aufgrund der großen Ähnlichkeit insbesondere zwischen schriftbasierten Biometrieverfahren und der stiftbasierten Suche entschied sich der Autor, speziell die in diesem

Gebiet entwickelten und erfolgreich eingesetzten Verfahren für seine Zwecke anzupassen. Besonders die multialgorithmische und die Multi-Sample-Fusion wurden hierbei näher untersucht.

Um die Leistungsfähigkeit der in dieser Arbeit entwickelten Suchverfahren und insbesondere der einzelnen Merkmalstypen sowie der verschiedenen Fusionsstrategien zu evaluieren, wurden umfangreiche Testreihen auf Basis einer selbst erstellten Datenbasis durchgeführt. Dabei wurden typische Messgrößen aus dem Bereich des Information Retrieval (speziell die Precision und der Recall) herangezogen, um einerseits die unterschiedlichen Ausprägungen des selbst entwickelten Systems miteinander zu vergleichen, aber auch um andererseits einen Vergleich mit verwandten Verfahren aus der Literatur zu erlauben.

Als Vorarbeit untersucht diese Arbeit zum einen den Stand der Forschung im Bereich der Handschriftsuche und identifiziert Anwendungen des Pen-Computing, die durch Suchfunktionen für Handschriftdokumente profitieren könnten. Zum anderen analysiert die Arbeit in einem späteren Kapitel die existierenden Technologien zur digitalen Erfassung von Stiftbewegungsdaten (on-line Erfassung) während des Schreibens und schlägt eine Klassifikation der verschiedenen Technologien hinsichtlich ihrer physikalischen Wirkungsweise vor.

Die Evaluation ergab Fehlerraten von zum Teil unter 5 % (Precision: 95,8 %, Recall: 94,3 %), die insbesondere durch Verbesserungen als Folge der Multi-Sample-Fusion erzielt werden konnten. In der Evaluation konnte aber auch gezeigt werden, dass nicht mit allen verwendeten Merkmalstypen gleichermaßen gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Während die Merkmale auf Basis quadratischer Gitter und der lokalen Schriftrichtung zu sehr guten Resultaten führten, wurden etwa für die lokale Schriftkrümmung oder -neigung Fehlerraten ermittelt, die eine praktische Verwendung dieser Merkmale ausschließen.

10.2 Erweiterungen und Verbesserungen

Neben den Möglichkeiten, die die in dieser Arbeit entwickelten Techniken bieten, existiert weiterhin eine Reihe von Herausforderungen und Problemen, die es wert sind, zukünftig näher untersucht zu werden. Zum Ersten erscheint es im Bereich der Merkmalsgewinnung nötig, solche Merkmalstypen zu finden, die eine Personenunabhängigkeit gewährleisten, indem sie von den individuellen Unterschieden zwischen verschiedenen Schreibern abstrahieren.

Zum Zweiten wären Merkmalstypen sinnvoll, die das Schriftbild mit kürzeren Merkmalssequenzen beschreiben können. Hierdurch könnte die zum Teil recht lange Suchdauer, insbesondere bei umfangreichen Sammlungen von Handschriftdokumenten, verkürzt werden.

Drittens sind, ebenfalls für den praktischen Einsatz in großen Mengen von Handschriftdokumenten, bessere Algorithmen für die unscharfe Suche wünschenswert, die auch bei vielen Fehlern (siehe Kapitel 6) schneller sind als aktuelle Algorithmen, deren Berechnungskomplexität unter schlechten Bedingungen stets nur quadratisch ist. Hierbei erscheinen insbesondere neue Indexing-Techniken sinnvoll, die die unscharfe Suche auch mit einer vergleichsweise großen Anzahl an Fehlern gestatten.

10.3 Ausblick

Neben diesen Verbesserungswünschen, die sich unmittelbar für die Handschriftsuche ergeben, existieren etwa im Bereich der so genannten *multimodalen Daten* weitere Herausforderungen und Problemstellungen. Analog zur Suche in Handschriftdaten gibt beispielsweise Techniken zur Suche in akustischen Sprachdaten, die unter dem Begriff *keyword spotting* zusammengefasst werden können. Für den Fall von synchronisierten Strömen von Schrift- und Sprachdaten, also beispielsweise solchen Daten, die mit dem *Audio-Notebook*-Gerät aus [Sti97], den *Smartpen*-Geräten der Firma Livescribe [Liv07] oder dem *Dynomite*-System aus [WSS97] (siehe Abschnitt 2.2.1) aufgezeichnet wurden, ergäbe sich aus Sicht des Benutzers möglicherweise der Wunsch, sowohl in den Schrift-, als auch in den Sprachdaten zu suchen. Eine gesprochene Suchanfrage nach einem bestimmten Wort sollte sowohl die entsprechenden Vorkommen dieses Wortes in den Sprachdaten auffinden, als auch die Stellen in den Handschriftdokumenten, die zu den selben Zeitpunkten geschrieben wurden. Gleiches möge für den umgekehrten Fall einer handschriftlichen Suchanfrage gelten. Das generelle Konzept dieser Idee wurde etwa in [SVVD04] beschrieben.

Sehr interessant für den Benutzer wäre in diesem Zusammenhang darüber hinaus eine medienübergreifende Suche, die Suchanfragen in jedweder Modalität akzeptiert und automatisch Dokumente unterschiedlicher Medientypen berücksichtigt. Das Ziel wäre also etwas, das *transmodales Retrieval* genannte werden könnte. Hierbei könnte beispielsweise der Benutzer seine Suchanfrage in Form eines handschriftlichen Wortes stellen und das System wäre in der Lage, sowohl getippte wie auch handschriftliche Dokumente zu finden, die dieses Wort enthalten, darüber hinaus aber auch Tondokumente, Bilder und weitere Medientypen, die das Suchwort enthalten. Zu diesem Zweck wäre es vermutlich nötig, die entsprechenden semantischen Informationen aus den verschiedenen Medientypen zu gewinnen und in einer einheitlichen, universellen Form zu verarbeiten.

A Notation

Bezeichner	Beschreibung
i, j, k, l, m, n, q	ganzzahlige Werte, zumeist als Indices oder Längen und Größen
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \omega$	reelle Zahlenwerte (evtl. mit Indices)
\mathbf{k}, \mathbf{y}	Parameter und Funktionswert der Splineinterpolation (evtl. mit Index)
\mathbb{P}	Menge aller Abtastpunkte; $\mathbb{P} = \mathbb{N}$ (siehe Abschnitt 5.1, S. 50)
\mathbb{P}^*	Menge aller Sequenzen von Abtastpunkten
p	Abtastpunkt (evtl. mit Index); $p = (x, y, z, t)^T$, $p \in \mathbb{P}$
x, y, z, t	Stiftposition (x, y) und Stiftdruck z zum Zeitpunkt t (evtl. mit Indices)
P, \hat{P}, \bar{P}	Sequenzen von Abtastpunkten; $P = p_1 p_2 p_3 \dots$, $P \in \mathbb{P}^*$
$ P $	Länge der Sequenz P von Abtastpunkten
$\ p_i - p_j\ _2$	euklidischer Abstand zwischen den Punkten p_i und p_j
$P(\mathbf{k})$	System von Teilpolynomen, das die Sequenz P von Abtastpunkten interpoliert; $P(\mathbf{k}) = (f_x(\mathbf{k}), f_y(\mathbf{k}))^T$ (siehe Abschnitt 5.1.3, S. 53f)
$resampling_w(P)$	Neuabtastung einer Sequenz von Abtastpunkten P mit einem zu erzielenden paarweisen Punktabstand von w Längeneinheiten; $resampling_w : \mathbb{P}^n \rightarrow \mathbb{P}^{\bar{n}}$
w	Punktabstand nach erfolgter Neuabtastung
w_g	Abstand benachbarter Knotenpunkte bei in Quadrat- und Dreiecksgittern (siehe Abschnitt 5.2)
$0, 1, 2, 3, \dots$	Symbole für die Merkmalsrepräsentation
\mathbb{A}	Alphabet; $\mathbb{A} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$
\mathbb{A}_{\square}	Beispielalphabet der Größe acht; $\mathbb{A}_{\square} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$
\mathbb{A}_{\triangle}	Beispielalphabet der Größe sechs; $\mathbb{A}_{\triangle} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$
$\mathbb{A}_{(q)}$	Beispielalphabet der Größe q ; $\mathbb{A}_{(q)} = \{0, 1, 2, \dots, (q-1)\}$
$ \mathbb{A} $	Größe des Alphabetes \mathbb{A}
\mathbb{A}^*	Menge aller Zeichenketten über dem Alphabet \mathbb{A}
r, s	Variablen für Elemente aus \mathbb{A} (evtl. mit Indices)
\mathbf{s}	Zeichenketten aus \mathbb{A}^* ; $\mathbf{s} = s_1 s_2 s_3 \dots$
$ \mathbf{s} $	Länge der Zeichenkette \mathbf{s}
λ	die leere Zeichenkette; $ \lambda = 0$
$s_{i,i+k}$	Teil der Zeichenkette \mathbf{s} ; $s_{i,i+k} = s_i s_{i+1} s_{i+2} \dots s_{i+k}$
p_0, p_1, p_2, \dots	Wahrscheinlichkeit des Vorkommens der Symbole $0, 1, 2, \dots$ an einer bestimmten Stelle einer Zeichenkette

Bezeichner	Beschreibung
$extract(P)$	Merkmalsextraktion (evtl. mit Index) für Sequenz P ; $extract : \mathbb{P}^* \rightarrow \mathbb{A}^*$
$quant_q(\varphi)$	Quantisierung eines Winkels φ ; $quant_q : [0, 2 \cdot \pi[\rightarrow \mathbb{A}_{(q)}$
$distance(r, s)$	Distanz zweier Zeichenketten r und s (evtl. mit Index); $dist : \mathbb{A}^* \times \mathbb{A}^* \rightarrow \mathbb{N}$
$similarity(r, s)$	Ähnlichkeit der Zeichenketten r und s (evtl. mit Index); $similarity : \mathbb{A}^* \times \mathbb{A}^* \rightarrow [0, 1]$
D	Distanzmatrix
D_m	m -te Zeile der Distanzmatrix D (<i>unterste Zeile</i>)
\mathbb{H}	Menge aller möglichen Suchtreffer (engl. <i>hit</i>)
h	Suchtreffer (evtl. mit Index); $h = (ID, j^b, j^e, \sigma), h \in \mathbb{H}$
ID	Dokumentnummer
j^b, j^e	Indices des Beginns (j^b) und des Endes (j^e) eines Suchtreffers
σ	Bewertung (engl. <i>score</i>) des Suchtreffers (evtl. mit Index)
H	Menge der tatsächlichen Suchtreffer; $H \in \mathbb{H}^*$
\emptyset	die leere Menge
τ	Ähnlichkeitsschwellwert (evtl. mit Index); $t \in [0, 1]$
$precision$	Maß für die Suchgenauigkeit (siehe Abschnitt 8.1)
$recall$	Maß für die Suchvollständigkeit
$fallout$	Maß für die Vermeidung irrelevanter Suchtreffer
F_1	harmonischer Mittelwert aus $precision$ und $recall$
AUC	Flächeninhalt unter der Precision-Recall-Kurve eines Retrievalsystems (engl. <i>area under curve</i>)
τ_{EER}	Ähnlichkeitsschwellwert, bei dem gilt $precision = recall$

B Plan zur Schriftdatenerfassung

- Schreibe etwa 20mal den Satz:
»The quick brown fox jumps over the lazy dog.«

- Schreibe zweimal folgenden Text¹:

»Mit Handschrift kommt jeder von uns auf zweierlei Weisen in Berührung: schreibend und betrachtend. In beiden Fällen übt sie einen intensiven und völlig unterschiedlichen Eindruck auf uns aus. Der Faszination von Handschrift kann sich kaum jemand entziehen.

Mit den Grundschuljahren, wenn die Schrift in unseren Geist gepflanzt wird, beginnt eine lebenslange Auseinandersetzung mit Handschrift. Sie schlägt ihre Wurzeln in die unterschiedlichsten Bereiche unseres Bewusst- und Unterbewusstseins. Sie verschmilzt mit unserer gesamten Person und wird Ausdruck der Identität. Sie wird geprägt von unserer Individualität.

Das Schreibvermögen wird aus zwei Quellen gespeist: Erlernen/Trainieren und (genetische?) Determination. Zwei Personen, die den exakt gleichen Schriftunterricht genossen haben, werden dennoch unterschiedliche Handschriften entwickeln. Das Erlernen der Schrift ist zugleich auch ästhetische Grundausstattung, Basiswissen in Sachen Formkompetenz und Feinmotorik. Handschrift fällt nicht vom Himmel sonder muss trainiert und - vor allen Dingen - mit wachem Formempfinden analysiert werden. Dies führt direkt zum leidigen Thema des zu kurzen Schriftunterrichts in den Schulen und den vielen, mit ihrer Handschrift unzufriedenen Menschen...

Das Schreiben von Hand geschieht relativ langsam. Diese Langsamkeit verhält sich proportional zum Tempo, das die meisten Menschen benötigen um sinnvolle und zusammenhängende Sätze zu denken. Gleichzeitig ist das Schreiben eine physische Angelegenheit. Der ganze Körper ist beim Schreiben beteiligt und angespannt, nicht etwa nur Hand und Arm. Beim Schreiben passt sich die Atmung dem Rhythmus der Handbewegungen an, und die komplexen Reaktionen des schreibenden Körpers beziehen sich auch auf Blutdruck und Herzschlag. Darum ist die Schreibzeit anstrengend und kann nicht unbegrenzt lange ausgedehnt werden. In ein Schriftstück investiert man demnach nicht nur Lebenszeit sondern auch Konzentration und Körperkraft.

Wie jede Tätigkeit, die mit Körperbeherrschung, Konzentration, Atmung und Rhythmus zu tun haben, eignet sich das Handschreiben gut für meditative Übungen. Beim Betrachten von Handschrift haben wir seltsamerweise ein sicheres Urteilvermögen für grafische Qualität. Zudem können wir eine Handschrift kaum neutral betrachten. Stets bilden wir uns eine subjektive Meinung, ein Mögen oder Nicht-Mögen, ähnlich wie beim Betrachten eines Gesichts. Das Handgeschriebene lässt und nicht kalt.«

¹Aus »Tanja Leonhardt: *Gedanken über Handschrift*«, http://www.atelierleonhardt.de/gedanken_ueber_handschrift.htm

B Plan zur Schriftdatenerfassung

C Datenbankschema der Evaluationsumgebung

In Abbildung C.1 ist das Datenbankschema der für diese Arbeit entwickelten Evaluationsumgebung des Handschriftretrievalsystems zu erkennen. Es enthält die vier Relationen (Tabellen) `ink_document`, `ink_raw_data`, `ink_groundtruth` und `ink_evaluation`. Die Relation `ink_raw_data` beschreibt die Rohdaten der on-line aufgezeichneten Schreibdaten, bestehend aus den horizontalen und vertikalen Stiftkoordinaten x und y , der Druckinformation p sowie der Zeitinformation t jeweils eines Abtastpunktes. Über das Attribut `document_id` erfolgt in Verbindung mit der Relation `ink_document` eine Organisation der zu den Dokumenten gehörigen Rohdaten. Zusätzlich enthält die Relation `ink_document` Metainformationen wie den Autor und den Titel eines Dokumentes sowie den verwendeten Gerätetypen.

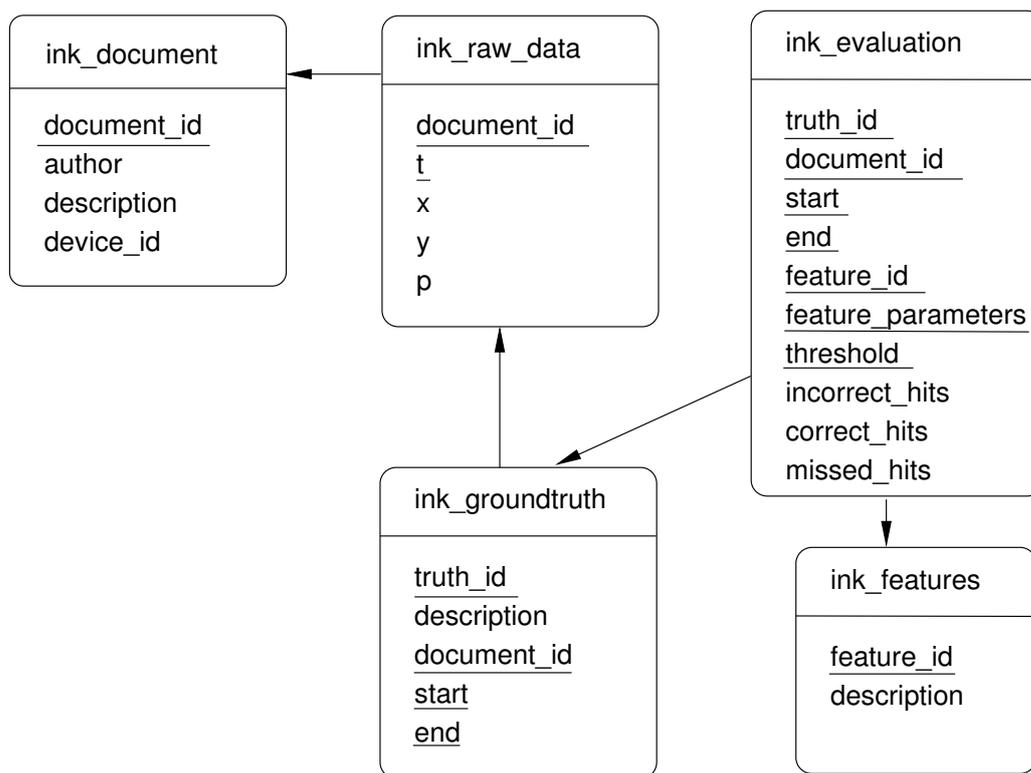


Abbildung C.1: Schema der Evaluationsdatenbank

Die in Abschnitt 8.2 beschriebenen apriorischen Informationen für die Evaluation des Retrievalsystems sind in der Relation `ink_groundtruth` zusammengefasst. Diese beinhaltet

C Datenbankschema der Evaluationsumgebung

die Position von bestimmten, sich wiederholenden Worten, Wortgruppen und Symbolen, welche für die Suche testweise herangezogen werden. Die Positionen sind repräsentiert durch die Attribute `document_id` sowie `start` und `end`. Die letzteren beiden sind Verweise auf die Zeitinformation der jeweiligen Abtastpunkte am Anfang und am Ende des jeweiligen Wortes.

Für die Speicherung der Resultate der Evaluation des Retrievalsystems bei Verwendung der verschiedenen Merkmalstypen ist die Relation `ink_evaluation` zuständig. Hier werden für die einzelnen Merkmalstypen, Parameterausprägungen und Suchanfragen die Anzahl der korrekten und inkorrekten Treffer sowie die Anzahl der nicht gefundenen Textstellen zur späteren Auswertung gespeichert.

D Resultate – tabellarisch

Im Folgenden finden sich die Performanzdaten in Form von Precision (P) und Recall (R), der F_1 -Werte sowie als Flächeninhalt unter den Precision-Recall-Kurven (AUC) für die unterschiedlichen Merkmalstypen (jeweils für verschiedene Parametereinstellungen), getrennt nach Geräteklasse. Die Precision und der Recall sind hierbei als Prozentwerte angegeben.

D.1 Ohne Fusion

	<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Gitterbasierte Merkmale (Quadratgitter; siehe Abschnitt 5.2.1)</i>												
w	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC
7	84.8	87.0	0.859	0.926	92.0	90.8	0.914	0.974	72.8	75.6	0.741	0.796
8	86.8	85.0	0.859	0.927	94.0	92.0	0.930	0.976	72.8	75.1	0.739	0.793
9	84.8	84.3	0.846	0.913	93.3	90.8	0.920	0.978	72.9	74.0	0.734	0.788
10	82.0	83.8	0.829	0.901	90.3	93.5	0.918	0.976	74.3	72.0	0.731	0.786
11	82.1	85.2	0.836	0.902	90.8	92.5	0.916	0.974	74.9	71.2	0.730	0.783
12	83.3	81.7	0.825	0.892	92.0	91.5	0.917	0.972	75.4	71.0	0.732	0.779
13	82.8	80.7	0.817	0.891	91.0	91.3	0.911	0.971	70.7	73.9	0.722	0.777
14	82.4	79.7	0.810	0.887	90.8	92.0	0.914	0.974	70.3	72.4	0.714	0.771
15	76.1	81.3	0.786	0.863	91.3	89.3	0.902	0.965	70.9	71.8	0.713	0.766
16	79.6	81.2	0.804	0.870	88.5	88.0	0.882	0.958	70.7	70.2	0.704	0.759
17	78.7	81.1	0.799	0.861	91.5	86.8	0.891	0.961	68.3	70.9	0.696	0.748
18	76.2	74.2	0.752	0.833	90.8	87.3	0.890	0.957	68.4	69.3	0.689	0.747
19	76.3	78.2	0.773	0.844	88.5	87.0	0.877	0.946	69.8	69.4	0.696	0.744
20	75.9	73.6	0.748	0.798	86.5	86.3	0.864	0.938	68.7	68.0	0.683	0.734
25	71.2	66.7	0.689	0.749	86.5	80.5	0.834	0.926	65.6	63.7	0.646	0.693
30	64.4	60.8	0.625	0.663	77.5	79.5	0.785	0.881	64.0	59.0	0.614	0.653
35	54.6	57.4	0.560	0.594	77.3	73.8	0.755	0.844	54.7	60.6	0.575	0.606
<i>Gitterbasierte Merkmale (Dreiecksgitter; siehe Abschnitt 5.2.2)</i>												
w	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC
7	80.8	75.7	0.781	0.846	89.8	91.0	0.904	0.966	58.0	69.0	0.630	0.683
8	78.8	71.6	0.751	0.818	91.8	87.0	0.893	0.960	62.6	54.6	0.583	0.630
9	71.4	76.7	0.739	0.830	88.0	89.5	0.887	0.956	59.7	60.6	0.601	0.644
10	71.8	72.8	0.723	0.805	88.8	91.8	0.902	0.965	61.9	59.9	0.609	0.659
11	73.5	74.6	0.741	0.807	90.5	88.8	0.896	0.957	60.8	61.4	0.611	0.656

D Resultate – tabellarisch

<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Gitterbasierte Merkmale (Dreiecksgitter)</i>													
<i>w</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
12	73.5	72.0	0.727	0.804	88.8	91.5	0.901	0.960	61.9	61.9	0.619	0.665	
13	75.6	70.7	0.731	0.805	93.0	91.5	0.922	0.977	62.7	62.7	0.627	0.666	
14	75.7	69.9	0.727	0.801	91.0	90.8	0.909	0.967	59.4	63.7	0.615	0.662	
15	75.3	69.1	0.721	0.785	91.0	92.3	0.916	0.971	60.1	59.8	0.599	0.641	
16	66.2	71.5	0.687	0.758	90.0	91.8	0.909	0.968	57.4	62.6	0.599	0.638	
17	64.5	70.6	0.674	0.758	90.5	87.0	0.887	0.961	62.9	60.3	0.616	0.660	
18	69.6	66.5	0.680	0.747	91.8	88.8	0.902	0.969	62.0	56.9	0.593	0.635	
19	67.3	66.5	0.669	0.737	90.5	89.8	0.901	0.959	60.6	59.6	0.601	0.641	
20	61.4	69.3	0.651	0.729	84.8	88.5	0.866	0.948	58.6	57.9	0.582	0.626	
25	61.4	60.4	0.609	0.652	87.0	80.8	0.838	0.923	56.4	57.4	0.569	0.607	
30	51.5	55.2	0.532	0.567	78.3	83.3	0.807	0.894	51.3	56.1	0.536	0.568	
35	41.9	49.3	0.453	0.488	71.8	69.8	0.707	0.802	48.0	53.3	0.505	0.528	
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung (siehe 5.3)</i>													
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	3	65.9	76.6	0.709	0.803	88.0	77.5	0.824	0.922	63.7	59.6	0.615	0.652
	4	81.4	76.1	0.786	0.859	86.5	91.5	0.889	0.952	60.4	60.9	0.607	0.661
	8	78.8	82.5	0.806	0.882	91.0	89.5	0.902	0.966	65.7	69.4	0.675	0.729
	10	81.1	83.5	0.823	0.898	83.5	86.0	0.847	0.931	66.4	68.3	0.674	0.725
	12	81.2	79.1	0.801	0.871	88.3	91.0	0.896	0.964	65.6	68.6	0.670	0.720
	14	79.8	80.9	0.803	0.870	82.3	84.3	0.832	0.924	66.3	63.3	0.648	0.697
	16	80.6	77.3	0.789	0.856	85.0	84.5	0.847	0.929	63.3	62.9	0.631	0.673
20	75.8	74.6	0.752	0.822	81.8	79.0	0.804	0.895	54.2	64.1	0.588	0.637	
10	3	68.0	76.7	0.721	0.804	89.5	78.5	0.836	0.924	52.4	69.8	0.599	0.640
	4	84.4	74.8	0.793	0.867	91.3	89.0	0.901	0.961	61.3	60.4	0.609	0.660
	8	82.4	80.2	0.813	0.876	91.5	91.0	0.912	0.971	66.8	69.6	0.681	0.735
	10	84.9	80.4	0.826	0.891	84.0	86.0	0.850	0.934	66.3	67.1	0.667	0.719
	12	78.0	78.5	0.782	0.853	89.0	90.0	0.895	0.963	65.9	67.9	0.669	0.715
	14	77.0	78.0	0.775	0.858	84.3	83.3	0.837	0.928	66.1	62.4	0.642	0.688
	16	78.1	74.3	0.761	0.833	83.8	86.5	0.851	0.913	63.0	61.4	0.622	0.668
20	74.8	70.1	0.724	0.799	81.5	80.3	0.809	0.908	61.2	57.2	0.592	0.629	
15	3	68.5	75.2	0.717	0.783	77.3	88.3	0.824	0.916	52.4	68.6	0.594	0.636
	4	83.5	72.9	0.779	0.858	90.3	88.0	0.891	0.961	61.1	60.1	0.606	0.653
	8	79.9	78.6	0.793	0.861	91.3	90.0	0.906	0.967	67.4	67.6	0.675	0.723
	10	81.7	77.2	0.794	0.867	84.0	82.8	0.834	0.922	66.7	65.6	0.661	0.708
	12	76.6	73.8	0.752	0.823	90.0	87.5	0.887	0.959	65.6	64.8	0.652	0.696
	14	75.6	74.6	0.751	0.820	82.3	84.3	0.832	0.920	61.6	63.1	0.623	0.670
	16	67.2	72.5	0.697	0.785	84.5	82.3	0.834	0.904	58.1	62.6	0.603	0.650
20	66.4	67.0	0.667	0.742	80.3	80.5	0.804	0.891	56.6	58.4	0.575	0.610	

<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schrifttrichtung (siehe 5.3)</i>													
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>
20	3	66.6	73.6	0.699	0.769	77.8	87.3	0.822	0.911	51.7	67.7	0.586	0.620
	4	68.9	78.1	0.732	0.821	86.0	90.3	0.881	0.956	61.6	57.6	0.595	0.638
	8	76.9	73.1	0.750	0.810	89.0	90.3	0.896	0.966	67.2	64.8	0.660	0.706
	10	78.1	73.8	0.759	0.829	84.8	85.0	0.849	0.929	66.0	62.2	0.641	0.690
	12	70.3	68.9	0.696	0.766	86.8	87.0	0.869	0.948	65.7	60.9	0.632	0.677
	14	70.6	66.5	0.685	0.747	80.8	84.3	0.825	0.912	61.2	59.4	0.603	0.646
	16	64.8	64.2	0.645	0.706	83.0	81.5	0.822	0.902	58.8	58.4	0.586	0.617
20	61.4	62.4	0.619	0.677	74.8	83.0	0.787	0.878	56.6	53.8	0.551	0.574	
25	3	63.0	69.7	0.662	0.732	77.3	88.0	0.823	0.910	50.0	65.7	0.568	0.604
	4	67.8	74.2	0.709	0.790	85.0	89.0	0.870	0.952	61.0	54.3	0.575	0.614
	8	65.9	69.1	0.675	0.752	89.8	87.8	0.887	0.953	62.0	64.7	0.633	0.680
	10	72.2	67.8	0.699	0.772	81.8	82.0	0.819	0.915	61.0	61.9	0.614	0.662
	12	66.6	65.0	0.658	0.718	88.3	84.5	0.863	0.939	60.3	61.4	0.609	0.645
	14	65.2	61.0	0.630	0.682	78.8	78.3	0.785	0.887	56.6	59.4	0.580	0.618
	16	65.2	59.2	0.621	0.652	79.8	78.8	0.792	0.877	58.6	53.6	0.559	0.583
20	50.5	57.2	0.536	0.599	69.8	77.8	0.735	0.836	49.9	51.7	0.508	0.525	
30	3	61.1	65.8	0.634	0.692	76.5	82.0	0.792	0.882	48.3	64.8	0.554	0.585
	4	66.5	68.0	0.672	0.737	86.8	87.8	0.872	0.950	58.3	52.6	0.553	0.584
	8	71.0	64.7	0.677	0.714	88.0	88.3	0.881	0.952	61.3	61.4	0.614	0.654
	10	66.2	66.8	0.665	0.720	81.0	79.8	0.804	0.891	60.4	59.0	0.597	0.635
	12	57.8	60.9	0.593	0.644	81.5	85.8	0.836	0.924	60.1	58.2	0.592	0.624
	14	62.8	56.3	0.594	0.633	77.0	79.8	0.784	0.882	55.9	55.9	0.559	0.590
	16	55.9	57.1	0.565	0.596	76.8	78.3	0.775	0.874	51.6	54.2	0.529	0.552
20	48.1	51.6	0.498	0.557	69.0	71.8	0.703	0.805	50.1	48.6	0.493	0.494	
35	3	56.8	63.6	0.600	0.642	74.3	78.8	0.764	0.851	46.2	61.6	0.528	0.558
	4	64.7	64.3	0.645	0.692	84.3	85.3	0.847	0.915	57.2	48.4	0.525	0.554
	8	59.8	60.2	0.600	0.644	84.0	83.3	0.836	0.915	60.2	55.1	0.576	0.610
	10	64.5	61.2	0.628	0.668	75.3	78.8	0.770	0.856	58.7	54.4	0.565	0.602
	12	57.5	57.2	0.573	0.602	81.3	82.3	0.817	0.894	57.3	53.6	0.554	0.581
	14	52.5	55.8	0.541	0.584	75.3	71.8	0.735	0.835	55.2	52.2	0.537	0.555
	16	54.8	52.1	0.534	0.551	74.5	73.0	0.737	0.816	51.2	49.2	0.502	0.511
20	45.0	50.8	0.477	0.521	65.3	60.8	0.629	0.726	48.4	44.7	0.465	0.450	
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung (siehe 5.4)</i>													
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i> ₁	<i>AUC</i>
7	3	46.4	36.7	0.410	0.404	56.5	56.8	0.566	0.632	38.7	25.2	0.305	0.285
	4	21.9	48.8	0.302	0.420	55.8	60.8	0.581	0.646	26.1	30.1	0.280	0.279
	8	43.5	38.6	0.409	0.404	58.3	59.8	0.590	0.650	29.3	30.8	0.300	0.281
	10	38.2	41.9	0.399	0.412	61.0	58.5	0.597	0.662	28.6	31.0	0.297	0.282
	12	53.8	34.2	0.418	0.417	66.3	56.5	0.610	0.677	35.8	28.3	0.316	0.282
	16	46.9	38.0	0.420	0.439	53.8	76.0	0.630	0.685	21.4	36.8	0.271	0.288
	20	35.6	43.0	0.390	0.436	72.8	55.3	0.628	0.716	36.7	29.9	0.329	0.282

D Resultate – tabellarisch

<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>													
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
10	3	60.7	31.2	0.412	0.408	59.8	48.0	0.532	0.641	22.1	30.9	0.258	0.270
	4	29.9	43.8	0.355	0.402	57.0	56.8	0.569	0.636	29.8	28.3	0.290	0.272
	8	45.3	39.8	0.424	0.419	58.5	64.3	0.612	0.661	26.2	31.6	0.286	0.276
	10	33.1	42.5	0.372	0.424	59.8	66.3	0.628	0.680	24.4	33.4	0.282	0.280
	12	37.8	41.2	0.394	0.435	59.5	66.3	0.627	0.693	36.0	29.2	0.323	0.282
	16	43.6	40.1	0.418	0.440	65.0	61.8	0.633	0.709	34.7	31.7	0.331	0.288
	20	44.2	42.6	0.434	0.448	69.5	61.0	0.650	0.736	36.4	31.4	0.338	0.289
15	3	29.0	46.8	0.358	0.414	60.3	49.3	0.542	0.642	20.0	30.3	0.241	0.261
	4	42.2	42.5	0.423	0.424	59.8	52.5	0.559	0.646	33.6	26.6	0.296	0.265
	8	38.4	41.5	0.399	0.436	64.8	58.5	0.615	0.689	29.9	30.0	0.299	0.273
	10	41.8	38.8	0.402	0.439	65.5	61.8	0.636	0.702	27.6	32.1	0.297	0.279
	12	43.2	38.8	0.408	0.444	64.5	66.3	0.654	0.721	31.6	31.0	0.313	0.278
	16	38.8	42.5	0.406	0.433	69.3	63.0	0.660	0.729	29.9	32.4	0.311	0.284
	20	41.2	45.0	0.430	0.457	68.8	64.0	0.663	0.725	28.9	34.3	0.314	0.284
20	3	40.1	40.5	0.403	0.422	59.8	51.0	0.550	0.638	29.8	24.1	0.266	0.247
	4	44.9	39.9	0.423	0.422	56.3	64.8	0.602	0.634	32.7	25.3	0.285	0.253
	8	42.2	40.0	0.410	0.440	61.5	67.8	0.645	0.709	29.2	29.1	0.292	0.266
	10	42.4	40.7	0.415	0.445	62.5	66.3	0.643	0.712	32.8	28.7	0.306	0.269
	12	39.2	43.8	0.414	0.434	66.0	64.3	0.651	0.718	30.8	28.9	0.298	0.267
	16	46.3	41.2	0.436	0.437	70.3	57.0	0.629	0.706	26.9	32.2	0.293	0.267
	20	47.5	42.1	0.446	0.434	67.3	53.5	0.596	0.685	27.4	32.3	0.297	0.265
25	3	41.2	43.8	0.425	0.425	55.3	64.3	0.594	0.613	26.8	24.6	0.256	0.242
	4	48.1	39.2	0.432	0.434	58.5	54.0	0.562	0.639	33.1	24.4	0.281	0.253
	8	38.8	44.2	0.414	0.445	63.0	62.5	0.627	0.687	28.8	28.6	0.287	0.264
	10	41.3	42.6	0.420	0.434	62.8	62.8	0.627	0.688	29.3	28.8	0.291	0.263
	12	36.8	45.8	0.408	0.430	58.0	70.3	0.635	0.689	29.6	28.8	0.292	0.267
	16	46.1	40.8	0.433	0.420	60.5	58.3	0.594	0.645	30.7	28.3	0.295	0.262
	20	41.5	40.8	0.412	0.410	60.8	53.0	0.566	0.621	29.6	27.9	0.287	0.255
30	3	42.9	35.8	0.391	0.391	56.3	58.5	0.574	0.622	22.7	25.0	0.238	0.236
	4	45.2	38.5	0.416	0.419	56.3	63.3	0.595	0.638	31.1	23.7	0.269	0.242
	8	43.0	39.5	0.412	0.423	69.0	57.0	0.624	0.722	27.7	27.6	0.276	0.254
	10	43.5	37.5	0.403	0.424	69.5	56.0	0.620	0.704	26.8	28.2	0.275	0.252
	12	37.0	44.1	0.402	0.422	63.3	63.0	0.631	0.697	22.9	29.6	0.258	0.249
	16	33.8	43.8	0.381	0.404	56.5	66.0	0.609	0.671	27.8	25.8	0.267	0.241
	20	44.5	38.5	0.413	0.392	52.5	59.2	0.557	0.611	25.4	25.1	0.253	0.231
35	3	37.8	37.5	0.377	0.378	55.8	56.3	0.560	0.614	20.6	25.3	0.227	0.233
	4	42.8	41.2	0.419	0.421	57.0	60.3	0.586	0.635	24.0	27.9	0.258	0.253
	8	40.7	39.8	0.402	0.415	59.0	66.0	0.623	0.685	26.9	27.8	0.273	0.259
	10	42.2	39.6	0.408	0.436	59.2	64.3	0.616	0.654	29.4	26.8	0.280	0.252
	12	38.1	39.7	0.389	0.402	63.3	52.5	0.574	0.647	30.8	25.3	0.278	0.248
	16	42.2	38.8	0.405	0.395	57.8	56.5	0.571	0.617	27.2	25.8	0.265	0.237
	20	41.5	39.2	0.404	0.383	53.0	52.0	0.525	0.553	23.6	24.9	0.242	0.228

Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung (siehe 5.5)

q	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC
3	37.2	33.7	0.353	0.315	46.3	43.8	0.450	0.479	22.4	21.7	0.220	0.161
4	36.0	40.8	0.383	0.371	58.5	57.0	0.577	0.633	21.0	25.3	0.230	0.192
5	36.1	43.2	0.393	0.397	57.8	57.3	0.575	0.643	24.9	20.4	0.224	0.174
6	41.1	43.2	0.421	0.447	65.8	58.5	0.619	0.693	25.2	26.7	0.259	0.229
7	38.1	44.5	0.410	0.443	60.5	56.0	0.582	0.651	28.1	26.0	0.270	0.236
8	46.6	40.2	0.432	0.447	60.0	58.7	0.594	0.663	29.6	28.3	0.289	0.255
9	42.0	44.3	0.431	0.439	61.5	64.5	0.630	0.675	26.6	28.6	0.275	0.257
10	46.2	41.8	0.439	0.442	60.5	62.0	0.612	0.648	28.4	28.4	0.284	0.264
11	41.4	39.0	0.402	0.422	59.0	58.7	0.589	0.650	27.3	29.7	0.285	0.273
12	44.1	40.2	0.420	0.439	60.3	67.0	0.634	0.701	31.8	29.7	0.307	0.280
13	43.8	41.2	0.425	0.445	59.2	61.5	0.604	0.659	30.4	28.8	0.296	0.275
14	43.4	38.5	0.408	0.420	60.3	59.8	0.600	0.635	27.9	28.6	0.282	0.263
15	36.1	41.2	0.385	0.418	57.0	62.0	0.594	0.616	28.1	28.4	0.283	0.266
16	41.6	36.7	0.390	0.406	58.7	53.0	0.557	0.621	26.3	31.4	0.287	0.275
17	40.8	44.8	0.427	0.435	57.0	55.0	0.560	0.621	29.1	31.4	0.302	0.287
18	31.3	38.4	0.345	0.394	55.3	60.5	0.578	0.598	29.6	30.6	0.300	0.274
19	42.5	34.8	0.382	0.400	56.3	52.2	0.542	0.593	31.0	27.3	0.291	0.265
20	32.8	39.5	0.358	0.397	55.0	54.5	0.547	0.576	27.9	27.4	0.277	0.258
21	42.4	37.8	0.400	0.396	56.8	52.7	0.547	0.584	30.2	23.7	0.265	0.243
22	31.8	36.2	0.338	0.373	55.3	55.5	0.554	0.566	22.0	29.8	0.253	0.254
23	37.5	35.8	0.366	0.383	52.0	59.8	0.556	0.555	24.6	29.4	0.268	0.256
24	32.2	35.3	0.337	0.361	53.5	57.3	0.553	0.556	26.4	27.7	0.270	0.255
25	38.7	35.1	0.368	0.373	53.8	51.8	0.527	0.544	27.0	25.3	0.261	0.243
26	31.2	37.9	0.343	0.371	52.7	55.0	0.539	0.536	24.1	27.3	0.256	0.247
27	36.5	34.3	0.354	0.350	53.0	50.8	0.519	0.525	23.8	25.8	0.247	0.239
28	37.9	31.1	0.342	0.351	50.0	58.0	0.537	0.524	27.1	23.6	0.252	0.230
29	27.1	34.6	0.304	0.339	50.0	54.5	0.522	0.515	24.0	26.2	0.251	0.235
30	33.2	32.8	0.330	0.347	52.5	50.5	0.515	0.503	26.1	25.3	0.257	0.237
31	35.7	31.8	0.336	0.340	53.0	50.5	0.517	0.507	28.2	24.0	0.259	0.232
32	28.7	35.3	0.317	0.337	48.0	53.0	0.504	0.476	21.9	26.0	0.238	0.227
33	29.3	32.5	0.308	0.330	48.8	52.7	0.507	0.490	21.3	25.2	0.231	0.225
34	32.5	31.5	0.320	0.326	50.8	47.3	0.489	0.482	24.4	23.7	0.240	0.222
35	33.9	30.7	0.322	0.328	50.5	44.8	0.475	0.469	27.9	23.7	0.256	0.229
36	27.7	32.1	0.297	0.315	45.8	51.5	0.485	0.450	19.4	25.0	0.219	0.219

D.2 Multi-Sample-Fusion

D.2.1 Fusion auf Vergleichsebene

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Gitterbasierte Merkmale (Quadratgitter)</i>													
w_g	n	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC
7	1	89.2	86.8	0.879	0.940	92.3	94.0	0.931	0.982	75.2	77.2	0.762	0.814
	Δ^1 2	87.5	88.7	0.881	0.942	95.3	94.0	0.946	0.985	77.2	75.3	0.763	0.814
	3	86.4	89.8	0.880	0.942	94.5	94.3	0.944	0.984	75.4	76.7	0.761	0.810
	∇ 1	86.8	84.2	0.854	0.919	93.3	91.5	0.924	0.973	75.0	75.2	0.751	0.800
	2	82.3	81.9	0.821	0.864	93.3	91.0	0.921	0.973	75.7	73.6	0.746	0.791
	3	78.9	72.2	0.754	0.801	92.3	90.0	0.911	0.967	74.7	72.3	0.735	0.772
	\emptyset 1	87.3	88.3	0.878	0.943	93.8	93.0	0.934	0.981	78.4	74.9	0.766	0.821
	2	88.7	88.6	0.887	0.947	94.8	93.0	0.939	0.985	76.3	79.3	0.778	0.831
	3	88.3	88.6	0.885	0.949	93.0	94.3	0.936	0.986	77.6	79.7	0.786	0.837
10	1	87.7	83.1	0.853	0.916	94.0	92.8	0.934	0.981	76.6	73.9	0.752	0.804
	Δ 2	85.7	85.3	0.855	0.916	95.5	93.5	0.945	0.984	74.2	76.8	0.755	0.802
	3	84.8	86.3	0.855	0.917	94.5	94.0	0.942	0.984	76.6	73.2	0.749	0.801
	∇ 1	83.5	83.2	0.833	0.900	94.3	92.0	0.931	0.977	76.2	72.2	0.742	0.792
	2	82.8	75.2	0.788	0.844	94.0	91.0	0.925	0.975	73.1	74.8	0.739	0.784
	3	69.6	67.8	0.687	0.777	88.3	92.0	0.901	0.972	71.9	73.1	0.725	0.764
	\emptyset 1	87.2	85.0	0.861	0.927	93.8	93.8	0.938	0.981	75.7	76.7	0.762	0.812
	2	88.0	84.9	0.864	0.928	95.0	93.8	0.944	0.987	78.1	77.1	0.776	0.825
	3	88.5	85.8	0.871	0.933	95.8	94.3	0.950	0.989	79.3	77.3	0.783	0.829
15	1	78.2	84.2	0.811	0.890	91.8	91.8	0.918	0.974	72.8	73.9	0.733	0.781
	Δ 2	84.2	82.2	0.831	0.896	94.0	92.0	0.930	0.977	75.3	71.8	0.735	0.785
	3	82.6	83.7	0.832	0.898	93.8	94.0	0.939	0.978	73.4	73.1	0.733	0.783
	∇ 1	80.2	80.2	0.802	0.851	90.3	92.3	0.912	0.974	73.8	71.1	0.724	0.776
	2	72.8	74.5	0.737	0.783	93.5	89.3	0.913	0.972	69.8	73.1	0.714	0.765
	3	60.4	70.2	0.650	0.730	89.0	94.0	0.914	0.971	69.3	72.0	0.706	0.749
	\emptyset 1	84.5	82.0	0.832	0.894	94.0	90.5	0.922	0.979	71.8	76.4	0.740	0.796
	2	81.2	85.5	0.833	0.903	91.3	94.0	0.926	0.981	74.8	76.7	0.757	0.810
	3	81.8	86.0	0.838	0.906	92.8	95.0	0.939	0.985	76.8	77.3	0.771	0.820
20	1	76.9	75.4	0.761	0.817	87.5	90.0	0.887	0.954	72.3	67.3	0.697	0.757
	Δ 2	76.9	72.5	0.746	0.810	91.0	88.0	0.895	0.962	70.1	70.9	0.705	0.760
	3	74.7	73.7	0.742	0.810	89.5	89.8	0.896	0.961	67.6	72.4	0.699	0.756
	∇ 1	82.8	69.2	0.754	0.793	87.8	88.3	0.880	0.954	72.0	69.8	0.709	0.757
	2	78.2	65.7	0.714	0.733	94.8	84.3	0.892	0.963	69.4	71.4	0.704	0.750
	3	66.8	62.1	0.643	0.685	86.3	91.5	0.888	0.962	74.6	62.9	0.682	0.723
	\emptyset 1	81.0	78.0	0.795	0.840	87.8	92.3	0.899	0.963	72.8	70.1	0.714	0.777
	2	77.9	82.8	0.803	0.850	91.5	94.5	0.930	0.976	72.1	75.8	0.739	0.797
	3	84.0	78.1	0.809	0.845	93.3	94.0	0.936	0.975	74.2	75.2	0.747	0.802

¹Die Symbole Δ , ∇ und \emptyset stehen für die Aggregationsfunktionen Maximum, Minimum und Durchschnitt.

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Gitterbasierte Merkmale (Quadratgitter)</i>														
w_g	n	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	
25	Δ	1	72.5	70.2	0.714	0.780	89.0	86.0	0.875	0.953	66.1	67.4	0.668	0.714
		2	70.0	74.5	0.722	0.788	85.8	90.5	0.881	0.956	67.9	65.3	0.666	0.715
		3	73.9	69.9	0.719	0.782	89.5	87.3	0.884	0.955	65.1	67.2	0.661	0.711
	∇	1	58.0	73.5	0.648	0.743	89.0	86.3	0.876	0.948	65.7	68.0	0.668	0.711
		2	58.5	70.1	0.638	0.703	88.8	86.0	0.874	0.951	69.8	64.1	0.668	0.706
		3	68.0	51.1	0.583	0.594	92.8	84.0	0.882	0.952	62.3	66.8	0.645	0.680
	\emptyset	1	78.9	71.8	0.752	0.800	88.8	89.3	0.890	0.957	67.2	69.1	0.682	0.736
		2	75.2	76.6	0.759	0.821	90.8	91.3	0.910	0.968	71.9	68.7	0.702	0.757
		3	74.9	75.2	0.751	0.813	91.5	91.8	0.916	0.973	73.2	68.9	0.710	0.763
30	Δ	1	62.4	62.6	0.625	0.679	79.0	85.5	0.821	0.903	65.6	62.4	0.640	0.680
		2	60.4	60.1	0.602	0.664	83.3	81.3	0.822	0.905	62.7	66.0	0.643	0.682
		3	57.5	61.6	0.595	0.661	78.0	83.8	0.808	0.891	64.9	61.4	0.631	0.673
	∇	1	70.2	53.2	0.606	0.645	79.3	87.0	0.829	0.919	61.6	67.4	0.644	0.682
		2	47.7	57.5	0.521	0.568	82.3	85.0	0.836	0.917	57.8	68.6	0.627	0.665
		3	62.9	41.8	0.503	0.492	88.3	79.0	0.834	0.912	66.2	59.3	0.626	0.642
	\emptyset	1	68.0	64.6	0.663	0.709	83.8	82.8	0.832	0.926	68.3	63.9	0.660	0.706
		2	71.9	64.8	0.682	0.718	87.5	83.0	0.852	0.937	68.2	68.7	0.684	0.727
		3	63.2	68.6	0.658	0.725	87.5	83.3	0.853	0.934	70.4	69.1	0.698	0.737
35	Δ	1	56.0	57.8	0.569	0.604	78.5	80.0	0.792	0.873	61.7	58.0	0.598	0.633
		2	60.2	56.2	0.582	0.603	82.0	77.5	0.797	0.865	58.1	61.9	0.599	0.627
		3	56.2	57.4	0.568	0.595	79.3	79.5	0.794	0.847	60.3	57.6	0.589	0.620
	∇	1	62.6	49.3	0.552	0.571	82.0	78.5	0.802	0.867	62.0	63.3	0.627	0.648
		2	44.2	50.2	0.470	0.490	82.0	77.8	0.798	0.878	56.9	64.3	0.604	0.629
		3	52.5	36.8	0.432	0.419	80.5	76.3	0.783	0.861	53.9	62.3	0.578	0.598
	\emptyset	1	60.9	59.7	0.603	0.636	77.3	83.5	0.803	0.884	60.2	66.0	0.630	0.666
		2	62.8	59.2	0.609	0.648	80.5	83.8	0.821	0.894	64.4	64.7	0.646	0.687
		3	64.2	58.2	0.610	0.640	81.3	83.8	0.825	0.893	67.1	64.7	0.659	0.698
<i>Gitterbasierte Merkmale (Dreiecksgitter)</i>														
w_g	n	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	
7	Δ	1	76.6	82.1	0.793	0.866	94.5	88.8	0.915	0.975	66.3	62.4	0.643	0.696
		2	74.2	84.3	0.789	0.869	93.5	91.5	0.925	0.976	63.3	66.2	0.647	0.697
		3	71.6	85.3	0.779	0.868	92.8	92.0	0.924	0.976	61.1	68.1	0.644	0.692
	∇	1	80.2	73.8	0.768	0.838	91.0	92.5	0.917	0.974	62.2	68.1	0.650	0.695
		2	71.2	70.2	0.707	0.788	94.0	89.3	0.916	0.976	70.3	59.3	0.644	0.686
		3	59.2	68.9	0.637	0.726	85.8	91.8	0.886	0.960	62.9	63.7	0.633	0.664
	\emptyset	1	72.5	84.7	0.781	0.873	94.3	91.3	0.927	0.980	67.9	66.4	0.672	0.723
		2	76.1	85.2	0.804	0.884	95.8	92.0	0.938	0.982	71.7	66.2	0.688	0.741
		3	76.8	85.7	0.810	0.888	96.3	92.8	0.945	0.984	72.6	65.7	0.689	0.749

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Gitterbasierte Merkmale (Dreicksgitter)</i>															
w_g	n	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC		
10	△	1	78.0	74.9	0.764	0.832	89.3	93.8	0.914	0.973	64.4	60.0	0.621	0.674	
		2	72.0	77.2	0.745	0.830	94.0	89.5	0.917	0.975	60.7	63.3	0.620	0.671	
		3	70.0	77.9	0.737	0.827	93.8	90.8	0.922	0.976	58.2	64.6	0.612	0.663	
	▽	1	63.1	78.8	0.701	0.788	93.8	91.3	0.925	0.975	59.1	66.4	0.626	0.672	
		2	71.7	60.1	0.654	0.724	89.5	95.0	0.922	0.976	70.4	57.8	0.635	0.673	
		3	59.4	57.9	0.586	0.656	93.8	92.5	0.931	0.966	61.8	60.8	0.613	0.640	
	∅	1	74.1	77.2	0.756	0.838	89.0	95.0	0.919	0.980	65.2	64.4	0.648	0.697	
		2	76.6	77.5	0.770	0.852	91.0	95.3	0.931	0.983	71.3	64.8	0.679	0.726	
		3	77.2	79.2	0.782	0.855	92.5	95.5	0.940	0.984	72.9	64.3	0.683	0.735	
	15	△	1	79.5	68.6	0.736	0.801	90.8	94.5	0.926	0.978	55.8	67.3	0.610	0.660
			2	76.0	71.1	0.735	0.801	96.8	91.0	0.938	0.981	65.7	56.9	0.610	0.667
			3	73.3	72.5	0.729	0.798	96.3	92.5	0.943	0.982	63.4	57.7	0.604	0.659
▽		1	67.7	70.2	0.689	0.765	92.8	92.3	0.925	0.974	66.3	59.6	0.628	0.663	
		2	60.2	67.0	0.634	0.697	90.8	93.8	0.922	0.977	62.8	63.9	0.633	0.664	
		3	66.0	50.9	0.575	0.608	94.5	91.8	0.931	0.973	55.2	66.8	0.605	0.640	
∅		1	77.8	72.2	0.749	0.816	97.0	91.0	0.939	0.982	68.7	58.8	0.633	0.686	
		2	82.8	71.6	0.768	0.828	92.8	96.3	0.945	0.987	62.0	70.3	0.659	0.714	
		3	80.5	72.9	0.765	0.829	93.8	96.8	0.952	0.989	64.7	70.3	0.674	0.724	
20		△	1	66.4	69.7	0.680	0.746	92.5	85.5	0.889	0.959	55.2	66.6	0.604	0.642
			2	60.2	71.9	0.656	0.745	89.0	89.5	0.892	0.961	63.8	52.7	0.577	0.641
			3	56.5	73.2	0.638	0.743	87.8	92.0	0.898	0.968	62.0	54.0	0.577	0.630
	▽	1	54.0	67.8	0.601	0.693	84.8	91.0	0.878	0.954	67.8	57.3	0.621	0.664	
		2	44.5	67.5	0.536	0.661	91.0	86.0	0.884	0.945	66.7	59.1	0.627	0.649	
		3	54.9	51.2	0.530	0.585	81.5	89.5	0.853	0.939	59.1	62.9	0.609	0.632	
	∅	1	67.2	71.1	0.691	0.761	90.8	88.8	0.897	0.963	58.4	69.6	0.635	0.678	
		2	71.7	71.4	0.715	0.785	92.5	89.3	0.908	0.967	63.3	68.6	0.658	0.704	
		3	70.9	73.2	0.720	0.793	92.5	90.0	0.912	0.969	66.0	69.2	0.676	0.721	
	25	△	1	62.8	60.5	0.616	0.667	80.3	88.3	0.841	0.933	52.3	65.9	0.583	0.620
			2	54.7	64.2	0.590	0.663	89.5	82.5	0.859	0.939	60.9	52.2	0.562	0.619
			3	51.2	65.7	0.575	0.661	89.0	85.0	0.870	0.943	57.9	54.3	0.561	0.606
▽		1	53.3	58.2	0.556	0.622	90.3	82.5	0.862	0.931	66.2	54.7	0.599	0.638	
		2	45.6	53.1	0.491	0.555	86.0	86.5	0.862	0.925	65.9	58.0	0.617	0.641	
		3	51.5	37.5	0.434	0.469	91.8	80.0	0.855	0.905	59.4	60.1	0.598	0.611	
∅		1	64.6	63.4	0.640	0.690	81.5	90.8	0.859	0.943	55.7	68.7	0.615	0.657	
		2	68.2	62.9	0.655	0.695	88.3	91.8	0.900	0.960	61.7	68.4	0.649	0.688	
		3	69.2	63.8	0.664	0.692	90.8	90.8	0.908	0.960	64.1	67.8	0.659	0.695	
30		△	1	42.1	60.8	0.498	0.576	89.5	77.0	0.828	0.912	51.1	59.3	0.549	0.588
			2	61.4	48.5	0.542	0.574	87.8	82.0	0.848	0.917	61.0	46.8	0.530	0.583
			3	58.5	49.8	0.538	0.569	86.5	86.5	0.865	0.924	56.4	48.3	0.521	0.567
	▽	1	56.8	45.4	0.505	0.519	79.0	85.5	0.821	0.908	55.6	61.9	0.586	0.612	
		2	47.3	39.5	0.430	0.450	87.8	78.0	0.826	0.896	55.1	61.4	0.581	0.598	
		3	59.6	26.2	0.364	0.383	93.8	71.3	0.810	0.880	63.6	49.4	0.556	0.566	

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Gitterbasierte Merkmale (Dreicksgitter)</i>															
w_g	n	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC		
30	1	43.5	61.8	0.510	0.600	89.3	82.8	0.859	0.927	57.3	62.2	0.597	0.630		
	∅	2	52.1	60.8	0.561	0.617	91.5	80.5	0.856	0.933	63.8	61.2	0.625	0.660	
	3	52.8	61.6	0.569	0.621	92.0	82.3	0.869	0.937	66.7	60.7	0.635	0.670		
35	1	57.9	42.2	0.488	0.489	67.0	81.3	0.734	0.810	48.7	54.7	0.515	0.540		
	Δ	2	52.5	43.5	0.476	0.486	76.5	65.5	0.706	0.800	56.8	42.7	0.487	0.533	
	3	50.4	44.3	0.472	0.479	74.0	67.8	0.707	0.787	53.6	44.6	0.486	0.524		
35	1	51.3	37.8	0.436	0.438	73.3	74.5	0.739	0.818	53.0	55.1	0.540	0.560		
	∇	2	40.5	33.2	0.365	0.365	85.3	64.5	0.734	0.818	53.7	56.6	0.551	0.557	
	3	58.2	22.0	0.319	0.327	86.8	57.0	0.688	0.779	45.9	59.3	0.518	0.541		
35	1	35.5	53.8	0.428	0.519	82.3	67.5	0.741	0.841	54.4	56.4	0.554	0.581		
	∅	2	45.3	52.8	0.488	0.523	70.3	85.3	0.770	0.848	60.8	55.6	0.580	0.611	
	3	45.5	52.2	0.487	0.523	74.0	85.5	0.793	0.856	65.1	55.7	0.600	0.630		
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
w	q	n	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	P	R	F_1	AUC	
7	3	1	71.5	76.4	0.739	0.793	85.5	88.8	0.871	0.942	60.0	66.2	0.630	0.664	
		Δ	2	64.6	78.2	0.708	0.774	92.0	83.8	0.877	0.945	67.9	58.2	0.627	0.664
		3	81.3	68.8	0.746	0.773	90.8	84.8	0.876	0.944	65.4	60.1	0.627	0.659	
	3	1	67.4	79.1	0.728	0.822	90.3	85.3	0.877	0.946	64.4	62.0	0.632	0.668	
		∇	2	76.4	69.5	0.728	0.764	83.8	90.3	0.869	0.954	59.4	65.7	0.624	0.664
		3	66.5	68.8	0.676	0.712	88.0	86.3	0.871	0.946	64.2	59.1	0.616	0.647	
	3	1	73.6	77.8	0.756	0.837	83.5	91.0	0.871	0.952	69.3	59.6	0.641	0.681	
		∅	2	74.2	77.5	0.758	0.841	85.8	92.5	0.890	0.963	61.2	69.9	0.653	0.701
		3	74.8	78.1	0.764	0.841	88.3	92.8	0.904	0.964	63.1	70.4	0.666	0.711	
7	4	1	73.7	83.5	0.783	0.871	88.0	92.3	0.901	0.965	67.1	56.4	0.613	0.670	
		Δ	2	83.8	77.4	0.805	0.875	92.3	89.3	0.907	0.966	61.3	59.3	0.603	0.659
		3	78.2	78.8	0.785	0.856	92.0	90.3	0.911	0.968	57.7	60.6	0.591	0.645	
	4	1	79.8	79.4	0.796	0.867	93.0	88.5	0.907	0.968	62.2	63.7	0.629	0.682	
		∇	2	74.2	76.2	0.752	0.822	89.8	92.0	0.909	0.967	58.7	67.7	0.628	0.684
		3	60.1	67.4	0.635	0.758	94.3	88.8	0.914	0.961	63.8	61.4	0.626	0.668	
	4	1	86.3	78.7	0.823	0.887	94.0	88.3	0.910	0.973	67.0	60.9	0.638	0.696	
		∅	2	76.2	86.2	0.808	0.898	90.3	94.8	0.924	0.978	69.8	60.9	0.650	0.714
		3	76.2	86.3	0.810	0.903	93.3	95.5	0.944	0.984	71.4	61.1	0.659	0.722	
7	8	1	81.5	83.0	0.823	0.884	92.8	90.3	0.915	0.974	69.8	67.7	0.687	0.735	
		Δ	2	79.4	84.9	0.821	0.889	92.0	93.5	0.927	0.980	67.2	71.0	0.691	0.734
		3	82.7	76.2	0.793	0.868	90.8	94.3	0.925	0.980	64.4	72.2	0.681	0.730	
	8	1	83.1	81.3	0.822	0.890	91.0	91.0	0.910	0.969	69.6	69.1	0.693	0.737	
		∇	2	79.5	76.8	0.782	0.840	88.0	92.5	0.902	0.959	67.7	71.1	0.693	0.739
		3	66.2	72.4	0.691	0.769	90.8	89.3	0.900	0.944	71.8	65.1	0.683	0.720	
	8	1	85.9	83.7	0.848	0.907	92.3	91.5	0.919	0.976	71.9	70.2	0.710	0.758	
		∅	2	88.2	83.2	0.856	0.914	93.8	92.8	0.932	0.981	75.6	69.9	0.726	0.775
		3	88.4	84.7	0.865	0.914	95.3	93.3	0.942	0.983	76.7	70.4	0.734	0.782	

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
7	10	△ 1	84.7	83.6	0.842	0.908	90.8	83.8	0.871	0.946	70.0	67.9	0.689	0.734	
		△ 2	85.8	82.9	0.844	0.904	88.8	87.8	0.882	0.946	67.3	71.6	0.694	0.734	
		△ 3	83.6	84.2	0.839	0.896	86.5	89.3	0.879	0.944	64.9	72.8	0.686	0.728	
	▽	▽ 1	82.6	82.7	0.827	0.903	84.5	84.5	0.845	0.934	69.6	68.2	0.689	0.735	
		▽ 2	78.5	79.5	0.790	0.837	80.5	87.3	0.837	0.937	67.4	69.2	0.683	0.724	
		▽ 3	69.9	72.9	0.714	0.794	83.8	84.5	0.841	0.933	62.2	70.0	0.659	0.704	
	∅	∅ 1	86.2	83.9	0.851	0.924	89.3	84.0	0.865	0.947	72.0	69.1	0.705	0.755	
		∅ 2	86.4	84.0	0.852	0.926	89.8	85.3	0.874	0.952	75.4	69.3	0.723	0.769	
		∅ 3	86.3	85.8	0.860	0.928	90.5	85.0	0.877	0.950	77.0	69.0	0.728	0.776	
	7	12	△ 1	83.8	81.0	0.824	0.886	89.3	92.0	0.906	0.961	69.9	67.8	0.688	0.729
			△ 2	80.4	78.3	0.793	0.860	92.8	91.3	0.920	0.966	65.7	70.7	0.681	0.728
			△ 3	79.1	79.3	0.792	0.856	92.0	92.3	0.921	0.968	63.1	71.9	0.672	0.724
▽		▽ 1	80.8	79.5	0.801	0.869	93.8	87.8	0.907	0.949	69.3	67.4	0.684	0.724	
		▽ 2	71.2	72.7	0.719	0.795	90.5	91.0	0.907	0.941	67.9	69.3	0.686	0.720	
		▽ 3	66.7	67.3	0.670	0.738	92.5	89.0	0.907	0.933	73.1	61.9	0.670	0.701	
∅	∅ 1	84.6	81.7	0.831	0.899	88.5	93.0	0.907	0.959	72.7	68.9	0.707	0.745		
	∅ 2	82.0	83.4	0.827	0.900	91.0	94.0	0.925	0.968	76.0	68.9	0.723	0.763		
	∅ 3	81.3	84.2	0.827	0.899	91.8	94.8	0.932	0.972	67.3	75.9	0.714	0.772		
7	16	△ 1	82.1	78.1	0.800	0.868	85.3	87.0	0.861	0.931	62.0	66.2	0.640	0.687	
		△ 2	76.5	80.6	0.785	0.859	89.0	85.3	0.871	0.943	67.4	61.0	0.641	0.686	
		△ 3	77.2	78.2	0.777	0.842	87.5	87.5	0.875	0.944	64.7	62.4	0.635	0.678	
	▽	▽ 1	80.6	76.5	0.785	0.854	82.3	85.5	0.838	0.907	61.4	64.9	0.631	0.674	
		▽ 2	74.6	73.4	0.740	0.794	85.5	79.5	0.824	0.883	59.4	65.7	0.624	0.667	
		▽ 3	64.3	67.3	0.658	0.716	79.0	82.5	0.807	0.860	65.1	58.4	0.616	0.650	
∅	∅ 1	79.2	81.2	0.802	0.883	85.3	87.0	0.861	0.936	65.0	66.9	0.659	0.705		
	∅ 2	81.1	81.2	0.811	0.888	87.3	89.3	0.882	0.943	70.1	66.9	0.685	0.729		
	∅ 3	81.1	81.9	0.815	0.889	88.0	89.5	0.887	0.949	71.7	67.3	0.694	0.738		
7	20	△ 1	73.7	76.4	0.750	0.819	87.3	80.0	0.835	0.923	59.8	62.1	0.609	0.651	
		△ 2	73.9	75.0	0.745	0.810	82.8	84.3	0.835	0.912	65.8	56.4	0.608	0.646	
		△ 3	70.2	76.5	0.732	0.804	80.8	86.5	0.835	0.908	64.1	57.9	0.608	0.642	
	▽	▽ 1	71.4	74.5	0.729	0.797	81.8	81.5	0.816	0.901	60.2	61.6	0.609	0.646	
		▽ 2	71.2	65.2	0.681	0.733	83.8	73.5	0.783	0.880	51.3	66.1	0.578	0.634	
		▽ 3	57.6	60.4	0.590	0.675	75.5	83.0	0.791	0.882	58.3	57.8	0.581	0.612	
∅	∅ 1	76.8	75.5	0.761	0.834	86.8	82.5	0.846	0.922	63.7	62.9	0.633	0.678		
	∅ 2	79.2	76.7	0.779	0.854	85.8	82.5	0.841	0.914	69.2	63.3	0.661	0.701		
	∅ 3	79.3	78.4	0.788	0.861	88.0	84.8	0.863	0.926	71.8	62.7	0.669	0.712		
10	3	△ 1	71.1	73.5	0.722	0.783	85.3	87.5	0.864	0.937	58.1	65.9	0.618	0.650	
		△ 2	67.1	75.4	0.710	0.775	82.0	90.8	0.862	0.942	65.6	57.4	0.612	0.647	
		△ 3	79.9	68.2	0.736	0.774	89.5	84.0	0.867	0.942	63.7	59.4	0.615	0.642	
	▽	▽ 1	67.4	77.3	0.720	0.803	88.0	84.8	0.863	0.936	63.2	61.6	0.624	0.658	
		▽ 2	76.6	66.5	0.712	0.750	82.8	90.0	0.862	0.948	59.2	64.8	0.619	0.655	
		▽ 3	66.5	66.2	0.664	0.714	88.8	87.3	0.880	0.948	64.3	59.0	0.616	0.643	

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
10	3	∅	1	74.2	78.2	0.762	0.826	91.5	82.3	0.866	0.946	67.3	58.8	0.628	0.671
			2	75.2	78.6	0.769	0.829	84.0	92.3	0.879	0.958	59.3	69.7	0.641	0.692
			3	76.2	79.4	0.777	0.831	87.5	93.0	0.902	0.963	61.6	70.2	0.656	0.703
		Δ	1	73.6	82.3	0.777	0.864	85.5	91.5	0.884	0.946	66.2	57.2	0.614	0.666
			2	81.7	75.1	0.782	0.846	90.3	88.3	0.892	0.956	61.7	60.4	0.610	0.658
			3	80.2	76.5	0.783	0.846	90.0	89.3	0.896	0.957	58.6	61.7	0.601	0.648
10	4	▽	1	80.3	78.6	0.795	0.863	91.0	87.0	0.890	0.957	62.6	63.7	0.631	0.680
			2	74.2	74.8	0.745	0.808	90.0	91.5	0.907	0.962	58.0	67.4	0.624	0.677
			3	65.8	70.1	0.679	0.760	93.3	88.3	0.907	0.953	63.3	61.6	0.624	0.666
		∅	1	86.8	77.4	0.818	0.881	92.5	87.0	0.897	0.959	66.6	61.2	0.638	0.691
			2	88.8	78.5	0.833	0.889	89.3	93.8	0.914	0.972	69.2	61.4	0.651	0.708
			3	88.8	78.7	0.835	0.894	91.0	95.3	0.931	0.976	71.3	61.8	0.662	0.719
		Δ	1	80.9	80.8	0.809	0.877	89.5	93.8	0.916	0.975	70.3	67.6	0.689	0.731
			2	73.7	83.5	0.783	0.863	92.5	93.3	0.929	0.982	67.6	71.1	0.693	0.733
			3	81.0	74.1	0.774	0.848	90.8	94.8	0.927	0.982	64.8	72.4	0.684	0.727
10	8	▽	1	84.4	79.2	0.817	0.869	92.8	89.3	0.910	0.969	70.3	68.6	0.694	0.735
			2	78.8	74.2	0.764	0.830	89.5	92.8	0.911	0.959	67.7	70.3	0.690	0.735
			3	67.2	72.4	0.697	0.754	92.3	90.3	0.912	0.951	72.4	64.4	0.682	0.716
		∅	1	88.5	81.3	0.848	0.895	93.8	90.0	0.918	0.975	72.1	69.4	0.708	0.754
			2	88.9	82.0	0.853	0.897	95.0	92.5	0.937	0.983	75.2	70.0	0.725	0.773
			3	85.4	82.6	0.840	0.896	95.0	93.5	0.942	0.983	76.4	70.3	0.733	0.781
		Δ	1	82.4	84.2	0.833	0.900	90.5	84.0	0.871	0.939	70.0	66.8	0.684	0.731
			2	85.4	81.7	0.835	0.900	89.3	87.8	0.885	0.946	66.3	70.0	0.681	0.728
			3	82.5	82.8	0.826	0.889	86.0	89.8	0.878	0.942	62.9	71.4	0.669	0.720
10	10	▽	1	82.6	80.0	0.813	0.890	86.5	83.0	0.847	0.937	69.2	66.8	0.680	0.725
			2	74.5	78.7	0.766	0.837	84.0	86.5	0.852	0.941	68.1	68.3	0.682	0.715
			3	71.9	72.8	0.724	0.788	87.0	83.8	0.853	0.936	61.6	69.2	0.652	0.698
		∅	1	83.5	84.7	0.841	0.911	89.3	84.3	0.867	0.946	71.4	67.9	0.696	0.749
			2	84.8	85.8	0.853	0.922	84.5	91.3	0.877	0.953	74.7	68.0	0.712	0.762
			3	84.2	86.5	0.854	0.923	86.0	91.8	0.888	0.953	68.4	76.3	0.722	0.772
		Δ	1	80.8	80.4	0.806	0.874	87.3	91.8	0.894	0.958	70.2	66.3	0.682	0.725
			2	80.6	78.5	0.795	0.857	93.5	88.8	0.911	0.964	66.6	69.7	0.681	0.725
			3	79.2	79.5	0.793	0.853	92.8	90.3	0.915	0.967	62.9	71.1	0.667	0.713
10	12	▽	1	78.9	78.8	0.788	0.851	86.0	91.8	0.888	0.939	69.0	67.0	0.680	0.717
			2	69.5	72.8	0.711	0.774	92.0	89.0	0.905	0.931	68.1	67.2	0.677	0.710
			3	62.4	63.6	0.630	0.709	94.0	87.3	0.905	0.926	72.8	60.4	0.660	0.690
		∅	1	83.5	80.5	0.820	0.885	88.3	92.8	0.904	0.958	72.2	68.3	0.702	0.741
			2	79.4	82.7	0.810	0.887	92.5	93.0	0.927	0.962	75.6	68.0	0.716	0.758
			3	83.2	80.1	0.816	0.886	92.8	94.0	0.934	0.968	66.6	75.4	0.707	0.762
10	16	Δ	1	78.5	74.5	0.764	0.845	86.8	83.8	0.852	0.919	61.7	65.0	0.633	0.678
			2	75.4	77.5	0.764	0.844	84.3	89.3	0.867	0.933	66.6	60.0	0.631	0.675
			3	76.8	74.0	0.754	0.822	86.8	82.8	0.847	0.929	63.2	61.7	0.624	0.668

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
10	16	1	68.7	73.8	0.711	0.795	84.8	84.5	0.846	0.900	61.2	64.4	0.628	0.665	
		▽	2	70.3	67.0	0.686	0.756	80.5	85.0	0.827	0.875	59.8	64.6	0.621	0.659
		3	63.9	60.6	0.622	0.662	83.3	81.5	0.824	0.856	65.4	57.1	0.610	0.638	
	∅	1	75.2	79.1	0.771	0.855	88.0	85.3	0.866	0.928	64.2	66.1	0.652	0.698	
		2	78.4	78.5	0.784	0.867	89.5	86.5	0.880	0.938	69.0	66.2	0.676	0.722	
		3	77.2	78.2	0.777	0.867	88.8	87.0	0.879	0.935	70.4	65.7	0.680	0.728	
10	20	1	67.8	72.0	0.698	0.783	81.3	86.5	0.838	0.925	60.3	60.1	0.602	0.637	
		△	2	71.1	71.5	0.713	0.781	87.3	82.5	0.848	0.921	54.9	63.7	0.590	0.627
		3	68.8	73.4	0.710	0.774	85.3	84.5	0.849	0.918	62.0	54.9	0.582	0.620	
	▽	1	66.2	71.7	0.688	0.756	84.3	78.5	0.813	0.911	60.9	58.9	0.599	0.629	
		2	61.8	66.2	0.639	0.704	77.5	84.0	0.806	0.898	52.1	64.1	0.575	0.616	
		3	49.8	61.0	0.549	0.629	79.0	80.5	0.797	0.886	59.0	54.3	0.566	0.585	
∅	1	71.0	72.8	0.719	0.798	79.0	87.0	0.828	0.927	63.9	61.1	0.625	0.663		
	2	75.8	75.3	0.755	0.832	82.5	87.3	0.848	0.937	69.1	60.7	0.646	0.685		
	3	76.5	74.8	0.757	0.835	82.8	88.5	0.855	0.939	59.4	69.2	0.640	0.694		
20	3	1	72.5	69.9	0.712	0.754	82.0	85.0	0.835	0.907	55.2	63.6	0.591	0.621	
		△	2	67.1	72.5	0.697	0.742	87.8	79.3	0.833	0.916	62.8	55.1	0.587	0.620
		3	64.0	73.8	0.686	0.737	86.3	81.8	0.839	0.916	60.2	57.0	0.586	0.613	
	▽	1	66.2	72.0	0.690	0.744	88.0	80.5	0.841	0.919	62.1	57.7	0.598	0.631	
		2	58.7	66.3	0.623	0.687	82.8	87.5	0.851	0.937	58.1	60.6	0.593	0.630	
		3	67.3	56.1	0.612	0.637	89.0	83.8	0.863	0.936	62.7	54.7	0.584	0.616	
∅	1	72.2	72.3	0.722	0.777	80.8	88.8	0.846	0.923	65.2	56.6	0.606	0.641		
	2	72.9	72.6	0.728	0.782	82.5	90.5	0.863	0.937	57.4	66.9	0.618	0.660		
	3	74.4	72.9	0.736	0.787	86.5	91.0	0.887	0.946	58.8	67.2	0.627	0.668		
20	4	1	71.8	73.6	0.727	0.794	85.3	88.0	0.866	0.941	53.8	64.8	0.588	0.633	
		△	2	65.5	75.8	0.702	0.789	89.5	83.8	0.865	0.945	61.2	56.1	0.586	0.626
		3	63.8	77.2	0.698	0.788	88.3	85.8	0.870	0.945	58.0	58.1	0.581	0.617	
	▽	1	65.4	75.9	0.703	0.782	90.3	84.5	0.873	0.948	61.9	58.0	0.599	0.645	
		2	62.0	71.8	0.665	0.739	88.5	88.3	0.884	0.939	58.2	60.9	0.595	0.642	
		3	69.1	60.4	0.644	0.683	84.5	89.5	0.869	0.933	65.2	54.1	0.591	0.632	
∅	1	70.2	77.6	0.737	0.815	84.5	91.0	0.876	0.953	64.9	57.0	0.607	0.656		
	2	72.6	76.8	0.746	0.825	86.3	91.5	0.888	0.960	67.8	57.4	0.622	0.676		
	3	71.9	76.8	0.743	0.825	88.3	92.0	0.901	0.965	58.9	69.3	0.637	0.690		
20	8	1	72.2	70.8	0.715	0.791	88.5	91.0	0.897	0.957	69.9	62.2	0.658	0.704	
		△	2	67.2	73.5	0.702	0.782	92.8	88.0	0.903	0.966	66.6	66.1	0.663	0.707
		3	64.2	74.8	0.691	0.775	91.8	89.8	0.907	0.967	62.9	67.9	0.653	0.698	
	▽	1	74.5	69.8	0.720	0.794	86.0	91.5	0.887	0.941	70.3	62.7	0.663	0.704	
		2	68.2	62.2	0.650	0.726	89.0	89.8	0.894	0.943	70.6	62.2	0.661	0.705	
		3	53.6	55.4	0.545	0.638	91.5	85.5	0.884	0.937	65.0	63.6	0.643	0.683	
∅	1	76.9	71.2	0.740	0.820	88.5	91.8	0.901	0.957	72.0	64.4	0.680	0.725		
	2	78.4	71.7	0.749	0.821	89.8	94.0	0.918	0.963	66.8	72.4	0.695	0.748		
	3	79.0	71.5	0.751	0.818	90.3	93.5	0.918	0.968	69.3	72.9	0.711	0.754		

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
20	10	△	1	78.6	74.3	0.764	0.834	84.5	84.5	0.845	0.917	67.0	61.2	0.640	0.684
		2	74.5	78.2	0.763	0.836	82.0	88.5	0.851	0.923	63.6	65.0	0.643	0.685	
		3	72.4	78.9	0.755	0.829	88.0	84.8	0.863	0.926	61.0	66.8	0.638	0.678	
	▽	1	76.1	71.5	0.737	0.815	80.3	84.0	0.821	0.916	68.9	60.2	0.643	0.686	
		2	71.5	67.0	0.692	0.738	79.5	84.8	0.820	0.910	68.0	61.1	0.644	0.674	
		3	62.4	56.7	0.594	0.661	82.8	81.0	0.819	0.904	62.0	62.1	0.621	0.648	
	∅	1	80.2	74.9	0.775	0.850	83.5	85.8	0.846	0.929	69.9	62.0	0.657	0.707	
		2	82.6	74.5	0.783	0.859	85.5	86.3	0.859	0.935	65.3	71.7	0.684	0.727	
		3	81.5	74.5	0.778	0.858	87.0	87.3	0.871	0.938	67.3	71.1	0.692	0.734	
20	12	△	1	73.9	68.3	0.710	0.764	89.0	84.5	0.867	0.932	58.2	68.3	0.629	0.681
		2	66.5	71.3	0.688	0.751	87.5	88.5	0.880	0.936	63.9	63.2	0.636	0.675	
		3	61.3	72.2	0.663	0.735	85.5	89.8	0.876	0.938	60.2	64.8	0.624	0.666	
	▽	1	70.8	66.6	0.686	0.745	90.3	85.8	0.879	0.905	58.6	67.1	0.625	0.675	
		2	79.7	53.4	0.639	0.700	94.5	80.0	0.866	0.883	68.8	59.1	0.636	0.670	
		3	82.5	40.2	0.541	0.641	97.3	74.8	0.845	0.860	74.2	51.3	0.607	0.649	
	∅	1	73.3	70.1	0.717	0.782	90.5	86.3	0.883	0.930	59.6	69.8	0.643	0.698	
		2	75.3	69.8	0.725	0.788	92.5	87.0	0.897	0.938	64.2	69.9	0.669	0.718	
		3	74.3	71.1	0.727	0.788	87.0	92.5	0.897	0.938	66.3	69.6	0.679	0.725	
20	16	△	1	63.3	64.1	0.637	0.704	82.3	83.5	0.829	0.882	60.0	56.9	0.584	0.619
		2	58.2	66.5	0.621	0.695	87.8	78.8	0.830	0.897	55.6	60.4	0.579	0.616	
		3	71.8	60.1	0.654	0.680	86.0	82.3	0.841	0.894	61.3	52.7	0.567	0.610	
	▽	1	61.1	58.3	0.597	0.674	80.5	82.5	0.815	0.854	63.2	54.6	0.586	0.617	
		2	72.5	47.1	0.571	0.643	84.8	77.5	0.810	0.831	61.7	53.1	0.571	0.605	
		3	76.5	35.8	0.488	0.593	87.8	69.8	0.777	0.803	67.3	45.2	0.541	0.589	
	∅	1	66.4	63.3	0.648	0.716	82.0	84.5	0.832	0.883	64.2	57.0	0.604	0.643	
		2	70.4	64.2	0.671	0.732	84.0	86.3	0.851	0.898	58.1	65.8	0.617	0.665	
		3	70.1	64.5	0.672	0.737	86.5	86.5	0.865	0.909	60.2	65.0	0.625	0.674	
20	20	△	1	56.2	60.0	0.580	0.637	75.0	83.5	0.790	0.878	58.2	51.3	0.546	0.569
		2	50.1	63.6	0.560	0.651	81.0	77.3	0.791	0.883	54.8	54.7	0.547	0.568	
		3	67.3	56.2	0.612	0.629	76.5	79.3	0.779	0.865	52.0	56.1	0.540	0.561	
	▽	1	50.4	63.8	0.563	0.624	75.0	77.8	0.764	0.859	61.3	48.8	0.543	0.559	
		2	59.3	46.9	0.524	0.541	81.0	71.3	0.758	0.855	54.2	51.8	0.530	0.548	
		3	42.8	42.9	0.429	0.468	69.8	77.5	0.734	0.814	41.1	56.3	0.475	0.515	
	∅	1	60.8	61.2	0.610	0.657	84.0	73.5	0.784	0.879	51.0	61.0	0.556	0.596	
		2	64.7	61.5	0.631	0.679	86.3	75.8	0.807	0.900	57.2	60.8	0.589	0.623	
		3	64.8	62.2	0.635	0.685	88.5	76.5	0.821	0.899	59.7	59.9	0.598	0.630	
35	3	△	1	59.5	55.7	0.576	0.581	76.3	73.0	0.746	0.810	47.1	56.2	0.513	0.534
		2	52.8	58.1	0.553	0.573	73.8	79.3	0.764	0.815	53.9	48.1	0.508	0.527	
		3	50.3	59.8	0.547	0.573	72.0	81.3	0.763	0.812	51.0	49.6	0.503	0.519	
	▽	1	49.2	55.5	0.521	0.563	71.0	77.3	0.740	0.807	59.3	49.3	0.539	0.553	
		2	49.8	48.9	0.493	0.511	78.5	71.5	0.748	0.828	58.1	49.0	0.532	0.544	
		3	36.2	45.7	0.404	0.460	72.0	76.0	0.739	0.808	52.6	50.0	0.512	0.536	

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
35	3	∅	1	55.5	57.8	0.566	0.602	75.5	77.0	0.762	0.813	58.8	48.8	0.533	0.556
			2	60.5	57.9	0.592	0.624	80.0	80.5	0.802	0.848	51.2	59.1	0.549	0.575
			3	61.5	57.9	0.596	0.633	81.0	79.8	0.804	0.855	54.4	58.9	0.566	0.588
		Δ	1	56.2	58.1	0.571	0.613	81.0	82.3	0.816	0.866	46.1	55.3	0.503	0.518
			2	51.7	60.3	0.557	0.611	82.8	75.5	0.790	0.862	53.0	46.8	0.497	0.505
			3	49.2	61.4	0.546	0.605	81.8	78.3	0.800	0.860	48.9	48.1	0.485	0.488
35	4	∇	1	56.5	56.8	0.567	0.616	80.0	82.8	0.814	0.877	45.3	57.4	0.507	0.541
			2	54.4	47.5	0.507	0.548	77.8	83.5	0.805	0.869	56.0	48.0	0.517	0.536
			3	51.5	46.6	0.490	0.518	85.0	79.5	0.822	0.868	51.8	48.8	0.502	0.518
		∅	1	60.2	60.7	0.604	0.650	81.0	84.0	0.825	0.885	58.2	47.6	0.524	0.547
			2	63.9	61.7	0.628	0.664	82.3	84.0	0.831	0.901	50.3	57.7	0.538	0.565
			3	64.6	60.3	0.624	0.666	83.8	83.5	0.836	0.911	52.8	57.9	0.552	0.579
35	8	Δ	1	51.2	57.3	0.541	0.583	88.0	81.8	0.848	0.901	50.7	58.2	0.542	0.579
			2	58.5	52.5	0.553	0.581	85.3	86.5	0.859	0.907	58.0	51.9	0.548	0.574
			3	56.2	53.7	0.549	0.575	83.8	88.3	0.859	0.901	55.1	53.8	0.544	0.569
		∇	1	54.2	52.4	0.533	0.576	79.3	86.3	0.826	0.880	57.9	56.2	0.570	0.590
			2	44.2	40.4	0.422	0.490	84.0	81.3	0.826	0.858	57.8	54.0	0.558	0.584
			3	56.3	30.8	0.398	0.480	86.5	75.3	0.805	0.831	54.4	53.0	0.537	0.572
		∅	1	54.2	57.5	0.558	0.614	88.0	81.5	0.846	0.909	57.4	58.7	0.580	0.608
			2	57.7	57.9	0.578	0.626	88.5	82.3	0.853	0.913	62.2	58.4	0.603	0.629
			3	60.5	58.9	0.597	0.635	90.3	83.5	0.867	0.917	64.9	58.3	0.614	0.644
35	10	Δ	1	54.3	58.5	0.563	0.620	72.5	74.3	0.734	0.805	54.6	56.6	0.555	0.583
			2	50.1	59.9	0.546	0.618	76.3	68.3	0.720	0.801	60.9	51.8	0.560	0.584
			3	63.9	53.8	0.585	0.619	75.0	71.5	0.732	0.807	57.8	52.9	0.552	0.575
		∇	1	54.1	55.1	0.546	0.578	69.8	75.0	0.723	0.809	58.7	52.9	0.556	0.575
			2	42.2	51.9	0.466	0.514	76.8	69.0	0.727	0.816	55.8	53.0	0.544	0.560
			3	46.0	39.2	0.423	0.429	69.3	69.5	0.694	0.804	53.7	49.7	0.516	0.528
		∅	1	59.2	59.0	0.591	0.636	71.0	76.8	0.738	0.816	58.6	56.7	0.576	0.606
			2	63.9	58.2	0.609	0.650	75.0	78.3	0.766	0.841	63.4	56.2	0.596	0.627
			3	65.6	59.5	0.624	0.653	76.3	78.5	0.774	0.842	64.3	56.0	0.599	0.634
35	12	Δ	1	44.2	56.5	0.496	0.566	81.5	78.8	0.801	0.854	51.3	54.9	0.531	0.552
			2	56.1	50.3	0.530	0.548	79.3	83.5	0.813	0.869	57.6	50.4	0.538	0.550
			3	54.6	51.5	0.530	0.549	76.8	85.3	0.808	0.872	54.4	51.6	0.530	0.543
		∇	1	64.5	45.5	0.533	0.603	90.3	65.5	0.759	0.795	57.7	50.8	0.540	0.571
			2	74.7	34.7	0.474	0.579	96.8	56.0	0.709	0.769	69.7	40.1	0.509	0.567
			3	75.5	26.2	0.388	0.539	99.0	48.0	0.647	0.736	75.4	31.0	0.439	0.546
		∅	1	52.8	54.5	0.536	0.611	81.5	78.8	0.801	0.843	53.4	56.1	0.547	0.585
			2	56.8	54.3	0.555	0.622	85.8	80.5	0.830	0.861	59.6	56.8	0.581	0.611
			3	56.8	54.6	0.557	0.624	88.0	79.3	0.834	0.857	62.3	55.7	0.588	0.619
35	16	Δ	1	56.0	49.0	0.523	0.549	71.8	72.5	0.721	0.766	44.2	51.1	0.474	0.499
			2	50.9	50.5	0.507	0.538	68.3	80.0	0.737	0.779	51.0	45.4	0.481	0.491
			3	46.1	51.3	0.486	0.523	73.0	67.3	0.700	0.778	46.9	46.6	0.467	0.480

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
35	16	1	49.8	40.8	0.449	0.531	80.5	55.5	0.657	0.684	50.9	45.4	0.480	0.513	
		∇	2	66.2	30.1	0.414	0.530	86.5	44.8	0.590	0.656	63.6	34.3	0.446	0.513
		3	68.2	23.0	0.344	0.494	87.0	35.8	0.507	0.618	70.1	25.3	0.372	0.496	
	∅	1	58.2	48.1	0.526	0.578	72.5	71.8	0.721	0.735	51.1	49.9	0.505	0.533	
		2	45.4	53.2	0.490	0.585	77.5	73.5	0.754	0.768	57.6	49.3	0.531	0.556	
		3	45.6	54.1	0.495	0.586	77.3	74.8	0.760	0.776	48.2	56.6	0.521	0.566	
35	20	1	58.3	47.2	0.522	0.507	70.0	56.3	0.624	0.716	43.1	46.4	0.447	0.452	
		Δ	2	55.5	48.3	0.517	0.500	66.0	61.8	0.638	0.698	50.1	40.2	0.446	0.444
		3	53.2	49.0	0.510	0.494	64.0	64.5	0.642	0.683	46.7	41.3	0.438	0.436	
	∇	1	39.2	38.6	0.389	0.419	61.5	70.0	0.655	0.697	42.2	44.1	0.431	0.425	
		2	28.3	34.0	0.309	0.340	64.5	60.5	0.624	0.673	34.6	45.1	0.391	0.404	
		3	32.3	24.1	0.276	0.285	64.8	53.5	0.586	0.649	42.9	33.9	0.379	0.371	
∅	1	54.9	46.2	0.502	0.503	66.3	64.0	0.651	0.729	47.9	45.7	0.468	0.471		
	2	55.2	46.2	0.503	0.505	69.0	64.0	0.664	0.745	55.7	45.0	0.498	0.490		
	3	57.1	45.7	0.508	0.509	70.8	66.3	0.684	0.766	58.6	43.7	0.500	0.498		
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
7	3	1	34.4	40.1	0.370	0.381	54.5	66.8	0.600	0.637	30.0	27.1	0.285	0.271	
		Δ	2	29.4	40.6	0.341	0.373	53.3	70.5	0.607	0.632	25.4	28.6	0.269	0.264
		3	26.7	40.7	0.322	0.368	53.0	72.0	0.611	0.639	24.0	29.1	0.263	0.264	
	∇	1	37.9	35.6	0.367	0.371	60.5	48.8	0.540	0.635	11.4	38.4	0.176	0.266	
		2	28.2	36.7	0.319	0.346	63.3	44.0	0.519	0.628	14.9	30.8	0.201	0.252	
		3	30.6	29.1	0.298	0.324	65.8	40.8	0.503	0.634	19.2	26.4	0.223	0.243	
∅	1	46.2	35.5	0.401	0.394	57.5	57.5	0.575	0.643	41.9	23.7	0.302	0.277		
	2	33.7	42.5	0.376	0.391	57.5	58.0	0.577	0.638	43.4	23.3	0.304	0.281		
	3	34.5	42.1	0.379	0.391	57.8	57.8	0.577	0.643	44.1	23.6	0.307	0.283		
7	4	1	15.2	53.8	0.236	0.425	58.0	49.5	0.534	0.641	34.9	26.0	0.298	0.269	
		Δ	2	11.8	55.8	0.195	0.425	57.0	52.0	0.544	0.648	31.1	27.9	0.294	0.272
		3	10.8	59.8	0.184	0.443	56.5	53.0	0.547	0.649	28.9	28.3	0.286	0.270	
	∇	1	29.2	40.8	0.340	0.385	59.0	53.5	0.561	0.644	21.7	30.1	0.252	0.261	
		2	37.4	34.3	0.358	0.359	62.3	48.5	0.545	0.636	27.9	24.8	0.262	0.246	
		3	39.3	27.5	0.324	0.319	56.5	65.8	0.608	0.632	32.7	22.0	0.263	0.238	
∅	1	23.3	47.8	0.313	0.416	56.5	63.3	0.597	0.653	30.9	28.0	0.294	0.274		
	2	24.3	46.1	0.318	0.407	57.0	63.3	0.600	0.650	32.3	28.7	0.304	0.280		
	3	25.3	46.1	0.327	0.411	57.3	63.0	0.600	0.657	32.4	28.7	0.304	0.282		
7	8	1	30.7	41.3	0.352	0.381	61.5	47.8	0.538	0.635	32.3	27.4	0.297	0.265	
		Δ	2	42.3	35.1	0.384	0.379	60.8	50.3	0.550	0.636	30.3	28.6	0.294	0.260
		3	40.7	35.5	0.379	0.373	60.0	51.8	0.556	0.644	28.6	28.8	0.287	0.256	
	∇	1	29.1	38.6	0.332	0.367	60.0	51.0	0.551	0.628	22.1	31.2	0.259	0.263	
		2	32.3	31.9	0.321	0.335	56.8	67.5	0.617	0.628	27.4	26.1	0.268	0.249	
		3	25.8	32.1	0.286	0.317	57.8	63.0	0.603	0.616	31.9	22.2	0.262	0.234	

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
7	8	∅	1	41.3	37.9	0.395	0.391	57.3	61.0	0.591	0.639	30.7	29.8	0.302	0.274
		2	42.5	37.4	0.398	0.391	58.5	61.5	0.600	0.649	32.0	29.1	0.305	0.275	
		3	42.6	37.8	0.401	0.389	58.0	60.5	0.592	0.653	33.6	28.9	0.310	0.275	
	10	Δ	1	25.4	46.2	0.328	0.388	57.8	58.3	0.580	0.644	18.7	34.1	0.241	0.269
			2	52.6	29.2	0.375	0.381	57.3	61.8	0.594	0.649	15.4	34.3	0.213	0.260
			3	51.1	29.4	0.373	0.380	57.0	63.5	0.601	0.651	14.1	34.3	0.200	0.255
		∇	1	41.5	34.7	0.378	0.364	58.5	60.0	0.592	0.648	35.9	25.6	0.299	0.263
			2	21.5	34.1	0.264	0.331	60.0	55.0	0.574	0.643	20.7	29.7	0.244	0.247
			3	28.1	29.0	0.285	0.307	58.5	59.5	0.590	0.629	24.1	25.8	0.249	0.233
7	∅	1	35.8	41.2	0.383	0.397	58.0	60.3	0.591	0.656	29.8	29.7	0.297	0.275	
		2	36.1	40.4	0.381	0.395	59.8	60.8	0.602	0.659	31.1	29.9	0.305	0.276	
		3	36.6	40.2	0.383	0.391	60.0	59.8	0.599	0.661	31.8	29.6	0.306	0.275	
	12	Δ	1	36.4	40.0	0.381	0.394	56.3	68.0	0.616	0.665	25.1	30.0	0.273	0.252
			2	42.1	35.3	0.384	0.383	55.3	71.5	0.623	0.667	22.1	31.0	0.258	0.246
			3	40.7	35.7	0.380	0.382	54.8	73.5	0.628	0.671	20.9	31.0	0.250	0.242
		∇	1	36.3	34.8	0.355	0.366	58.0	67.8	0.625	0.673	42.0	23.9	0.305	0.260
			2	38.8	28.9	0.331	0.331	57.5	61.0	0.592	0.647	15.6	33.6	0.213	0.250
			3	24.2	27.6	0.258	0.313	58.0	55.8	0.569	0.636	18.1	28.6	0.222	0.233
7	∅	1	44.9	36.0	0.400	0.393	63.5	60.0	0.617	0.681	36.1	27.2	0.310	0.264	
		2	45.9	35.5	0.401	0.389	62.3	58.7	0.604	0.678	37.0	27.6	0.316	0.267	
		3	47.2	35.7	0.407	0.391	63.3	58.5	0.608	0.681	37.4	27.1	0.315	0.271	
	16	Δ	1	29.2	40.8	0.340	0.394	49.5	82.8	0.619	0.679	41.7	26.1	0.321	0.259
			2	44.5	34.4	0.388	0.392	73.0	39.8	0.515	0.676	39.9	27.0	0.322	0.255
			3	41.4	34.5	0.377	0.389	72.8	41.0	0.524	0.674	38.8	26.6	0.315	0.246
		∇	1	33.5	33.7	0.336	0.379	57.0	70.0	0.628	0.682	27.1	29.6	0.283	0.266
			2	29.3	29.5	0.294	0.344	57.5	64.5	0.608	0.666	31.4	25.6	0.282	0.249
			3	24.9	27.3	0.261	0.313	58.3	60.0	0.591	0.652	33.9	23.0	0.274	0.236
7	∅	1	37.5	36.5	0.370	0.400	54.5	78.0	0.642	0.688	20.3	34.4	0.256	0.276	
		2	38.2	36.2	0.371	0.395	54.8	77.0	0.640	0.685	21.8	33.3	0.263	0.269	
		3	37.6	35.5	0.365	0.390	55.0	76.5	0.640	0.683	22.6	33.4	0.269	0.267	
	20	Δ	1	36.3	36.2	0.363	0.405	63.5	68.5	0.659	0.712	24.0	31.8	0.273	0.247
			2	32.2	37.2	0.345	0.398	62.3	72.5	0.670	0.719	19.7	32.6	0.245	0.240
			3	39.3	36.0	0.376	0.402	61.0	74.3	0.670	0.719	18.6	32.4	0.236	0.237
		∇	1	38.4	34.8	0.365	0.379	55.0	73.0	0.627	0.694	40.9	24.8	0.309	0.254
			2	27.5	30.8	0.290	0.329	59.0	68.5	0.634	0.683	16.2	33.1	0.218	0.239
			3	28.5	26.5	0.275	0.310	59.5	63.5	0.614	0.674	18.8	29.3	0.229	0.228
10	∅	1	36.3	39.2	0.377	0.410	70.3	58.0	0.635	0.712	35.9	28.7	0.319	0.257	
		2	35.8	38.5	0.371	0.400	71.0	56.0	0.626	0.711	35.2	28.9	0.317	0.259	
		3	35.9	40.1	0.379	0.403	70.8	57.0	0.631	0.709	35.0	28.2	0.312	0.257	
	Δ	1	40.5	37.5	0.390	0.381	53.0	64.8	0.583	0.623	28.1	26.6	0.273	0.266	
		2	33.2	38.1	0.355	0.372	52.2	70.0	0.598	0.631	23.9	27.4	0.255	0.259	
		3	31.0	38.9	0.345	0.370	51.5	72.8	0.603	0.631	22.6	28.3	0.251	0.257	

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>														
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
10	3	1	43.2	35.3	0.388	0.378	60.3	46.5	0.525	0.618	12.8	36.3	0.189	0.263
		▽ 2	34.1	34.5	0.343	0.347	61.8	41.8	0.498	0.615	16.1	29.4	0.208	0.248
		3	38.5	30.7	0.341	0.333	64.3	38.0	0.478	0.616	21.0	24.8	0.227	0.239
	∅	1	36.0	41.2	0.384	0.392	56.3	54.8	0.555	0.627	41.2	23.6	0.300	0.277
		2	38.0	41.0	0.394	0.394	58.3	55.8	0.570	0.640	42.8	23.1	0.300	0.276
		3	39.4	40.8	0.401	0.396	57.5	55.5	0.565	0.637	44.0	23.0	0.302	0.278
10	4	1	18.2	47.8	0.263	0.405	56.8	46.3	0.510	0.629	34.4	24.9	0.289	0.261
		△ 2	14.8	49.2	0.227	0.403	55.8	48.3	0.517	0.633	32.3	25.6	0.285	0.258
		3	13.7	50.2	0.215	0.407	53.8	49.0	0.513	0.630	30.8	26.6	0.285	0.260
	▽	1	36.6	34.8	0.357	0.373	60.5	47.0	0.529	0.621	24.2	28.0	0.260	0.255
		2	27.7	35.9	0.313	0.350	56.5	64.0	0.600	0.631	31.1	23.9	0.270	0.244
		3	31.4	29.8	0.306	0.320	58.3	58.7	0.585	0.619	20.0	26.2	0.227	0.232
∅	1	30.5	42.4	0.354	0.404	56.5	56.3	0.564	0.629	32.1	26.8	0.292	0.269	
	2	32.4	43.1	0.370	0.412	58.0	55.5	0.567	0.646	34.3	26.6	0.299	0.271	
	3	33.9	41.6	0.374	0.405	58.5	56.0	0.572	0.644	34.9	27.0	0.304	0.275	
10	8	1	36.5	42.5	0.393	0.399	58.7	53.8	0.561	0.649	26.3	28.2	0.272	0.255
		△ 2	42.3	36.2	0.390	0.387	57.5	57.8	0.576	0.651	23.8	29.1	0.262	0.249
		3	40.5	36.5	0.384	0.384	57.0	60.0	0.585	0.658	22.6	29.6	0.256	0.246
	▽	1	32.0	36.8	0.343	0.386	61.5	55.8	0.585	0.639	33.0	25.9	0.290	0.260
		2	35.5	29.9	0.325	0.339	63.5	48.5	0.550	0.629	25.1	27.9	0.264	0.246
		3	23.5	30.2	0.264	0.323	65.8	44.3	0.529	0.628	28.8	24.6	0.265	0.233
∅	1	44.7	38.1	0.411	0.413	58.3	67.5	0.625	0.659	25.7	30.8	0.280	0.268	
	2	45.9	38.3	0.418	0.407	59.2	67.3	0.630	0.661	28.7	30.7	0.296	0.269	
	3	46.2	37.8	0.416	0.405	59.8	67.8	0.635	0.665	29.3	31.1	0.302	0.271	
10	10	1	40.4	39.1	0.397	0.404	59.5	56.0	0.577	0.674	30.3	27.8	0.290	0.256
		△ 2	35.8	40.1	0.378	0.390	58.7	59.2	0.590	0.673	28.4	28.1	0.283	0.249
		3	34.6	41.0	0.375	0.391	58.3	61.8	0.599	0.673	27.0	28.3	0.277	0.246
	▽	1	37.1	33.2	0.350	0.377	62.3	56.8	0.594	0.664	30.1	27.8	0.289	0.259
		2	29.8	31.9	0.308	0.339	65.3	50.0	0.566	0.658	29.2	25.9	0.275	0.244
		3	27.3	28.8	0.281	0.304	55.0	73.3	0.628	0.644	25.7	25.3	0.255	0.231
∅	1	40.3	38.0	0.391	0.410	62.5	57.5	0.599	0.678	23.0	32.3	0.269	0.267	
	2	39.0	36.8	0.379	0.397	63.0	57.8	0.603	0.680	25.3	32.6	0.285	0.270	
	3	39.6	36.5	0.380	0.394	64.3	57.8	0.608	0.684	25.9	32.1	0.287	0.269	
10	12	1	33.5	37.9	0.356	0.401	59.0	58.7	0.589	0.682	41.1	25.3	0.313	0.253
		△ 2	30.8	39.2	0.345	0.395	58.3	63.5	0.608	0.681	39.0	25.6	0.309	0.249
		3	28.9	40.2	0.336	0.395	58.3	64.5	0.612	0.682	37.9	25.7	0.306	0.244
	▽	1	34.4	33.8	0.341	0.379	62.5	58.0	0.602	0.670	28.9	28.4	0.287	0.258
		2	30.2	28.1	0.291	0.334	61.0	62.3	0.616	0.663	21.2	29.1	0.245	0.238
		3	26.4	25.2	0.258	0.296	62.5	57.3	0.598	0.647	25.2	25.4	0.253	0.225
∅	1	38.8	36.4	0.375	0.408	64.5	59.2	0.618	0.697	21.9	33.3	0.264	0.266	
	2	38.9	36.3	0.376	0.404	65.0	60.3	0.625	0.699	22.6	32.3	0.266	0.263	
	3	39.0	36.2	0.375	0.399	65.5	59.5	0.624	0.704	23.7	31.7	0.271	0.260	

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>						
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>																
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>		
10	16	1	40.7	36.3	0.384	0.410	62.8	64.0	0.634	0.707	33.4	29.3	0.313	0.268		
		△	2	35.8	37.2	0.365	0.400	60.8	67.5	0.639	0.707	30.3	29.8	0.301	0.261	
		3	34.6	37.8	0.361	0.401	65.8	59.2	0.623	0.708	29.7	30.2	0.299	0.261		
	∇	1	36.5	37.0	0.368	0.384	69.8	54.5	0.612	0.696	21.9	32.8	0.262	0.258		
		2	29.8	30.5	0.301	0.331	54.8	70.5	0.616	0.688	26.7	28.9	0.277	0.244		
		3	26.5	27.4	0.270	0.301	57.0	65.8	0.611	0.671	30.2	24.9	0.273	0.230		
	∅	1	39.8	38.3	0.390	0.413	66.3	63.8	0.650	0.718	42.7	26.1	0.324	0.270		
		2	39.6	37.8	0.387	0.403	66.0	63.5	0.647	0.716	42.7	25.8	0.321	0.268		
		3	39.8	37.6	0.387	0.402	66.5	63.3	0.648	0.720	42.3	25.8	0.320	0.266		
	10	20	1	40.1	38.8	0.394	0.408	62.3	72.3	0.669	0.751	22.7	33.1	0.269	0.249	
			△	2	38.2	39.2	0.387	0.400	70.3	66.0	0.681	0.754	19.1	33.4	0.243	0.241
			3	34.6	39.4	0.368	0.393	68.8	67.3	0.680	0.746	18.4	34.2	0.240	0.242	
∇		1	35.5	36.7	0.361	0.380	70.3	62.0	0.659	0.727	22.8	33.2	0.270	0.259		
		2	29.4	35.5	0.322	0.326	66.5	63.0	0.647	0.710	27.2	27.8	0.275	0.237		
		3	29.8	27.7	0.287	0.293	66.5	57.0	0.614	0.693	25.4	26.8	0.261	0.228		
∅		1	40.6	40.3	0.405	0.412	65.0	72.5	0.685	0.759	34.7	29.9	0.321	0.263		
		2	40.7	39.8	0.403	0.403	65.5	71.3	0.683	0.755	34.4	28.7	0.313	0.252		
		3	40.2	39.4	0.398	0.401	66.5	70.5	0.684	0.751	35.2	28.4	0.315	0.254		
20		3	1	45.5	35.5	0.399	0.399	54.3	69.3	0.608	0.614	19.9	26.1	0.226	0.241	
			△	2	42.0	36.2	0.389	0.389	53.3	73.3	0.617	0.617	16.8	26.9	0.207	0.236
			3	41.3	36.9	0.390	0.388	53.0	75.0	0.621	0.619	32.0	21.7	0.258	0.232	
	∇	1	46.5	32.8	0.385	0.383	60.5	50.5	0.550	0.621	40.2	18.4	0.253	0.236		
		2	21.5	42.9	0.286	0.351	65.5	45.0	0.533	0.625	14.8	26.6	0.190	0.226		
		3	24.1	36.4	0.290	0.319	52.2	76.8	0.622	0.611	17.4	22.6	0.197	0.214		
	∅	1	39.5	39.1	0.393	0.406	56.8	60.5	0.586	0.631	31.1	22.6	0.262	0.246		
		2	41.8	39.5	0.407	0.409	58.3	60.8	0.595	0.635	34.1	21.7	0.265	0.250		
		3	42.2	38.9	0.405	0.407	58.3	59.5	0.589	0.643	35.0	21.8	0.268	0.251		
	20	4	1	36.9	42.9	0.397	0.407	56.5	58.0	0.572	0.615	20.9	27.2	0.236	0.239	
			△	2	42.9	36.4	0.394	0.390	55.0	62.3	0.584	0.612	28.0	22.4	0.249	0.232
			3	41.0	36.3	0.385	0.383	54.8	64.8	0.593	0.613	25.4	22.9	0.241	0.229	
∇		1	39.2	37.6	0.384	0.379	59.0	55.5	0.572	0.626	25.7	24.1	0.249	0.231		
		2	28.8	32.2	0.304	0.339	57.0	67.0	0.616	0.608	17.9	23.8	0.204	0.219		
		3	30.9	26.4	0.285	0.315	57.0	61.3	0.590	0.594	22.4	20.4	0.214	0.208		
∅		1	45.2	37.7	0.411	0.408	56.8	67.5	0.617	0.631	30.8	24.0	0.270	0.244		
		2	45.9	38.0	0.416	0.409	57.3	66.0	0.613	0.638	19.9	28.6	0.234	0.243		
		3	46.9	37.9	0.419	0.411	57.0	66.8	0.615	0.636	22.0	28.8	0.249	0.248		
20		8	1	34.8	39.6	0.371	0.426	59.0	72.3	0.650	0.695	28.0	25.9	0.269	0.244	
			△	2	30.3	42.1	0.352	0.414	55.3	75.5	0.638	0.691	23.6	26.4	0.249	0.232
			3	28.2	43.2	0.341	0.409	54.5	77.0	0.638	0.695	21.6	26.3	0.237	0.229	
	∇	1	53.2	28.7	0.373	0.402	71.3	48.0	0.574	0.663	35.8	23.0	0.280	0.242		
		2	22.2	49.6	0.306	0.376	79.3	40.3	0.534	0.663	12.2	28.1	0.170	0.226		
		3	16.1	41.4	0.232	0.322	39.0	85.8	0.536	0.663	14.9	23.8	0.183	0.213		

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
20	8	∅	1	46.0	35.5	0.400	0.439	67.8	60.8	0.641	0.698	28.8	27.1	0.279	0.253
		2	45.2	34.9	0.394	0.433	67.3	60.3	0.636	0.692	29.1	25.9	0.274	0.248	
		3	45.3	34.8	0.393	0.432	67.8	59.8	0.635	0.698	29.8	25.3	0.274	0.247	
	∆	1	28.3	45.1	0.348	0.418	52.0	80.3	0.631	0.718	27.3	28.3	0.278	0.252	
		2	25.2	46.5	0.327	0.411	50.5	83.8	0.630	0.726	31.1	26.6	0.287	0.240	
		3	52.9	30.6	0.388	0.403	48.3	85.5	0.617	0.723	29.9	26.9	0.283	0.235	
	10	∇	1	46.5	28.8	0.356	0.375	66.0	64.5	0.652	0.704	28.4	25.3	0.268	0.243
			2	49.5	22.4	0.308	0.329	68.3	56.3	0.617	0.675	32.9	21.6	0.260	0.224
			3	13.2	39.3	0.198	0.298	72.5	52.0	0.606	0.674	36.2	19.8	0.256	0.217
∅		1	38.1	38.1	0.381	0.414	59.8	73.3	0.658	0.725	20.7	30.8	0.247	0.258	
		2	40.2	38.1	0.391	0.418	61.8	73.8	0.672	0.729	20.8	30.3	0.247	0.253	
		3	40.5	37.4	0.389	0.417	60.3	76.3	0.673	0.729	21.1	30.4	0.249	0.253	
12		∆	1	45.9	33.9	0.390	0.407	69.8	55.5	0.618	0.697	25.2	27.8	0.264	0.242
			2	44.6	35.7	0.397	0.404	69.0	60.8	0.646	0.721	25.8	26.0	0.259	0.235
			3	44.0	36.1	0.396	0.403	67.0	62.5	0.647	0.715	24.2	26.4	0.253	0.232
	∇	1	22.3	45.8	0.300	0.386	40.8	81.0	0.542	0.676	15.0	30.0	0.200	0.238	
		2	26.2	34.4	0.298	0.347	43.5	79.0	0.561	0.665	20.2	25.1	0.224	0.224	
		3	27.8	28.2	0.280	0.330	44.8	76.5	0.565	0.646	24.9	21.8	0.232	0.217	
	∅	1	54.2	30.2	0.388	0.416	83.8	44.3	0.579	0.711	37.3	24.4	0.295	0.250	
		2	53.8	29.8	0.383	0.404	87.5	44.3	0.588	0.732	38.9	23.9	0.296	0.251	
		3	53.3	30.1	0.385	0.407	85.8	44.0	0.582	0.719	38.7	23.9	0.295	0.251	
16	∆	1	48.3	34.5	0.403	0.415	67.3	54.8	0.604	0.688	28.8	27.8	0.283	0.243	
		2	45.7	36.6	0.407	0.412	63.5	61.0	0.622	0.697	26.1	28.9	0.274	0.241	
		3	45.0	36.8	0.405	0.412	61.5	62.8	0.621	0.694	23.8	28.9	0.261	0.239	
	∇	1	28.6	38.4	0.328	0.379	44.0	79.5	0.566	0.655	17.6	30.7	0.223	0.236	
		2	31.5	31.9	0.317	0.355	46.3	77.0	0.578	0.636	23.1	24.8	0.239	0.215	
		3	33.3	26.4	0.294	0.341	47.8	73.5	0.579	0.619	26.2	21.3	0.235	0.199	
	∅	1	24.1	49.5	0.324	0.412	82.3	42.5	0.560	0.695	37.9	24.8	0.300	0.249	
		2	54.3	31.2	0.397	0.421	82.8	42.8	0.564	0.707	38.7	24.1	0.297	0.248	
		3	53.7	30.4	0.388	0.418	45.0	84.8	0.588	0.700	39.3	23.9	0.297	0.248	
20	∆	1	40.6	40.7	0.407	0.410	58.5	64.3	0.612	0.665	41.4	23.2	0.298	0.252	
		2	39.1	41.7	0.403	0.404	57.0	71.5	0.634	0.684	38.2	24.1	0.296	0.246	
		3	38.5	41.7	0.400	0.403	55.8	72.8	0.631	0.678	36.9	24.7	0.296	0.245	
	∇	1	56.1	28.2	0.376	0.371	79.0	39.8	0.529	0.663	13.3	32.9	0.190	0.233	
		2	12.9	43.2	0.199	0.325	36.5	84.5	0.510	0.648	19.1	27.2	0.225	0.221	
		3	13.8	38.0	0.203	0.296	36.5	82.0	0.505	0.655	23.9	23.6	0.237	0.217	
	∅	1	52.1	36.2	0.427	0.420	71.3	53.0	0.608	0.680	47.8	20.2	0.284	0.248	
		2	51.2	36.8	0.428	0.415	72.8	51.8	0.605	0.688	47.7	20.3	0.285	0.246	
		3	51.0	35.4	0.418	0.409	75.3	51.3	0.610	0.689	47.7	19.7	0.278	0.246	
35	3	∆	1	51.2	30.2	0.379	0.369	55.3	60.8	0.579	0.611	26.1	22.0	0.239	0.225
		2	48.5	30.8	0.376	0.367	54.5	66.3	0.598	0.615	22.4	23.0	0.227	0.220	
		3	46.8	31.2	0.374	0.361	54.0	69.0	0.606	0.613	20.7	23.2	0.219	0.218	

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>						
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>																
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>		
35	3	1	39.7	29.5	0.339	0.340	51.3	75.8	0.611	0.613	33.0	19.0	0.241	0.225		
		▽	2	20.4	33.8	0.254	0.308	54.0	70.8	0.613	0.622	13.4	24.9	0.175	0.211	
		3	18.9	24.4	0.213	0.261	56.3	66.5	0.609	0.626	16.8	20.6	0.185	0.202		
	∅	1	29.9	37.9	0.335	0.361	58.5	49.3	0.535	0.619	23.1	24.1	0.236	0.235		
		2	32.9	37.5	0.351	0.368	61.5	50.3	0.553	0.640	25.1	23.1	0.241	0.237		
		3	33.5	36.7	0.350	0.366	62.5	50.5	0.559	0.642	26.1	22.8	0.243	0.239		
	35	4	1	44.1	37.5	0.405	0.429	56.3	64.8	0.602	0.632	24.1	24.9	0.245	0.237	
			△	2	39.2	38.8	0.390	0.412	59.8	51.8	0.555	0.633	21.6	26.0	0.236	0.232
			3	36.9	39.5	0.382	0.408	58.5	54.0	0.562	0.632	19.8	26.1	0.225	0.228	
▽		1	54.3	29.4	0.381	0.387	68.0	41.5	0.515	0.615	23.0	24.3	0.236	0.233		
		2	18.1	44.4	0.257	0.352	73.3	35.5	0.478	0.623	20.3	24.0	0.220	0.222		
		3	21.6	35.2	0.268	0.322	47.0	80.0	0.592	0.642	25.1	20.1	0.223	0.212		
∅		1	46.5	37.8	0.417	0.427	61.8	54.0	0.576	0.632	25.3	26.0	0.257	0.242		
		2	48.8	37.3	0.423	0.430	62.3	55.0	0.584	0.645	27.1	26.2	0.267	0.251		
		3	50.2	37.1	0.426	0.433	65.3	55.8	0.601	0.658	28.0	25.1	0.265	0.248		
35	8	1	27.2	42.5	0.332	0.418	55.0	76.5	0.640	0.689	17.8	29.6	0.222	0.254		
		△	2	24.2	43.8	0.311	0.409	53.3	80.0	0.639	0.700	14.7	30.3	0.198	0.245	
		3	22.3	45.0	0.298	0.406	51.8	81.5	0.633	0.701	38.2	21.4	0.275	0.239		
	▽	1	51.1	24.2	0.328	0.427	69.5	53.8	0.606	0.632	39.4	19.4	0.260	0.252		
		2	57.2	17.2	0.265	0.417	82.3	45.3	0.584	0.646	7.2	36.6	0.121	0.227		
		3	60.2	15.2	0.242	0.419	88.5	38.3	0.534	0.639	8.7	31.6	0.136	0.217		
	∅	1	42.2	35.6	0.386	0.448	64.8	67.5	0.661	0.683	30.1	25.9	0.278	0.271		
		2	45.2	35.8	0.399	0.460	69.0	69.0	0.690	0.710	31.3	25.2	0.279	0.268		
		3	45.3	36.5	0.405	0.465	70.3	67.5	0.688	0.708	31.4	24.6	0.276	0.264		
35	10	1	32.3	42.2	0.366	0.426	52.5	73.5	0.613	0.662	13.9	31.7	0.193	0.244		
		△	2	26.5	43.9	0.331	0.408	51.3	78.0	0.619	0.678	35.0	21.1	0.263	0.233	
		3	24.2	45.5	0.315	0.406	50.0	79.0	0.612	0.680	33.8	21.1	0.260	0.228		
	▽	1	51.8	27.5	0.359	0.443	72.5	51.0	0.599	0.631	32.4	19.4	0.243	0.235		
		2	55.2	19.2	0.284	0.416	77.3	38.8	0.516	0.590	41.2	15.0	0.220	0.219		
		3	56.2	15.2	0.240	0.400	82.3	32.3	0.463	0.580	9.2	30.2	0.141	0.206		
	∅	1	44.9	36.1	0.400	0.459	63.8	64.0	0.639	0.660	23.4	26.9	0.250	0.254		
		2	44.5	37.2	0.405	0.459	67.0	64.0	0.655	0.675	24.1	26.2	0.251	0.251		
		3	44.3	38.6	0.413	0.465	69.3	64.3	0.667	0.687	25.4	26.2	0.258	0.250		
35	12	1	46.6	34.1	0.394	0.453	70.0	43.8	0.538	0.584	27.6	23.8	0.255	0.245		
		△	2	43.9	35.7	0.394	0.448	66.8	48.0	0.558	0.591	24.6	24.6	0.246	0.239	
		3	42.5	35.6	0.388	0.442	64.0	50.5	0.565	0.591	21.6	24.6	0.230	0.229		
	▽	1	74.2	23.8	0.360	0.516	89.5	21.5	0.347	0.560	13.7	29.9	0.188	0.245		
		2	78.2	18.8	0.304	0.508	98.0	13.5	0.237	0.558	20.0	22.0	0.210	0.243		
		3	80.5	17.5	0.288	0.511	99.5	11.0	0.198	0.553	24.0	18.4	0.209	0.248		
	∅	1	61.1	31.3	0.414	0.500	87.3	32.3	0.471	0.604	42.1	20.1	0.272	0.256		
		2	62.5	30.5	0.410	0.503	88.5	32.3	0.473	0.609	43.3	20.2	0.276	0.256		
		3	62.5	30.3	0.408	0.503	87.3	33.5	0.484	0.610	42.8	20.2	0.275	0.254		

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>						
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>																
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>		
35	16	1	58.8	31.7	0.412	0.493	68.0	31.5	0.431	0.514	33.2	20.7	0.255	0.228		
		△	2	53.8	32.2	0.403	0.476	65.8	34.5	0.453	0.518	29.3	21.4	0.248	0.221	
		3	52.5	32.2	0.399	0.471	62.8	35.8	0.455	0.511	27.8	21.2	0.241	0.216		
	▽	1	75.1	22.5	0.347	0.513	88.0	14.3	0.245	0.517	17.2	23.1	0.197	0.238		
		2	78.4	19.7	0.315	0.512	93.8	9.3	0.168	0.518	25.8	16.2	0.199	0.245		
		3	80.2	18.5	0.300	0.514	96.3	7.8	0.143	0.522	29.7	12.4	0.175	0.245		
	∅	1	67.5	27.7	0.393	0.510	87.0	22.8	0.361	0.555	10.8	32.0	0.161	0.243		
		2	66.6	28.4	0.398	0.510	89.3	24.3	0.381	0.573	12.8	30.0	0.179	0.243		
		3	64.8	28.5	0.395	0.504	87.3	24.3	0.380	0.564	13.4	29.4	0.185	0.245		
	35	20	1	32.9	39.7	0.360	0.427	48.3	57.8	0.526	0.556	23.2	22.8	0.230	0.229	
			△	2	29.6	41.6	0.346	0.421	46.0	57.8	0.512	0.546	10.8	23.7	0.148	0.205
			3	27.7	41.9	0.334	0.415	45.3	54.8	0.495	0.528	9.9	23.9	0.140	0.202	
▽		1	48.7	26.2	0.341	0.423	62.0	32.8	0.429	0.492	5.7	36.0	0.098	0.217		
		2	54.9	21.2	0.305	0.425	78.3	23.5	0.361	0.519	6.9	26.6	0.109	0.190		
		3	54.8	17.8	0.269	0.408	79.3	19.3	0.310	0.502	10.9	21.6	0.145	0.190		
∅		1	46.4	36.0	0.405	0.466	58.0	45.8	0.512	0.540	38.4	19.4	0.258	0.241		
		2	45.9	36.7	0.408	0.466	59.2	44.8	0.510	0.540	35.1	18.7	0.244	0.226		
		3	44.5	35.7	0.396	0.457	59.2	45.0	0.512	0.542	39.8	18.3	0.251	0.229		
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung</i>																
<i>q</i>		<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>		
3		△	1	35.2	33.7	0.344	0.284	46.3	41.5	0.437	0.480	16.9	23.7	0.197	0.161	
	2		32.8	34.5	0.337	0.283	45.3	44.0	0.446	0.474	15.9	24.2	0.192	0.159		
	3		30.8	35.2	0.329	0.281	44.5	45.8	0.451	0.467	14.7	24.4	0.183	0.158		
	▽	1	36.5	31.6	0.339	0.260	45.8	46.8	0.462	0.473	23.0	17.3	0.198	0.143		
		2	24.5	33.6	0.284	0.250	45.5	50.8	0.480	0.470	16.0	17.7	0.168	0.137		
		3	28.0	30.2	0.291	0.242	46.3	45.0	0.456	0.469	16.9	17.1	0.170	0.133		
	∅	1	38.2	32.6	0.352	0.285	44.8	45.5	0.451	0.475	17.6	23.1	0.200	0.160		
		2	36.7	30.4	0.332	0.275	45.3	45.0	0.451	0.480	18.2	23.3	0.205	0.159		
		3	37.3	31.5	0.341	0.282	45.3	43.8	0.445	0.475	17.7	23.3	0.201	0.160		
	4	△	1	40.5	35.2	0.377	0.365	57.8	57.5	0.576	0.642	24.6	22.9	0.237	0.200	
			2	37.9	37.0	0.375	0.364	56.0	61.0	0.584	0.635	23.1	23.8	0.234	0.198	
			3	35.0	37.9	0.364	0.358	57.5	50.0	0.535	0.628	22.1	24.2	0.231	0.195	
▽		1	27.2	41.1	0.328	0.343	59.0	59.2	0.591	0.664	21.7	20.9	0.213	0.183		
		2	35.4	31.2	0.332	0.325	59.5	58.3	0.589	0.651	23.9	19.0	0.212	0.181		
		3	31.5	28.9	0.302	0.306	55.3	60.8	0.579	0.642	19.0	18.8	0.189	0.172		
∅		1	36.2	39.8	0.380	0.369	61.0	60.8	0.609	0.668	25.3	21.8	0.234	0.195		
		2	39.5	38.8	0.392	0.376	61.5	58.7	0.601	0.665	25.4	22.3	0.238	0.198		
		3	38.8	38.2	0.385	0.376	62.5	57.0	0.596	0.667	21.8	24.9	0.232	0.197		
5		△	1	27.8	46.8	0.349	0.397	62.3	56.3	0.591	0.652	21.7	21.3	0.215	0.186	
			2	54.9	33.5	0.416	0.386	60.3	60.8	0.605	0.652	19.3	22.4	0.208	0.183	
			3	53.9	34.0	0.417	0.383	59.2	64.5	0.618	0.651	24.3	19.3	0.215	0.180	

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung</i>														
<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
5	1	35.2	32.7	0.339	0.352	62.8	55.3	0.588	0.649	19.8	19.7	0.197	0.177	
	∇	2	31.8	35.8	0.337	0.335	59.0	55.5	0.572	0.641	18.9	19.0	0.189	0.170
	3	36.2	30.2	0.329	0.323	60.0	58.3	0.591	0.636	17.6	17.3	0.174	0.164	
	1	36.0	40.5	0.381	0.389	59.2	61.0	0.601	0.663	19.2	23.3	0.211	0.184	
	∅	2	37.8	40.0	0.389	0.394	59.8	58.7	0.592	0.673	19.4	23.2	0.212	0.185
	3	38.4	39.4	0.389	0.393	61.0	58.7	0.599	0.676	19.6	23.0	0.211	0.184	
6	1	42.2	40.9	0.415	0.437	63.5	59.5	0.614	0.723	22.8	28.6	0.253	0.239	
	Δ	2	38.2	42.0	0.400	0.431	61.8	65.0	0.633	0.732	31.7	23.7	0.271	0.234
	3	35.6	42.7	0.388	0.428	59.8	67.5	0.634	0.725	29.9	24.0	0.266	0.230	
	1	33.8	38.5	0.360	0.408	63.3	65.3	0.642	0.714	26.2	26.1	0.262	0.228	
	∇	2	36.6	33.1	0.348	0.358	67.0	65.5	0.662	0.718	19.8	25.3	0.222	0.212
	3	33.2	32.1	0.326	0.332	60.8	68.8	0.645	0.705	21.3	23.1	0.222	0.202	
7	1	43.6	40.3	0.419	0.443	68.3	59.0	0.633	0.732	25.6	25.4	0.255	0.234	
	∅	2	45.5	40.6	0.429	0.446	71.5	61.0	0.658	0.753	25.2	26.2	0.257	0.237
	3	45.5	41.0	0.432	0.447	72.0	61.5	0.663	0.755	27.1	26.4	0.268	0.239	
	1	41.6	42.1	0.418	0.437	57.8	65.0	0.612	0.659	26.2	27.9	0.270	0.231	
	Δ	2	38.6	44.3	0.413	0.428	63.3	58.5	0.608	0.664	27.0	24.6	0.257	0.225
	3	44.7	36.9	0.404	0.423	62.8	60.8	0.617	0.667	25.9	25.1	0.255	0.220	
8	1	37.6	41.9	0.397	0.405	65.3	58.7	0.618	0.659	23.6	25.7	0.246	0.226	
	∇	2	37.3	32.3	0.346	0.364	60.8	55.5	0.580	0.646	21.6	23.8	0.226	0.211
	3	31.3	28.1	0.296	0.342	60.0	57.5	0.587	0.622	19.8	19.7	0.197	0.198	
	1	43.7	42.0	0.428	0.441	61.0	62.0	0.615	0.669	25.0	28.2	0.265	0.232	
	∅	2	44.3	41.4	0.428	0.440	62.8	62.3	0.625	0.677	26.0	27.3	0.266	0.232
	3	43.8	41.3	0.425	0.440	63.8	63.5	0.636	0.679	26.9	26.8	0.268	0.232	
9	1	40.5	42.8	0.416	0.443	59.0	64.3	0.615	0.679	26.7	31.0	0.287	0.259	
	Δ	2	37.5	44.0	0.405	0.437	66.5	59.0	0.625	0.684	29.8	28.2	0.290	0.253
	3	45.4	39.0	0.420	0.433	65.5	62.5	0.640	0.686	27.4	28.8	0.281	0.247	
	1	40.9	43.8	0.423	0.428	58.7	63.8	0.611	0.667	24.1	28.8	0.262	0.244	
	∇	2	36.5	38.3	0.374	0.382	63.0	65.8	0.643	0.669	22.9	25.1	0.239	0.222
	3	32.9	37.5	0.351	0.354	58.7	62.0	0.603	0.648	22.0	23.9	0.229	0.206	
9	1	44.8	43.3	0.441	0.459	61.8	59.8	0.607	0.692	33.0	27.3	0.299	0.258	
	∅	2	47.2	44.6	0.459	0.468	66.8	61.3	0.639	0.706	26.3	29.9	0.280	0.259
	3	47.5	43.8	0.455	0.473	66.5	60.5	0.634	0.711	25.8	29.6	0.275	0.259	
	1	47.3	40.3	0.435	0.434	63.8	65.5	0.646	0.698	29.8	26.3	0.279	0.236	
	Δ	2	43.9	41.5	0.427	0.428	63.3	60.5	0.618	0.695	25.7	27.0	0.263	0.228
	3	41.6	42.4	0.420	0.424	62.0	63.0	0.625	0.690	24.4	27.9	0.261	0.225	
9	1	37.5	37.2	0.374	0.383	63.3	69.5	0.662	0.686	26.9	26.1	0.265	0.222	
	∇	2	38.2	31.0	0.342	0.333	61.5	68.5	0.648	0.670	21.3	24.8	0.229	0.213
	3	34.4	28.1	0.309	0.305	63.5	58.7	0.610	0.653	24.7	21.4	0.229	0.200	
	1	39.9	46.3	0.429	0.442	66.8	64.8	0.657	0.704	25.9	29.2	0.275	0.237	
	∅	2	40.5	44.8	0.425	0.440	66.3	62.8	0.645	0.712	28.2	28.8	0.285	0.241
	3	42.3	45.5	0.439	0.446	67.3	62.5	0.648	0.716	29.9	28.7	0.293	0.246	

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung</i>														
<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
10	△	1	41.2	44.5	0.428	0.432	60.8	64.5	0.626	0.673	30.3	27.0	0.286	0.243
		2	43.2	40.8	0.420	0.425	63.8	59.0	0.613	0.672	27.8	28.2	0.280	0.237
		3	40.9	41.4	0.412	0.423	62.5	61.5	0.620	0.674	25.9	29.0	0.274	0.231
	▽	1	31.9	38.8	0.350	0.390	62.8	58.0	0.603	0.654	27.0	25.7	0.263	0.230
		2	32.8	30.2	0.314	0.339	60.3	66.0	0.630	0.639	25.9	22.9	0.243	0.219
		3	36.3	28.6	0.320	0.310	61.5	60.0	0.607	0.629	22.9	23.4	0.232	0.203
	∅	1	43.2	42.3	0.428	0.436	62.5	63.8	0.631	0.675	25.6	29.7	0.275	0.242
		2	46.4	41.3	0.437	0.438	64.3	64.3	0.642	0.676	27.6	29.2	0.284	0.249
		3	39.7	46.1	0.426	0.438	64.0	63.8	0.639	0.682	28.4	29.3	0.289	0.251
11	△	1	36.6	41.5	0.389	0.417	61.3	62.0	0.616	0.679	31.4	28.2	0.297	0.255
		2	41.1	38.7	0.398	0.415	62.8	57.8	0.601	0.686	29.3	29.3	0.293	0.252
		3	38.8	39.3	0.390	0.413	62.0	60.3	0.611	0.682	27.6	30.0	0.287	0.245
	▽	1	36.6	36.5	0.366	0.374	60.8	63.8	0.622	0.671	25.4	27.0	0.262	0.238
		2	30.8	30.7	0.307	0.320	62.5	65.8	0.641	0.663	25.2	24.1	0.247	0.224
		3	34.0	27.7	0.305	0.292	62.8	56.8	0.596	0.630	21.4	24.3	0.228	0.208
	∅	1	36.8	41.7	0.391	0.415	64.3	60.3	0.622	0.695	29.1	27.8	0.284	0.252
		2	42.2	41.8	0.420	0.429	62.0	66.5	0.642	0.702	30.3	29.1	0.297	0.259
		3	43.1	41.5	0.423	0.434	62.8	66.5	0.646	0.703	32.0	28.9	0.304	0.262
12	△	1	38.2	43.6	0.407	0.442	65.8	60.3	0.629	0.720	31.3	29.0	0.301	0.261
		2	44.3	38.5	0.412	0.444	63.8	66.0	0.649	0.725	29.2	30.3	0.298	0.256
		3	42.1	39.1	0.405	0.438	62.8	70.3	0.663	0.726	26.7	31.1	0.287	0.250
	▽	1	35.4	39.5	0.373	0.392	64.8	62.8	0.637	0.707	30.8	26.4	0.284	0.247
		2	39.2	30.2	0.341	0.340	61.3	65.8	0.634	0.696	24.8	26.4	0.256	0.231
		3	30.8	25.5	0.279	0.292	63.8	57.5	0.605	0.678	21.2	26.1	0.234	0.212
	∅	1	38.9	41.5	0.402	0.443	62.5	67.0	0.647	0.732	29.8	30.8	0.303	0.261
		2	45.6	42.3	0.439	0.458	64.8	65.8	0.652	0.747	31.6	29.7	0.306	0.265
		3	45.8	42.6	0.442	0.457	66.3	67.0	0.666	0.754	33.3	28.7	0.308	0.268
13	△	1	38.4	44.5	0.412	0.446	61.3	60.5	0.609	0.684	28.4	31.0	0.297	0.264
		2	46.1	38.8	0.422	0.436	59.8	66.3	0.628	0.692	31.0	27.8	0.293	0.256
		3	43.2	39.3	0.412	0.433	63.5	57.5	0.604	0.687	29.0	28.7	0.288	0.251
	▽	1	35.7	36.6	0.361	0.391	61.3	61.3	0.613	0.654	27.2	27.9	0.276	0.247
		2	31.1	35.9	0.333	0.332	64.3	59.2	0.616	0.638	21.0	27.2	0.237	0.225
		3	33.6	29.8	0.316	0.295	59.8	62.5	0.611	0.634	25.7	21.4	0.234	0.204
	∅	1	47.8	41.5	0.444	0.451	62.3	60.0	0.611	0.687	28.9	30.0	0.294	0.265
		2	38.9	46.5	0.424	0.455	65.8	67.5	0.666	0.710	28.3	30.4	0.294	0.268
		3	39.2	46.5	0.426	0.451	66.5	67.8	0.671	0.709	29.9	29.8	0.298	0.274
14	△	1	39.6	41.8	0.407	0.420	59.5	65.0	0.621	0.654	29.9	26.3	0.280	0.250
		2	40.6	39.8	0.402	0.421	60.8	57.8	0.592	0.659	27.3	27.2	0.273	0.245
		3	38.7	40.5	0.396	0.417	59.5	60.5	0.600	0.650	26.0	28.1	0.270	0.243
	▽	1	30.0	34.9	0.323	0.358	63.3	61.3	0.622	0.642	24.8	26.3	0.255	0.230
		2	32.2	30.5	0.314	0.325	60.0	59.2	0.596	0.632	22.3	21.8	0.221	0.202
		3	27.9	25.9	0.269	0.288	60.8	59.8	0.602	0.599	20.1	23.7	0.217	0.185

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung</i>														
<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
14	∅	1	38.3	39.8	0.390	0.417	66.3	59.8	0.628	0.662	28.8	27.2	0.280	0.251
		2	41.0	41.2	0.411	0.432	69.3	62.0	0.654	0.678	26.7	29.9	0.282	0.256
		3	41.2	41.2	0.412	0.432	62.0	68.5	0.651	0.669	27.8	29.6	0.286	0.262
15	△	1	44.2	39.6	0.418	0.418	59.8	57.5	0.586	0.643	28.1	28.3	0.282	0.257
		2	41.5	41.5	0.415	0.417	58.0	63.0	0.604	0.648	30.2	25.7	0.278	0.244
		3	39.9	42.1	0.410	0.411	57.5	65.3	0.611	0.642	28.2	26.2	0.272	0.240
16	▽	1	31.2	33.5	0.323	0.354	56.5	63.3	0.597	0.614	29.3	23.8	0.263	0.236
		2	29.5	29.8	0.296	0.300	58.3	62.0	0.601	0.603	18.7	22.7	0.205	0.199
		3	22.2	27.5	0.246	0.276	59.0	54.5	0.567	0.571	20.1	19.8	0.199	0.180
17	∅	1	41.1	38.7	0.398	0.416	59.2	60.5	0.599	0.649	27.8	29.0	0.284	0.258
		2	38.2	42.7	0.403	0.426	61.8	60.0	0.609	0.668	30.2	27.3	0.287	0.258
		3	39.0	42.0	0.404	0.422	62.8	59.2	0.609	0.663	27.8	29.7	0.287	0.261
18	△	1	37.6	40.0	0.388	0.405	63.0	56.0	0.593	0.646	30.7	30.2	0.304	0.275
		2	34.8	41.6	0.379	0.405	61.0	61.8	0.614	0.655	30.9	29.0	0.299	0.268
		3	33.2	42.4	0.373	0.402	59.8	58.5	0.591	0.650	28.9	29.8	0.293	0.262
19	▽	1	30.8	32.8	0.318	0.332	60.8	56.8	0.587	0.637	24.4	29.3	0.267	0.251
		2	28.2	30.3	0.292	0.277	62.0	63.5	0.627	0.625	24.4	26.8	0.256	0.223
		3	28.7	26.1	0.273	0.254	62.0	55.3	0.584	0.588	21.9	23.4	0.226	0.199
20	∅	1	44.2	37.2	0.404	0.399	61.3	62.0	0.616	0.666	29.8	32.1	0.309	0.277
		2	36.5	40.6	0.384	0.404	63.3	61.8	0.625	0.671	32.9	30.9	0.319	0.283
		3	38.2	41.1	0.396	0.410	64.0	62.5	0.632	0.669	34.0	30.4	0.321	0.285
21	△	1	41.5	39.6	0.406	0.435	58.3	55.5	0.568	0.637	34.4	30.6	0.324	0.272
		2	37.2	41.1	0.390	0.426	56.8	60.8	0.587	0.636	32.3	32.4	0.324	0.269
		3	35.5	41.7	0.383	0.423	60.8	56.0	0.583	0.627	30.7	32.9	0.317	0.265
22	▽	1	36.9	37.1	0.370	0.369	56.5	56.5	0.565	0.606	27.9	29.7	0.288	0.259
		2	26.6	25.1	0.258	0.291	57.3	54.0	0.556	0.588	28.9	27.3	0.281	0.243
		3	29.6	22.4	0.255	0.259	55.3	59.0	0.571	0.580	28.3	25.0	0.266	0.222
23	∅	1	37.5	44.2	0.406	0.437	60.5	53.8	0.569	0.646	32.6	32.4	0.325	0.278
		2	40.1	44.5	0.422	0.443	58.0	63.3	0.605	0.649	31.3	34.4	0.328	0.291
		3	42.2	45.2	0.436	0.447	59.2	63.8	0.614	0.656	32.4	33.6	0.330	0.293
24	△	1	37.2	36.7	0.370	0.387	57.5	62.0	0.597	0.611	31.0	29.3	0.301	0.259
		2	33.8	38.0	0.358	0.384	58.7	58.5	0.586	0.613	28.2	30.9	0.295	0.255
		3	31.5	38.8	0.348	0.382	57.5	61.3	0.593	0.606	26.3	31.3	0.286	0.250
25	▽	1	33.8	29.5	0.315	0.313	57.3	58.3	0.577	0.595	24.3	28.2	0.261	0.240
		2	25.0	25.7	0.253	0.261	56.5	58.0	0.572	0.593	22.9	24.9	0.238	0.220
		3	22.6	23.2	0.229	0.227	55.8	57.3	0.565	0.552	22.2	22.7	0.224	0.200
26	∅	1	42.2	35.2	0.383	0.388	57.3	55.8	0.565	0.618	32.0	30.0	0.310	0.265
		2	31.2	39.7	0.349	0.387	59.5	57.3	0.584	0.644	35.8	29.3	0.322	0.276
		3	33.6	40.2	0.366	0.387	60.0	57.0	0.585	0.645	37.8	29.1	0.329	0.279
27	△	1	37.2	37.3	0.373	0.398	58.5	55.3	0.568	0.604	28.2	29.1	0.287	0.244
		2	33.8	38.1	0.358	0.393	57.3	60.8	0.589	0.608	29.9	27.0	0.284	0.239
		3	31.9	38.8	0.350	0.390	59.2	52.0	0.554	0.602	28.3	28.0	0.282	0.234

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung</i>														
<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
19	1	32.2	29.3	0.307	0.336	58.3	51.5	0.547	0.564	27.7	25.0	0.263	0.228	
	∇	2	28.1	25.2	0.265	0.281	56.0	61.8	0.587	0.570	20.1	24.3	0.220	0.197
	3	25.0	32.3	0.282	0.258	58.7	64.5	0.615	0.583	20.6	20.3	0.204	0.176	
	1	39.0	38.2	0.386	0.401	56.3	61.0	0.585	0.608	33.8	26.8	0.299	0.249	
	∅	2	37.6	39.5	0.385	0.406	58.7	59.8	0.592	0.623	26.0	31.2	0.284	0.256
	3	38.5	40.5	0.395	0.408	60.8	60.3	0.605	0.627	27.9	30.3	0.291	0.260	
20	1	41.5	36.0	0.386	0.396	56.3	55.5	0.559	0.591	25.1	29.4	0.271	0.239	
	Δ	2	38.9	37.6	0.383	0.393	59.2	52.0	0.554	0.587	28.3	27.2	0.278	0.233
	3	37.2	38.2	0.377	0.391	59.2	54.5	0.568	0.581	27.1	27.8	0.274	0.228	
	1	26.4	31.8	0.288	0.323	55.0	57.0	0.560	0.561	23.3	23.9	0.236	0.213	
	∇	2	26.8	24.8	0.257	0.270	57.8	53.3	0.554	0.545	19.9	20.9	0.204	0.186
	3	23.2	21.4	0.222	0.225	58.5	57.3	0.579	0.541	17.3	22.0	0.194	0.172	
21	1	38.5	38.3	0.384	0.396	57.3	62.3	0.596	0.597	24.1	29.1	0.264	0.243	
	∅	2	39.2	38.1	0.386	0.395	60.3	61.0	0.606	0.610	27.3	27.9	0.276	0.247
	3	40.2	37.2	0.386	0.396	61.3	60.5	0.609	0.608	29.6	28.6	0.290	0.253	
	1	35.9	40.6	0.381	0.399	57.3	51.0	0.539	0.599	27.3	25.6	0.264	0.232	
	Δ	2	33.3	42.2	0.372	0.398	56.0	55.0	0.555	0.586	24.2	26.1	0.251	0.226
	3	43.9	35.6	0.393	0.395	55.3	58.5	0.568	0.583	28.6	24.2	0.262	0.223	
22	1	28.6	30.2	0.294	0.314	55.5	52.0	0.537	0.571	19.3	23.2	0.211	0.198	
	∇	2	26.5	28.9	0.277	0.269	56.5	59.5	0.580	0.573	16.7	18.8	0.177	0.164
	3	28.7	27.2	0.279	0.245	59.5	51.0	0.549	0.546	19.2	16.7	0.179	0.145	
	1	32.4	40.5	0.360	0.396	58.0	56.5	0.572	0.605	25.6	25.3	0.254	0.233	
	∅	2	35.5	40.0	0.376	0.401	61.0	55.8	0.583	0.612	29.3	25.3	0.272	0.237
	3	36.0	40.3	0.380	0.403	61.5	55.5	0.583	0.609	25.6	27.0	0.263	0.239	
23	1	34.0	35.3	0.346	0.375	55.3	56.8	0.560	0.579	29.8	26.0	0.278	0.244	
	Δ	2	31.2	36.5	0.336	0.372	54.5	61.5	0.578	0.574	26.2	26.8	0.265	0.234
	3	29.9	37.4	0.332	0.373	54.8	50.8	0.527	0.562	25.0	27.2	0.261	0.230	
	1	25.5	30.5	0.277	0.305	56.3	56.0	0.561	0.560	22.7	23.7	0.232	0.209	
	∇	2	27.2	29.9	0.285	0.279	58.0	51.3	0.544	0.525	17.7	18.0	0.178	0.167
	3	24.7	29.5	0.269	0.236	52.0	52.2	0.521	0.521	19.0	15.4	0.170	0.146	
24	1	35.3	36.9	0.361	0.374	60.8	52.2	0.562	0.586	29.0	26.7	0.278	0.243	
	∅	2	38.6	35.7	0.371	0.377	55.0	59.8	0.573	0.579	25.1	27.2	0.261	0.243
	3	38.5	35.7	0.371	0.385	56.0	58.3	0.571	0.582	27.2	26.2	0.267	0.244	
	1	35.5	34.7	0.351	0.376	56.3	59.2	0.577	0.567	32.3	25.1	0.283	0.246	
	Δ	2	32.5	36.1	0.342	0.377	56.5	53.8	0.551	0.547	30.0	25.8	0.277	0.242
	3	29.9	37.2	0.331	0.373	56.0	55.5	0.557	0.530	28.2	25.9	0.270	0.237	
25	1	28.9	26.2	0.275	0.284	57.0	48.5	0.524	0.542	25.9	23.1	0.244	0.214	
	∇	2	24.5	27.5	0.259	0.244	52.7	61.0	0.566	0.516	20.3	22.0	0.211	0.181
	3	19.9	24.8	0.221	0.211	53.0	50.0	0.515	0.487	19.9	17.7	0.187	0.159	
	1	39.3	35.6	0.374	0.368	55.8	57.8	0.567	0.572	25.2	28.3	0.267	0.247	
	∅	2	42.7	37.3	0.398	0.391	55.8	54.8	0.552	0.579	29.3	26.3	0.278	0.251
	3	40.9	37.9	0.394	0.388	57.3	54.3	0.557	0.575	25.7	28.8	0.271	0.250	

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftnennung</i>														
<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
24	△	1	38.8	33.5	0.360	0.356	56.0	54.5	0.552	0.560	24.1	29.6	0.266	0.247
		2	35.9	34.1	0.350	0.356	55.0	60.5	0.576	0.559	22.1	30.1	0.255	0.242
		3	34.6	34.9	0.348	0.356	56.0	52.7	0.543	0.548	31.4	24.6	0.276	0.237
	▽	1	28.6	22.2	0.250	0.276	55.3	55.3	0.553	0.534	20.3	25.2	0.225	0.212
		2	24.2	26.9	0.255	0.236	54.5	56.0	0.552	0.528	19.9	18.8	0.193	0.174
		3	18.3	25.3	0.212	0.207	51.5	58.7	0.549	0.467	15.6	20.1	0.175	0.150
	∅	1	33.5	35.3	0.344	0.356	55.5	51.5	0.534	0.568	28.4	27.0	0.277	0.247
		2	35.2	35.2	0.352	0.364	56.3	60.0	0.581	0.581	27.3	28.0	0.277	0.248
		3	36.2	36.2	0.362	0.364	57.0	58.5	0.577	0.576	28.8	27.1	0.279	0.247
26	△	1	39.0	36.6	0.378	0.372	53.8	57.0	0.553	0.547	28.0	26.3	0.271	0.242
		2	36.7	37.6	0.371	0.371	53.0	60.0	0.563	0.531	25.3	26.3	0.258	0.238
		3	34.7	38.6	0.365	0.371	56.3	50.0	0.529	0.509	24.2	26.8	0.254	0.236
	▽	1	24.7	28.8	0.266	0.283	52.0	56.3	0.540	0.526	24.6	21.4	0.229	0.207
		2	27.9	22.5	0.249	0.229	53.0	55.5	0.542	0.517	21.1	18.9	0.199	0.174
		3	27.5	19.2	0.226	0.197	57.3	46.5	0.513	0.482	19.8	15.6	0.174	0.152
	∅	1	32.5	36.5	0.344	0.365	57.5	51.0	0.541	0.562	29.1	26.7	0.278	0.242
		2	35.6	35.9	0.358	0.366	57.5	59.0	0.582	0.564	25.8	27.9	0.268	0.245
		3	35.9	36.8	0.363	0.370	58.5	58.0	0.582	0.561	28.0	27.1	0.275	0.245
28	△	1	34.5	33.1	0.338	0.350	53.8	57.5	0.556	0.520	24.2	25.1	0.247	0.227
		2	31.0	34.1	0.325	0.349	54.5	52.7	0.536	0.507	22.0	26.2	0.239	0.224
		3	29.6	34.8	0.320	0.347	53.8	54.0	0.539	0.495	27.6	23.7	0.255	0.221
	▽	1	26.5	25.5	0.260	0.275	55.0	46.5	0.504	0.527	20.9	17.6	0.191	0.177
		2	16.6	22.3	0.190	0.217	55.8	43.5	0.489	0.489	14.2	17.6	0.157	0.147
		3	16.1	19.3	0.175	0.182	42.5	59.5	0.496	0.468	12.6	15.0	0.137	0.123
	∅	1	38.9	31.8	0.350	0.345	58.7	53.8	0.561	0.543	23.0	24.4	0.237	0.221
		2	29.5	34.2	0.317	0.348	52.0	59.5	0.555	0.535	27.0	23.6	0.252	0.224
		3	30.1	33.8	0.318	0.346	52.7	59.2	0.558	0.541	21.7	26.4	0.238	0.229
30	△	1	25.8	34.6	0.296	0.343	50.8	57.0	0.537	0.499	24.2	26.9	0.255	0.233
		2	37.8	32.3	0.348	0.339	52.5	51.0	0.517	0.476	26.4	24.2	0.253	0.229
		3	35.2	32.8	0.340	0.335	52.0	50.0	0.510	0.467	24.9	24.7	0.248	0.226
	▽	1	25.3	27.4	0.263	0.269	49.8	50.0	0.499	0.473	20.4	19.9	0.202	0.186
		2	20.1	25.5	0.225	0.208	48.8	51.0	0.498	0.442	19.2	15.3	0.171	0.152
		3	17.4	24.3	0.203	0.188	45.0	53.8	0.490	0.428	15.7	12.7	0.140	0.125
	∅	1	35.8	33.8	0.347	0.349	50.5	56.3	0.532	0.514	29.9	24.1	0.267	0.230
		2	37.9	33.1	0.353	0.350	51.8	51.5	0.516	0.505	23.2	25.7	0.244	0.229
		3	38.0	33.4	0.355	0.349	52.5	50.5	0.515	0.501	25.9	24.8	0.253	0.230
32	△	1	32.5	32.5	0.325	0.333	52.5	49.0	0.507	0.474	26.0	23.8	0.248	0.224
		2	28.8	33.2	0.309	0.330	51.0	48.0	0.495	0.445	24.4	24.6	0.245	0.222
		3	27.8	33.6	0.304	0.329	50.3	45.3	0.476	0.434	23.3	25.2	0.242	0.221

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung</i>														
<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
32	1	28.5	22.5	0.252	0.250	45.8	54.5	0.497	0.458	19.1	19.7	0.194	0.177	
	∇	2	21.2	17.1	0.189	0.195	44.3	54.0	0.486	0.445	14.3	15.7	0.150	0.134
	3	15.2	16.0	0.156	0.152	47.3	45.0	0.461	0.423	12.4	12.7	0.126	0.114	
	1	30.8	33.5	0.321	0.333	52.2	47.0	0.495	0.490	22.4	24.1	0.232	0.219	
	∅	2	33.2	32.6	0.329	0.332	50.8	51.8	0.512	0.475	23.7	23.9	0.238	0.220
	3	32.7	33.1	0.329	0.335	51.0	51.0	0.510	0.471	26.3	24.1	0.252	0.225	
34	1	27.6	33.3	0.302	0.323	49.0	52.2	0.506	0.462	21.8	24.7	0.231	0.213	
	Δ	2	36.7	29.8	0.329	0.324	48.8	50.0	0.494	0.442	27.3	22.2	0.245	0.209
	3	34.9	30.2	0.324	0.320	48.8	48.8	0.488	0.434	26.2	22.3	0.241	0.205	
	1	20.3	22.1	0.212	0.242	48.5	49.3	0.489	0.461	20.9	16.6	0.185	0.169	
	∇	2	15.6	21.0	0.179	0.187	45.8	47.0	0.464	0.420	15.1	12.8	0.138	0.128
	3	16.6	19.6	0.180	0.166	41.0	48.3	0.443	0.389	13.1	10.6	0.117	0.104	
	1	33.5	30.3	0.318	0.321	51.5	50.8	0.511	0.477	24.3	21.9	0.230	0.211	
	∅	2	27.2	32.5	0.296	0.326	52.7	46.8	0.496	0.478	25.4	22.0	0.236	0.210
	3	26.5	32.3	0.291	0.326	48.8	52.2	0.504	0.467	20.3	24.6	0.222	0.212	
36	1	30.5	31.5	0.310	0.314	49.0	45.5	0.472	0.437	25.3	23.1	0.242	0.210	
	Δ	2	28.0	32.0	0.299	0.312	45.0	48.3	0.466	0.421	24.0	23.4	0.237	0.207
	3	26.6	32.3	0.292	0.309	43.3	45.5	0.443	0.406	22.4	24.0	0.232	0.204	
	1	24.0	19.0	0.212	0.224	42.0	51.3	0.462	0.426	16.3	17.9	0.171	0.165	
	∇	2	20.0	16.5	0.181	0.167	40.0	50.0	0.444	0.390	12.4	13.9	0.131	0.126
	3	18.9	14.2	0.162	0.152	43.5	42.3	0.429	0.373	13.9	12.1	0.129	0.106	
	1	27.1	31.8	0.293	0.316	45.3	51.3	0.481	0.447	25.3	22.0	0.235	0.209	
	∅	2	31.3	31.7	0.315	0.315	49.0	49.0	0.490	0.451	22.6	23.7	0.231	0.211
	3	31.0	31.4	0.312	0.315	50.0	46.8	0.483	0.438	24.9	23.4	0.241	0.215	

D.2.2 Fusion auf Entscheidungsebene

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Gitterbasierte Merkmale (Quadratgitter)</i>													
<i>w</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	1	88.0	87.1	0.875	0.940	94.3	93.0	0.936	0.981	77.9	73.6	0.757	0.809
	2	85.9	88.9	0.874	0.939	95.3	94.3	0.947	0.985	75.1	76.4	0.758	0.808
	3	89.2	87.5	0.884	0.940	94.3	94.3	0.942	0.984	73.1	77.9	0.754	0.804
8	1	88.8	85.7	0.872	0.937	94.3	94.0	0.941	0.984	74.1	77.3	0.757	0.804
	2	87.2	88.2	0.877	0.937	95.5	94.8	0.951	0.987	74.7	75.4	0.751	0.802
	3	85.8	88.9	0.873	0.936	94.5	95.5	0.950	0.987	72.7	76.8	0.747	0.799
9	1	83.8	85.8	0.848	0.926	93.5	94.0	0.937	0.987	73.3	76.2	0.747	0.801
	2	86.1	84.8	0.855	0.924	95.5	94.5	0.950	0.988	74.1	75.0	0.746	0.799
	3	85.1	86.0	0.855	0.924	94.5	95.0	0.947	0.987	71.8	76.1	0.739	0.795
10	1	86.2	85.6	0.859	0.915	93.8	92.8	0.932	0.981	75.0	74.7	0.748	0.800
	2	85.6	85.5	0.856	0.913	93.3	94.5	0.939	0.984	76.4	72.8	0.746	0.797
	3	86.6	85.3	0.860	0.914	94.3	94.0	0.941	0.984	74.2	74.4	0.743	0.793
11	1	85.7	85.2	0.854	0.912	93.0	93.5	0.932	0.984	75.1	73.3	0.742	0.800
	2	84.5	86.4	0.854	0.913	95.0	93.8	0.944	0.986	71.9	76.3	0.740	0.798
	3	82.6	87.5	0.850	0.911	94.0	93.8	0.939	0.985	73.4	72.2	0.728	0.791
12	1	83.9	83.4	0.837	0.906	93.5	93.5	0.935	0.980	75.6	74.2	0.749	0.795
	2	83.2	85.0	0.841	0.906	94.8	93.3	0.940	0.980	76.7	72.3	0.744	0.792
	3	84.1	83.8	0.839	0.905	94.0	95.0	0.945	0.980	74.3	73.3	0.738	0.788
13	1	83.3	83.8	0.835	0.907	92.8	94.0	0.934	0.980	75.4	71.8	0.736	0.790
	2	84.3	84.0	0.842	0.908	95.8	94.0	0.949	0.983	72.4	75.4	0.739	0.792
	3	82.8	85.3	0.840	0.908	94.5	94.8	0.946	0.983	75.0	71.4	0.732	0.786
14	1	83.8	82.5	0.831	0.902	92.3	94.8	0.935	0.984	75.1	70.6	0.728	0.788
	2	83.3	83.3	0.833	0.903	93.5	94.0	0.937	0.982	72.4	73.8	0.731	0.787
	3	84.2	82.4	0.833	0.902	93.5	93.3	0.934	0.982	74.4	70.1	0.722	0.783
15	1	83.5	80.4	0.819	0.888	91.5	91.8	0.916	0.975	70.9	74.7	0.727	0.776
	2	81.3	83.2	0.822	0.891	93.5	92.3	0.929	0.976	72.9	72.8	0.728	0.777
	3	82.5	82.4	0.824	0.892	93.3	94.3	0.937	0.978	70.8	74.1	0.724	0.775
16	1	80.5	84.5	0.825	0.889	90.3	92.8	0.915	0.966	70.8	73.9	0.723	0.771
	2	83.2	82.8	0.830	0.887	92.0	92.3	0.921	0.968	72.1	71.4	0.718	0.773
	3	81.4	83.7	0.825	0.885	93.3	93.0	0.931	0.970	69.8	72.9	0.713	0.767
17	1	80.6	84.6	0.826	0.884	94.0	91.8	0.929	0.978	71.0	71.0	0.710	0.763
	2	83.4	81.9	0.826	0.886	91.5	94.0	0.927	0.976	72.3	68.9	0.706	0.762
	3	83.1	79.9	0.815	0.885	91.3	92.0	0.916	0.971	70.0	70.6	0.703	0.758
18	1	76.9	80.5	0.787	0.863	91.0	93.0	0.920	0.977	71.2	71.3	0.713	0.761
	2	79.1	78.5	0.788	0.861	94.5	89.8	0.921	0.981	73.2	68.2	0.706	0.759
	3	77.6	79.8	0.787	0.861	93.0	90.8	0.919	0.980	70.4	69.6	0.700	0.753
19	1	79.5	80.1	0.798	0.865	89.3	90.0	0.896	0.965	71.8	69.8	0.708	0.758
	2	83.0	78.8	0.808	0.868	91.8	91.0	0.914	0.970	68.4	73.2	0.708	0.757
	3	79.8	80.4	0.801	0.868	90.0	92.5	0.912	0.968	70.6	68.3	0.694	0.747

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Gitterbasierte Merkmale (Quadratgitter)</i>													
<i>w</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
20	1	76.2	76.3	0.763	0.817	87.3	90.3	0.887	0.952	70.3	68.7	0.695	0.750
	2	78.8	74.7	0.767	0.820	91.0	88.3	0.896	0.960	66.9	72.0	0.694	0.749
	3	76.8	76.2	0.765	0.819	89.3	90.0	0.896	0.960	69.6	67.8	0.687	0.743
25	1	71.6	72.5	0.720	0.780	88.0	86.5	0.872	0.950	63.9	68.2	0.660	0.707
	2	76.2	70.5	0.733	0.787	86.8	88.5	0.876	0.953	65.2	66.9	0.660	0.705
	3	71.3	72.2	0.717	0.781	88.8	87.8	0.882	0.951	68.3	62.6	0.653	0.700
30	1	59.9	64.0	0.619	0.675	80.0	81.8	0.809	0.896	62.1	64.2	0.631	0.671
	2	62.1	61.4	0.617	0.678	81.3	83.0	0.821	0.899	64.6	61.3	0.629	0.668
	3	63.5	60.5	0.620	0.674	81.5	75.8	0.785	0.885	61.2	63.6	0.624	0.656
35	1	55.2	58.9	0.570	0.605	77.8	82.0	0.798	0.869	59.1	59.7	0.594	0.623
	2	58.9	57.4	0.581	0.598	79.5	77.8	0.786	0.860	59.7	57.3	0.585	0.614
	3	58.5	56.9	0.577	0.595	77.0	80.3	0.786	0.845	56.7	59.6	0.581	0.606
<i>Gitterbasierte Merkmale (Dreiecksgitter)</i>													
<i>w</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	1	75.0	83.0	0.788	0.867	92.8	92.8	0.928	0.976	63.4	63.6	0.635	0.686
	2	85.5	72.7	0.786	0.869	93.3	91.5	0.924	0.977	59.7	67.6	0.634	0.684
	3	84.1	74.1	0.788	0.868	92.5	92.3	0.924	0.977	56.3	69.4	0.622	0.674
8	1	72.2	77.6	0.748	0.832	92.5	88.8	0.906	0.971	55.6	62.9	0.590	0.635
	2	67.6	80.8	0.736	0.833	91.0	90.8	0.909	0.973	62.6	50.8	0.561	0.626
	3	82.1	67.6	0.741	0.832	90.5	91.8	0.911	0.975	58.7	52.0	0.551	0.610
9	1	76.0	79.6	0.778	0.850	90.8	92.0	0.914	0.970	59.0	61.8	0.604	0.650
	2	80.5	76.2	0.783	0.853	90.8	88.8	0.897	0.967	60.7	57.7	0.591	0.642
	3	78.4	77.2	0.778	0.852	90.0	90.5	0.902	0.970	57.3	59.6	0.584	0.632
10	1	76.7	76.2	0.765	0.829	93.0	90.5	0.917	0.975	61.7	61.1	0.614	0.668
	2	79.0	71.5	0.751	0.830	91.8	93.3	0.925	0.976	63.6	57.8	0.605	0.658
	3	77.3	72.5	0.748	0.827	93.8	90.8	0.922	0.977	60.3	59.0	0.597	0.647
11	1	73.7	75.3	0.745	0.831	91.0	91.3	0.911	0.968	59.9	61.7	0.608	0.657
	2	67.4	77.7	0.722	0.830	91.5	91.0	0.912	0.967	61.2	55.8	0.584	0.651
	3	80.1	69.1	0.742	0.831	91.0	92.5	0.917	0.968	58.2	57.2	0.577	0.639
12	1	77.1	75.6	0.763	0.831	92.8	90.8	0.917	0.966	62.3	64.4	0.634	0.677
	2	73.0	77.1	0.750	0.827	90.8	93.5	0.921	0.968	64.9	60.7	0.627	0.670
	3	70.9	78.3	0.744	0.828	93.8	92.0	0.929	0.969	61.7	62.1	0.619	0.661
13	1	76.8	73.0	0.748	0.826	93.5	94.3	0.939	0.983	62.7	64.9	0.638	0.688
	2	72.4	74.8	0.736	0.821	94.3	92.5	0.934	0.982	65.1	60.4	0.627	0.683
	3	69.8	76.5	0.730	0.821	93.8	92.8	0.932	0.982	61.8	62.4	0.621	0.671
14	1	78.3	70.8	0.743	0.820	91.8	92.3	0.920	0.975	59.8	66.0	0.627	0.670
	2	74.5	73.3	0.739	0.820	93.8	92.0	0.929	0.976	61.7	62.1	0.619	0.668
	3	71.2	74.5	0.728	0.813	93.5	93.5	0.935	0.978	59.4	64.1	0.617	0.664
15	1	78.1	69.7	0.736	0.803	95.0	91.5	0.932	0.980	60.2	61.0	0.606	0.652
	2	73.8	72.5	0.731	0.802	94.0	94.0	0.940	0.982	62.8	57.8	0.602	0.652
	3	70.8	74.2	0.725	0.798	93.5	94.8	0.941	0.983	60.4	59.1	0.598	0.643

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Gitterbasierte Merkmale (Dreiecksgitter)</i>														
<i>w</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
16	1	71.0	73.4	0.722	0.785	92.3	92.0	0.921	0.980	62.7	56.7	0.595	0.648	
	2	75.8	66.7	0.709	0.779	90.0	95.0	0.924	0.983	59.3	59.4	0.594	0.643	
	3	73.6	67.9	0.707	0.775	96.0	90.5	0.932	0.984	56.6	61.0	0.587	0.634	
17	1	65.8	71.5	0.685	0.772	93.0	91.3	0.921	0.975	64.6	62.2	0.634	0.675	
	2	70.9	68.0	0.694	0.769	89.8	93.3	0.915	0.974	60.3	65.6	0.628	0.671	
	3	67.8	68.9	0.684	0.764	93.8	89.5	0.916	0.975	62.1	58.3	0.602	0.660	
18	1	72.5	69.1	0.708	0.770	92.5	91.0	0.917	0.978	62.7	58.4	0.605	0.647	
	2	68.8	72.2	0.705	0.774	91.3	94.3	0.927	0.984	58.8	62.3	0.605	0.641	
	3	65.0	73.8	0.691	0.770	94.3	93.5	0.939	0.985	60.2	55.1	0.576	0.629	
19	1	70.4	68.2	0.693	0.756	92.0	93.5	0.927	0.975	61.3	60.0	0.607	0.649	
	2	62.8	71.5	0.669	0.755	92.5	92.0	0.922	0.976	57.0	63.7	0.601	0.643	
	3	71.8	65.2	0.683	0.749	89.3	93.8	0.914	0.972	60.0	57.9	0.589	0.634	
20	1	63.5	70.5	0.668	0.742	85.8	90.3	0.879	0.958	59.8	58.9	0.593	0.639	
	2	69.8	67.1	0.684	0.742	88.0	90.8	0.894	0.962	60.8	54.3	0.574	0.631	
	3	65.5	67.8	0.666	0.737	91.0	86.8	0.888	0.967	58.1	55.7	0.569	0.622	
25	1	60.0	62.1	0.610	0.665	85.3	84.5	0.849	0.931	57.2	58.9	0.580	0.611	
	2	67.6	58.2	0.625	0.665	83.0	88.0	0.854	0.938	58.6	54.2	0.563	0.605	
	3	64.2	59.5	0.617	0.661	88.5	85.0	0.867	0.942	54.9	56.3	0.556	0.590	
30	1	49.2	54.2	0.516	0.569	81.3	84.5	0.828	0.908	56.4	52.8	0.545	0.575	
	2	57.4	49.8	0.533	0.563	84.8	83.0	0.839	0.913	50.7	56.4	0.534	0.564	
	3	53.9	51.1	0.525	0.557	82.0	87.5	0.847	0.918	52.2	50.2	0.512	0.546	
35	1	40.8	49.9	0.449	0.488	73.3	73.3	0.733	0.815	52.9	48.0	0.503	0.528	
	2	48.2	44.6	0.464	0.483	70.0	78.5	0.740	0.812	47.6	52.0	0.497	0.517	
	3	45.8	45.4	0.456	0.478	75.3	69.0	0.720	0.812	49.9	46.6	0.482	0.507	
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>														
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	3	1	74.4	76.5	0.754	0.823	84.5	88.8	0.866	0.941	58.6	66.7	0.623	0.664
		2	67.7	78.5	0.727	0.814	91.3	84.0	0.875	0.943	66.6	59.0	0.626	0.663
		3	64.2	79.5	0.710	0.810	90.3	85.5	0.878	0.944	63.8	60.8	0.622	0.656
7	4	1	75.4	83.3	0.791	0.877	94.0	86.0	0.898	0.963	65.1	57.0	0.608	0.672
		2	84.7	77.6	0.810	0.881	92.0	89.3	0.906	0.964	59.2	60.0	0.596	0.659
		3	82.9	78.6	0.807	0.879	91.5	90.5	0.910	0.966	55.6	61.2	0.583	0.649
7	8	1	86.8	83.1	0.849	0.901	92.0	90.3	0.911	0.973	69.4	68.9	0.692	0.736
		2	84.3	85.2	0.847	0.905	91.0	93.5	0.922	0.978	65.8	71.8	0.686	0.733
		3	83.4	86.2	0.848	0.905	90.0	94.3	0.921	0.979	73.0	64.6	0.685	0.728
7	10	1	86.4	83.7	0.850	0.914	88.5	88.3	0.884	0.945	70.2	68.2	0.692	0.740
		2	82.6	85.7	0.841	0.910	88.5	87.8	0.881	0.949	71.2	67.7	0.694	0.738
		3	85.6	84.5	0.850	0.908	88.3	87.3	0.877	0.944	68.2	69.3	0.688	0.726
7	12	1	80.4	83.8	0.821	0.892	92.8	90.3	0.915	0.972	68.3	68.2	0.683	0.732
		2	82.6	83.5	0.830	0.890	91.0	92.8	0.919	0.976	69.7	66.8	0.682	0.730
		3	80.8	84.8	0.827	0.886	93.3	92.5	0.929	0.976	67.0	68.0	0.675	0.723

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>														
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	14	1	79.0	82.7	0.808	0.888	84.3	87.3	0.857	0.941	64.3	68.2	0.662	0.709
		2	81.9	81.4	0.817	0.888	84.8	86.3	0.855	0.945	65.0	67.1	0.660	0.705
		3	80.4	83.1	0.817	0.888	88.0	83.3	0.856	0.947	67.1	62.8	0.649	0.697
7	16	1	78.5	81.4	0.799	0.876	86.0	86.3	0.861	0.940	65.0	62.7	0.638	0.682
		2	83.3	80.9	0.821	0.877	87.8	88.3	0.880	0.949	65.3	61.7	0.634	0.679
		3	81.3	82.3	0.818	0.878	88.8	87.3	0.880	0.949	62.6	63.0	0.628	0.672
7	20	1	83.4	73.3	0.780	0.842	87.3	80.8	0.839	0.916	57.1	63.4	0.601	0.646
		2	78.4	77.7	0.780	0.842	82.5	85.0	0.837	0.910	63.6	58.0	0.607	0.642
		3	76.8	79.2	0.780	0.843	80.5	87.3	0.837	0.911	61.3	59.6	0.604	0.636
10	3	1	76.9	75.9	0.764	0.821	85.5	88.3	0.869	0.941	69.3	55.6	0.617	0.652
		2	72.8	78.1	0.753	0.813	91.5	83.3	0.872	0.945	65.4	58.9	0.620	0.645
		3	70.2	79.4	0.745	0.809	89.5	86.0	0.877	0.942	63.4	60.2	0.618	0.639
10	4	1	78.2	83.8	0.809	0.883	89.5	89.3	0.894	0.955	65.6	57.7	0.614	0.666
		2	74.5	85.8	0.797	0.885	91.0	88.8	0.899	0.963	60.4	60.6	0.605	0.656
		3	86.8	75.8	0.810	0.885	90.5	89.3	0.899	0.964	57.3	62.0	0.596	0.645
10	8	1	82.4	84.6	0.835	0.903	93.3	92.5	0.929	0.980	71.1	68.6	0.698	0.743
		2	89.1	82.3	0.856	0.907	92.8	93.3	0.930	0.984	67.7	71.8	0.697	0.744
		3	88.2	83.5	0.858	0.908	94.8	91.3	0.930	0.983	69.3	68.9	0.691	0.736
10	10	1	84.7	84.1	0.844	0.904	88.5	87.5	0.880	0.948	69.0	67.2	0.681	0.727
		2	81.9	86.5	0.842	0.904	91.8	89.0	0.904	0.953	70.3	66.4	0.683	0.728
		3	85.8	83.2	0.845	0.903	89.0	91.3	0.901	0.949	67.4	68.3	0.679	0.719
10	12	1	82.9	80.7	0.818	0.880	91.3	91.3	0.912	0.972	69.3	67.0	0.681	0.728
		2	80.3	83.2	0.817	0.880	91.0	91.8	0.914	0.975	69.8	65.4	0.675	0.728
		3	83.2	79.6	0.814	0.876	93.5	90.3	0.918	0.975	67.2	66.9	0.671	0.719
10	14	1	80.6	76.2	0.784	0.871	87.0	85.8	0.864	0.950	64.6	66.2	0.654	0.701
		2	77.3	79.5	0.784	0.874	87.8	85.5	0.866	0.955	65.8	65.0	0.654	0.696
		3	75.8	80.8	0.782	0.871	87.0	86.8	0.869	0.956	63.0	66.2	0.646	0.686
10	16	1	76.3	78.8	0.776	0.856	87.8	84.0	0.858	0.934	65.9	61.2	0.635	0.680
		2	79.3	77.2	0.782	0.858	88.5	86.8	0.876	0.947	61.1	64.7	0.628	0.676
		3	77.3	78.4	0.778	0.856	86.5	88.5	0.875	0.947	61.2	61.9	0.616	0.664
10	20	1	73.4	73.2	0.733	0.812	83.5	86.3	0.849	0.931	59.6	61.4	0.605	0.639
		2	79.3	71.6	0.753	0.819	85.3	87.3	0.862	0.935	58.7	59.4	0.591	0.628
		3	77.5	73.5	0.755	0.817	86.8	83.5	0.851	0.934	56.0	61.3	0.585	0.620
15	3	1	75.8	73.5	0.747	0.795	86.3	87.3	0.867	0.937	69.8	55.6	0.619	0.648
		2	72.6	76.1	0.743	0.790	81.3	91.0	0.858	0.930	66.6	59.0	0.626	0.644
		3	70.5	77.2	0.737	0.787	91.3	84.8	0.879	0.932	63.4	60.1	0.617	0.633
15	4	1	78.4	80.5	0.794	0.876	91.5	89.3	0.904	0.966	65.7	56.2	0.606	0.658
		2	75.3	82.8	0.789	0.880	91.0	89.5	0.902	0.966	60.9	60.7	0.608	0.650
		3	72.1	83.6	0.774	0.878	91.0	90.5	0.907	0.966	57.6	62.2	0.598	0.639
15	8	1	78.2	83.5	0.807	0.889	92.8	91.0	0.919	0.971	70.0	66.9	0.684	0.732
		2	85.5	82.6	0.841	0.891	92.5	91.3	0.919	0.975	66.4	70.3	0.683	0.732
		3	83.9	83.3	0.836	0.889	90.8	93.0	0.919	0.975	68.6	66.9	0.677	0.725

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
15	10	1	81.4	82.6	0.820	0.889	89.0	85.5	0.872	0.938	69.3	64.9	0.670	0.722	
		2	83.2	80.7	0.819	0.891	85.8	89.3	0.875	0.941	65.7	68.9	0.672	0.720	
		3	81.8	82.2	0.820	0.890	85.8	84.0	0.849	0.939	67.4	66.4	0.669	0.710	
15	12	1	77.6	78.8	0.782	0.849	90.3	90.0	0.901	0.966	68.1	64.3	0.662	0.709	
		2	78.6	77.5	0.780	0.846	92.8	89.3	0.910	0.971	63.9	67.8	0.658	0.706	
		3	76.5	78.8	0.776	0.845	92.3	91.3	0.917	0.974	66.0	64.8	0.654	0.698	
15	14	1	74.6	76.2	0.754	0.841	84.8	87.3	0.860	0.939	65.3	63.4	0.644	0.687	
		2	76.1	75.9	0.760	0.840	85.3	85.8	0.855	0.942	65.9	62.0	0.639	0.679	
		3	73.5	77.5	0.754	0.838	84.5	87.5	0.860	0.945	62.0	63.6	0.628	0.669	
15	16	1	76.0	72.1	0.740	0.811	88.3	85.8	0.870	0.933	60.4	62.8	0.616	0.660	
		2	71.7	74.4	0.730	0.811	86.8	90.5	0.886	0.942	61.7	61.1	0.614	0.660	
		3	69.2	75.6	0.723	0.809	86.8	86.5	0.866	0.935	62.1	58.2	0.601	0.651	
15	20	1	67.6	70.0	0.688	0.762	81.0	84.3	0.826	0.908	59.9	57.4	0.586	0.621	
		2	68.5	68.6	0.686	0.759	81.0	85.3	0.831	0.910	61.4	56.3	0.588	0.616	
		3	66.2	69.9	0.680	0.759	83.3	84.3	0.837	0.915	57.9	57.8	0.578	0.608	
20	3	1	76.7	73.2	0.749	0.785	85.3	87.5	0.864	0.927	67.6	53.7	0.598	0.632	
		2	73.0	75.9	0.744	0.779	82.8	91.5	0.869	0.930	64.8	56.7	0.605	0.630	
		3	70.1	77.2	0.734	0.774	90.8	85.0	0.878	0.928	62.0	58.6	0.602	0.622	
20	4	1	77.5	75.6	0.766	0.840	89.0	91.5	0.902	0.965	66.1	54.6	0.598	0.646	
		2	74.5	77.8	0.761	0.842	88.5	89.8	0.891	0.966	62.0	57.8	0.598	0.638	
		3	72.3	78.9	0.755	0.838	90.3	87.5	0.889	0.966	58.6	59.6	0.591	0.628	
20	8	1	74.8	75.2	0.750	0.835	92.3	91.8	0.920	0.977	65.4	69.2	0.673	0.718	
		2	76.8	73.8	0.753	0.835	93.0	91.8	0.924	0.979	66.6	67.8	0.672	0.717	
		3	75.2	75.4	0.753	0.837	92.3	93.3	0.927	0.980	68.8	64.3	0.665	0.710	
20	10	1	76.4	78.2	0.773	0.854	86.8	89.5	0.881	0.947	64.7	67.1	0.659	0.707	
		2	80.2	76.5	0.783	0.856	90.5	87.0	0.887	0.948	64.9	66.1	0.655	0.703	
		3	79.6	77.7	0.786	0.855	88.8	89.3	0.890	0.950	66.7	62.9	0.647	0.698	
20	12	1	72.8	72.8	0.728	0.795	88.8	89.3	0.890	0.960	63.7	64.8	0.642	0.690	
		2	75.8	70.7	0.731	0.793	90.3	87.8	0.890	0.963	64.8	64.0	0.644	0.691	
		3	74.2	71.6	0.729	0.787	89.5	90.3	0.899	0.966	61.2	65.4	0.633	0.684	
20	14	1	72.1	69.7	0.709	0.766	85.3	85.3	0.853	0.929	64.9	58.9	0.617	0.658	
		2	66.3	72.7	0.694	0.765	87.3	86.8	0.870	0.941	61.1	62.8	0.619	0.656	
		3	69.6	67.1	0.683	0.761	89.3	86.0	0.876	0.939	62.3	58.1	0.601	0.646	
20	16	1	62.8	67.5	0.651	0.725	84.8	82.5	0.836	0.916	60.4	57.4	0.589	0.627	
		2	68.7	65.2	0.669	0.729	86.0	81.8	0.838	0.924	60.6	56.2	0.583	0.624	
		3	66.2	66.5	0.664	0.727	84.3	83.8	0.840	0.924	57.3	57.7	0.575	0.617	
20	20	1	59.9	64.1	0.619	0.684	80.0	82.8	0.814	0.902	52.9	56.8	0.548	0.580	
		2	61.5	61.5	0.615	0.677	82.5	85.5	0.840	0.912	53.1	55.7	0.544	0.575	
		3	58.8	62.4	0.606	0.676	84.8	82.3	0.835	0.908	55.1	51.7	0.533	0.567	
25	3	1	75.2	68.8	0.719	0.743	84.3	86.8	0.855	0.929	68.1	53.1	0.597	0.624	
		2	71.2	71.8	0.715	0.740	79.8	90.3	0.847	0.928	63.6	56.2	0.597	0.613	
		3	68.6	73.3	0.709	0.734	89.5	78.8	0.838	0.923	61.1	58.0	0.595	0.607	

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
25	4	1	76.2	72.3	0.742	0.812	90.8	87.5	0.891	0.966	53.4	63.7	0.581	0.618	
		2	73.1	75.1	0.741	0.814	91.0	87.3	0.891	0.967	59.0	55.4	0.572	0.611	
		3	69.6	76.2	0.728	0.808	87.5	89.3	0.884	0.966	55.6	57.0	0.563	0.597	
25	8	1	73.4	67.4	0.703	0.772	90.3	89.3	0.897	0.956	64.4	64.6	0.645	0.692	
		2	67.2	70.1	0.686	0.764	91.5	87.8	0.896	0.960	65.1	63.6	0.643	0.687	
		3	64.3	71.2	0.676	0.762	90.5	89.8	0.901	0.962	62.4	65.0	0.637	0.681	
25	10	1	71.8	70.6	0.712	0.794	86.0	86.5	0.862	0.938	64.6	62.0	0.633	0.679	
		2	73.0	70.8	0.719	0.797	85.3	86.8	0.860	0.934	64.9	60.6	0.626	0.673	
		3	70.3	71.5	0.709	0.794	86.3	85.5	0.859	0.939	61.6	62.4	0.620	0.663	
25	12	1	70.7	63.8	0.671	0.737	86.8	91.0	0.888	0.955	62.2	61.1	0.617	0.655	
		2	63.9	66.4	0.651	0.733	89.8	90.5	0.901	0.962	63.3	60.2	0.617	0.655	
		3	61.8	67.5	0.645	0.729	92.3	88.8	0.905	0.961	59.7	61.6	0.606	0.645	
25	14	1	61.5	63.2	0.623	0.689	83.8	82.3	0.830	0.914	57.2	60.7	0.589	0.629	
		2	65.4	61.8	0.636	0.684	87.0	81.3	0.840	0.921	60.1	57.3	0.587	0.623	
		3	63.1	63.1	0.631	0.684	85.0	83.0	0.840	0.921	56.1	58.8	0.574	0.612	
25	16	1	64.8	60.5	0.626	0.663	82.3	81.8	0.820	0.899	54.8	58.2	0.564	0.592	
		2	60.8	62.7	0.617	0.664	84.0	83.3	0.836	0.907	55.9	56.6	0.562	0.589	
		3	66.9	61.4	0.640	0.665	80.3	86.0	0.830	0.907	58.3	52.6	0.553	0.580	
25	20	1	58.7	56.8	0.578	0.615	72.3	80.3	0.760	0.869	53.2	50.6	0.519	0.532	
		2	61.6	55.5	0.584	0.610	80.3	77.5	0.789	0.872	48.1	53.9	0.508	0.524	
		3	59.5	56.3	0.579	0.609	77.5	80.5	0.790	0.877	50.9	49.3	0.501	0.516	
30	3	1	71.3	61.0	0.658	0.702	84.3	79.5	0.818	0.899	65.3	50.7	0.571	0.596	
		2	67.2	65.2	0.661	0.700	81.3	85.8	0.834	0.904	61.0	54.0	0.573	0.589	
		3	64.6	66.2	0.654	0.691	78.8	87.8	0.830	0.903	57.6	55.8	0.567	0.577	
30	4	1	76.3	64.8	0.701	0.760	89.8	88.8	0.892	0.964	51.0	62.0	0.560	0.588	
		2	71.6	67.5	0.695	0.758	90.5	88.5	0.895	0.970	56.0	53.2	0.546	0.574	
		3	69.2	68.4	0.688	0.753	89.0	89.5	0.892	0.967	51.9	54.8	0.533	0.555	
30	8	1	68.8	66.8	0.678	0.739	90.8	91.3	0.910	0.967	65.1	61.8	0.634	0.671	
		2	72.4	65.6	0.688	0.736	90.0	91.3	0.906	0.962	60.6	65.2	0.628	0.668	
		3	69.9	66.7	0.683	0.732	91.0	91.3	0.911	0.964	63.0	62.1	0.626	0.662	
30	10	1	70.5	66.9	0.687	0.737	80.8	84.5	0.826	0.910	62.3	58.7	0.604	0.650	
		2	67.5	69.8	0.686	0.741	83.5	86.3	0.849	0.913	58.7	63.2	0.609	0.648	
		3	65.8	70.5	0.681	0.740	84.8	86.5	0.856	0.913	59.3	60.4	0.599	0.636	
30	12	1	60.8	58.9	0.598	0.648	87.8	89.3	0.885	0.950	57.8	62.2	0.599	0.638	
		2	55.2	61.8	0.583	0.647	88.3	89.0	0.886	0.958	56.6	61.1	0.587	0.627	
		3	64.8	58.3	0.614	0.644	89.5	86.8	0.881	0.958	59.3	58.2	0.588	0.621	
30	14	1	63.7	59.3	0.614	0.643	83.8	81.5	0.826	0.917	56.7	56.8	0.567	0.602	
		2	58.7	61.3	0.600	0.642	84.8	81.3	0.830	0.920	58.3	54.1	0.561	0.593	
		3	64.2	58.3	0.611	0.640	83.5	83.0	0.832	0.921	54.9	55.2	0.551	0.579	
30	16	1	59.9	54.1	0.569	0.610	82.0	82.8	0.824	0.898	54.4	55.0	0.547	0.562	
		2	54.8	56.4	0.556	0.605	84.5	84.8	0.846	0.912	55.1	53.9	0.545	0.557	
		3	50.5	57.4	0.537	0.604	87.0	82.5	0.847	0.915	51.9	55.6	0.537	0.550	

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftrichtung</i>														
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
30	20	1	61.3	51.4	0.559	0.557	72.5	72.3	0.724	0.842	47.1	52.4	0.496	0.499
		2	55.8	53.4	0.546	0.557	69.5	77.0	0.731	0.847	46.3	50.8	0.485	0.490
		3	53.8	54.2	0.540	0.559	79.3	69.3	0.739	0.849	48.9	46.8	0.478	0.482
35	3	1	65.8	58.0	0.616	0.651	82.5	80.0	0.812	0.878	63.2	48.1	0.546	0.565
		2	60.3	61.4	0.608	0.643	78.8	85.5	0.820	0.880	59.3	51.2	0.550	0.558
		3	57.5	63.2	0.602	0.640	84.5	73.3	0.785	0.877	55.8	53.0	0.544	0.548
35	4	1	73.0	57.9	0.646	0.699	86.5	87.3	0.869	0.938	50.1	57.6	0.536	0.562
		2	68.8	60.3	0.643	0.696	85.3	85.5	0.854	0.936	55.8	49.2	0.523	0.550
		3	64.8	62.2	0.635	0.688	86.5	85.0	0.857	0.936	51.8	50.4	0.511	0.537
35	8	1	58.5	62.5	0.604	0.652	88.8	87.0	0.879	0.942	55.9	61.0	0.583	0.624
		2	62.3	60.6	0.614	0.651	89.0	86.8	0.879	0.948	57.0	59.7	0.583	0.621
		3	60.2	61.8	0.610	0.650	86.0	88.8	0.874	0.946	59.9	56.6	0.582	0.615
35	10	1	61.2	63.1	0.621	0.674	79.0	78.0	0.785	0.874	57.0	59.0	0.580	0.617
		2	61.9	61.4	0.617	0.669	79.8	76.3	0.780	0.880	57.1	57.1	0.571	0.616
		3	59.5	62.3	0.609	0.667	77.3	78.5	0.779	0.876	58.0	54.2	0.560	0.608
35	12	1	56.6	58.7	0.576	0.608	86.3	82.0	0.841	0.920	53.7	57.2	0.554	0.585
		2	54.3	58.8	0.565	0.611	85.3	83.5	0.844	0.926	54.2	56.6	0.554	0.585
		3	62.5	54.4	0.582	0.606	83.5	86.3	0.849	0.927	56.6	54.1	0.553	0.579
35	14	1	56.6	56.5	0.565	0.591	76.8	72.3	0.744	0.842	54.4	53.4	0.539	0.570
		2	59.8	54.8	0.572	0.589	74.0	77.8	0.758	0.849	49.7	56.2	0.527	0.563
		3	56.5	55.6	0.560	0.586	77.3	73.3	0.752	0.855	53.3	50.8	0.520	0.554
35	16	1	50.6	53.8	0.521	0.552	79.5	73.8	0.765	0.836	48.6	53.1	0.507	0.525
		2	55.0	51.7	0.533	0.552	76.8	80.0	0.783	0.844	47.6	51.8	0.496	0.519
		3	53.2	52.8	0.530	0.553	77.3	73.5	0.753	0.843	50.7	49.0	0.498	0.512
35	20	1	59.5	48.7	0.535	0.524	68.0	58.3	0.627	0.739	45.9	48.4	0.471	0.463
		2	54.7	50.8	0.527	0.524	65.0	64.8	0.649	0.745	46.6	47.0	0.468	0.459
		3	52.0	51.5	0.517	0.522	62.8	68.3	0.654	0.745	48.7	44.0	0.462	0.452
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>														
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	3	1	34.2	40.2	0.369	0.382	54.5	67.0	0.601	0.637	28.1	27.7	0.279	0.270
		2	29.5	41.2	0.344	0.378	53.3	70.8	0.608	0.637	23.3	29.2	0.259	0.263
		3	26.8	41.5	0.325	0.373	53.0	72.3	0.611	0.639	22.2	29.8	0.255	0.262
7	4	1	15.2	54.8	0.237	0.425	57.8	49.8	0.535	0.643	32.7	26.3	0.292	0.267
		2	11.5	56.8	0.192	0.425	57.0	52.2	0.545	0.647	28.8	28.1	0.284	0.269
		3	10.6	59.7	0.180	0.435	56.5	53.8	0.551	0.648	27.2	29.0	0.281	0.270
7	8	1	45.5	35.5	0.399	0.381	61.0	48.3	0.539	0.636	30.1	27.8	0.289	0.262
		2	42.5	36.5	0.393	0.381	60.3	51.5	0.555	0.639	28.4	29.1	0.288	0.261
		3	41.1	36.8	0.388	0.375	59.8	53.3	0.563	0.641	27.1	29.7	0.283	0.260
7	10	1	24.8	46.7	0.324	0.392	57.3	58.7	0.580	0.648	16.7	34.2	0.224	0.266
		2	53.7	29.9	0.384	0.388	57.0	62.8	0.597	0.651	14.1	35.8	0.202	0.264
		3	52.2	30.0	0.381	0.385	56.5	64.5	0.602	0.652	12.8	36.6	0.189	0.263

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>														
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	12	1	43.2	37.2	0.400	0.402	56.0	68.3	0.615	0.663	23.2	30.7	0.264	0.251
		2	38.3	38.7	0.385	0.396	54.8	72.3	0.623	0.665	20.2	31.9	0.247	0.248
		3	37.2	39.2	0.382	0.395	54.3	74.0	0.626	0.666	18.9	32.6	0.239	0.247
7	16	1	29.4	41.5	0.344	0.402	49.3	82.8	0.617	0.676	39.9	26.4	0.318	0.259
		2	27.3	42.8	0.334	0.403	72.5	40.5	0.520	0.672	38.0	27.6	0.319	0.256
		3	25.5	43.6	0.322	0.402	72.3	41.5	0.527	0.670	36.7	27.9	0.317	0.251
7	20	1	47.8	31.8	0.382	0.400	62.8	68.3	0.654	0.716	21.4	32.6	0.259	0.247
		2	45.9	32.4	0.380	0.396	61.8	72.5	0.667	0.722	17.9	33.6	0.233	0.243
		3	44.7	32.9	0.379	0.400	61.0	74.5	0.671	0.723	16.4	33.9	0.221	0.240
10	3	1	49.9	34.2	0.406	0.387	55.8	54.5	0.551	0.626	26.1	26.8	0.264	0.250
		2	47.2	35.1	0.403	0.389	54.5	58.0	0.562	0.628	22.1	28.0	0.247	0.247
		3	45.9	35.7	0.402	0.391	53.5	60.3	0.567	0.629	20.7	29.0	0.241	0.248
10	4	1	57.1	27.8	0.374	0.373	56.8	46.8	0.513	0.629	32.6	25.3	0.285	0.249
		2	54.8	28.9	0.379	0.373	55.5	48.8	0.519	0.632	30.3	26.6	0.283	0.248
		3	53.7	29.5	0.380	0.373	54.0	49.3	0.515	0.629	28.8	27.6	0.282	0.249
10	8	1	36.1	43.2	0.393	0.399	58.7	53.8	0.561	0.650	23.3	29.1	0.259	0.248
		2	42.7	36.6	0.394	0.391	57.5	58.0	0.577	0.648	20.7	30.2	0.245	0.246
		3	40.9	37.0	0.389	0.390	57.0	60.0	0.585	0.650	36.4	25.2	0.298	0.246
10	10	1	40.0	39.7	0.398	0.406	59.0	56.0	0.575	0.666	34.6	26.4	0.300	0.253
		2	35.7	40.8	0.381	0.397	57.8	59.5	0.586	0.667	33.3	26.9	0.298	0.251
		3	41.5	34.2	0.375	0.397	58.0	62.0	0.599	0.668	32.1	27.4	0.296	0.250
10	12	1	33.8	38.4	0.359	0.407	59.0	59.8	0.594	0.676	35.3	27.9	0.312	0.260
		2	31.2	40.1	0.351	0.404	58.3	64.3	0.611	0.681	33.7	28.7	0.310	0.256
		3	29.8	40.8	0.345	0.403	58.0	65.8	0.616	0.681	32.6	29.2	0.308	0.254
10	16	1	40.8	36.5	0.385	0.412	63.0	64.8	0.639	0.709	31.9	30.3	0.311	0.264
		2	36.8	37.6	0.372	0.407	60.0	68.3	0.639	0.712	29.1	31.0	0.300	0.260
		3	35.6	38.5	0.370	0.408	66.0	59.5	0.626	0.714	28.2	31.4	0.297	0.258
10	20	1	41.1	38.6	0.398	0.414	69.5	63.0	0.661	0.738	28.0	32.2	0.300	0.264
		2	38.9	39.6	0.393	0.410	67.8	66.5	0.671	0.741	32.7	30.4	0.315	0.261
		3	37.8	40.1	0.389	0.408	66.3	68.0	0.671	0.739	32.0	31.1	0.315	0.260
15	3	1	53.9	29.7	0.383	0.388	55.3	59.5	0.573	0.641	24.6	26.7	0.256	0.247
		2	50.8	30.3	0.380	0.386	53.8	63.0	0.580	0.640	19.1	28.4	0.229	0.242
		3	49.6	30.5	0.377	0.383	53.5	64.8	0.586	0.639	16.2	29.1	0.208	0.238
15	4	1	43.8	39.2	0.414	0.417	54.5	64.0	0.589	0.634	20.8	28.7	0.241	0.244
		2	39.0	40.2	0.396	0.409	56.5	48.3	0.521	0.639	31.4	24.3	0.274	0.241
		3	36.8	40.5	0.386	0.406	56.3	49.8	0.528	0.639	29.1	25.0	0.269	0.238
15	8	1	36.9	38.7	0.378	0.408	64.3	62.3	0.632	0.696	25.3	27.8	0.265	0.249
		2	33.5	40.2	0.365	0.401	59.8	66.3	0.628	0.686	22.9	28.6	0.254	0.246
		3	32.3	40.7	0.360	0.401	65.0	58.0	0.613	0.682	20.8	28.9	0.242	0.242
15	10	1	37.7	35.8	0.367	0.408	61.5	66.3	0.638	0.698	37.7	28.0	0.321	0.253
		2	35.4	36.9	0.361	0.407	60.3	69.3	0.644	0.701	32.9	28.9	0.308	0.250
		3	34.0	37.5	0.357	0.406	68.0	61.8	0.647	0.704	32.1	29.4	0.307	0.249

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>														
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
15	12	1	37.0	38.2	0.376	0.415	61.0	70.8	0.655	0.731	29.7	29.3	0.295	0.256
		2	37.9	37.2	0.376	0.412	70.8	65.3	0.679	0.733	33.1	27.9	0.303	0.250
		3	36.2	37.8	0.369	0.410	67.8	67.8	0.678	0.732	32.2	28.2	0.301	0.246
15	16	1	38.6	38.8	0.387	0.404	58.0	72.0	0.642	0.725	27.4	30.1	0.287	0.255
		2	35.0	40.0	0.373	0.400	69.3	57.8	0.630	0.723	31.8	28.8	0.302	0.250
		3	32.5	41.1	0.363	0.403	68.0	60.0	0.638	0.725	31.1	29.1	0.301	0.250
15	20	1	34.4	40.4	0.371	0.411	61.0	73.8	0.668	0.731	30.7	29.0	0.298	0.256
		2	32.0	42.6	0.366	0.409	74.0	59.2	0.658	0.728	26.8	29.8	0.282	0.250
		3	48.0	37.2	0.419	0.410	72.8	61.0	0.664	0.730	25.6	30.8	0.279	0.250
20	3	1	28.5	45.0	0.349	0.394	55.0	61.8	0.582	0.622	18.4	26.9	0.219	0.235
		2	25.7	46.5	0.331	0.386	54.3	65.0	0.591	0.623	15.2	28.3	0.198	0.232
		3	24.0	47.3	0.318	0.383	57.5	47.5	0.520	0.622	13.4	29.1	0.184	0.219
20	4	1	36.6	43.4	0.397	0.407	56.3	58.7	0.575	0.610	29.8	23.0	0.260	0.233
		2	43.4	37.0	0.399	0.394	55.0	63.3	0.588	0.608	26.0	23.8	0.248	0.228
		3	41.4	37.2	0.392	0.390	54.8	65.3	0.595	0.607	23.6	24.4	0.240	0.222
20	8	1	39.8	36.2	0.379	0.413	60.8	62.5	0.616	0.691	26.1	27.2	0.267	0.241
		2	34.9	38.2	0.365	0.406	64.8	58.0	0.612	0.692	22.1	28.2	0.248	0.236
		3	37.9	35.9	0.369	0.405	64.0	60.5	0.622	0.694	20.6	28.4	0.239	0.236
20	10	1	35.8	36.9	0.363	0.406	60.3	68.3	0.640	0.715	25.4	28.6	0.269	0.248
		2	34.2	38.5	0.363	0.403	67.5	63.8	0.656	0.721	29.2	27.9	0.285	0.243
		3	41.0	36.0	0.383	0.404	66.3	66.3	0.663	0.721	28.3	28.2	0.283	0.240
20	12	1	32.0	41.5	0.361	0.395	69.0	56.3	0.620	0.719	27.1	26.8	0.269	0.239
		2	44.7	35.8	0.397	0.392	68.3	61.8	0.648	0.727	24.1	27.7	0.258	0.236
		3	44.0	36.4	0.398	0.393	66.8	63.8	0.652	0.725	29.2	26.3	0.277	0.235
20	16	1	43.2	38.2	0.405	0.404	59.5	68.0	0.635	0.700	32.4	27.4	0.297	0.241
		2	40.9	39.9	0.404	0.404	56.5	71.8	0.632	0.695	28.9	28.7	0.288	0.239
		3	40.2	40.2	0.402	0.403	55.5	74.0	0.634	0.698	27.2	29.0	0.281	0.238
20	20	1	42.6	41.0	0.418	0.405	57.3	65.5	0.611	0.675	25.9	29.6	0.276	0.241
		2	41.2	41.8	0.415	0.402	54.5	72.3	0.621	0.681	22.2	30.8	0.258	0.237
		3	40.8	42.3	0.415	0.403	66.5	49.8	0.569	0.685	33.9	26.0	0.294	0.236
25	3	1	42.8	39.9	0.413	0.416	55.3	59.5	0.573	0.613	16.6	26.6	0.204	0.230
		2	39.1	41.2	0.401	0.405	54.0	64.5	0.588	0.609	12.6	27.7	0.173	0.226
		3	35.5	41.8	0.384	0.400	56.3	44.3	0.495	0.606	11.1	28.8	0.160	0.224
25	4	1	38.5	42.9	0.406	0.414	59.0	49.8	0.540	0.635	20.2	26.8	0.230	0.238
		2	42.4	36.9	0.395	0.405	56.5	53.3	0.548	0.632	28.7	23.7	0.259	0.234
		3	40.8	37.1	0.389	0.402	56.0	54.5	0.552	0.633	25.3	24.3	0.248	0.228
25	8	1	38.0	39.6	0.388	0.413	65.3	66.3	0.657	0.709	24.8	25.8	0.253	0.241
		2	39.3	37.8	0.385	0.407	68.5	63.5	0.659	0.708	21.7	27.3	0.242	0.236
		3	37.1	39.1	0.381	0.406	64.8	64.8	0.647	0.702	30.3	24.4	0.271	0.233
25	10	1	39.8	38.6	0.392	0.400	65.0	56.8	0.606	0.672	28.2	26.7	0.274	0.241
		2	37.5	40.1	0.387	0.399	64.0	62.0	0.630	0.683	24.0	27.8	0.258	0.236
		3	35.7	40.5	0.380	0.396	63.0	65.0	0.640	0.684	31.2	26.3	0.286	0.234

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>														
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
25	12	1	39.8	41.1	0.405	0.409	60.8	65.0	0.628	0.695	26.2	26.6	0.264	0.243
		2	35.2	42.8	0.386	0.402	58.3	70.8	0.639	0.695	22.9	27.4	0.250	0.237
		3	46.1	37.5	0.413	0.398	56.8	72.3	0.636	0.680	31.8	26.3	0.288	0.237
25	16	1	41.2	37.9	0.395	0.385	55.0	68.8	0.611	0.650	26.0	25.9	0.259	0.229
		2	39.0	39.8	0.394	0.388	61.8	53.0	0.570	0.637	22.9	27.4	0.250	0.229
		3	38.2	40.5	0.393	0.389	60.5	55.0	0.576	0.638	21.6	27.9	0.243	0.228
25	20	1	37.2	39.8	0.385	0.380	54.8	63.5	0.588	0.624	28.3	25.4	0.268	0.234
		2	35.6	40.9	0.381	0.383	61.5	48.0	0.539	0.623	25.9	27.0	0.264	0.232
		3	33.7	41.4	0.371	0.384	59.0	49.8	0.540	0.618	24.6	27.7	0.260	0.231
30	3	1	32.2	38.2	0.349	0.375	56.8	52.7	0.547	0.622	14.2	27.1	0.187	0.220
		2	39.2	33.3	0.360	0.375	54.3	57.0	0.556	0.614	11.3	28.4	0.162	0.217
		3	37.5	33.5	0.354	0.372	53.5	59.0	0.561	0.608	10.0	30.0	0.150	0.214
30	4	1	42.5	34.7	0.382	0.392	57.0	59.5	0.582	0.634	20.0	25.8	0.225	0.225
		2	38.4	35.5	0.369	0.386	55.8	63.5	0.594	0.628	26.7	22.4	0.244	0.224
		3	36.8	35.9	0.363	0.382	55.0	66.0	0.600	0.627	24.8	22.9	0.238	0.222
30	8	1	37.4	36.8	0.371	0.401	66.8	61.8	0.642	0.725	28.6	24.2	0.262	0.232
		2	39.4	34.6	0.368	0.393	63.5	67.0	0.652	0.723	24.4	25.6	0.250	0.229
		3	37.2	35.1	0.361	0.391	67.3	61.5	0.642	0.729	28.3	24.1	0.261	0.226
30	10	1	41.8	35.6	0.384	0.389	61.5	70.5	0.657	0.725	23.8	25.2	0.245	0.225
		2	36.5	36.3	0.364	0.380	72.3	56.3	0.633	0.730	27.4	24.6	0.259	0.222
		3	34.5	36.9	0.356	0.378	70.5	59.0	0.642	0.731	26.3	25.1	0.257	0.220
30	12	1	39.1	39.2	0.391	0.396	65.8	57.3	0.612	0.705	26.2	24.9	0.255	0.224
		2	44.8	36.4	0.402	0.389	62.3	62.5	0.624	0.711	26.6	23.4	0.249	0.220
		3	43.0	37.2	0.399	0.387	60.8	65.3	0.629	0.710	25.1	24.0	0.245	0.220
30	16	1	34.8	41.0	0.377	0.387	60.0	60.8	0.604	0.642	28.7	23.1	0.256	0.219
		2	43.6	38.1	0.407	0.384	57.5	67.0	0.619	0.648	23.0	24.2	0.236	0.215
		3	42.3	38.5	0.403	0.383	56.3	69.5	0.622	0.646	20.6	24.7	0.224	0.212
30	20	1	32.8	41.3	0.365	0.371	56.8	51.8	0.541	0.603	23.4	22.8	0.231	0.207
		2	42.1	36.8	0.392	0.367	54.0	56.5	0.552	0.601	20.4	24.0	0.221	0.206
		3	40.5	37.6	0.390	0.368	53.0	59.8	0.562	0.602	18.4	24.4	0.210	0.204
35	3	1	40.7	35.3	0.378	0.366	57.0	51.5	0.541	0.607	13.1	27.9	0.178	0.217
		2	34.5	37.0	0.357	0.364	56.3	55.5	0.559	0.613	10.4	29.2	0.154	0.214
		3	33.3	37.3	0.352	0.361	55.8	57.5	0.566	0.612	9.6	30.0	0.145	0.213
35	4	1	44.5	37.7	0.408	0.402	56.0	66.0	0.606	0.641	23.6	25.8	0.246	0.232
		2	40.5	39.3	0.399	0.395	59.2	52.7	0.558	0.643	20.3	26.8	0.231	0.228
		3	37.8	40.0	0.389	0.390	58.0	55.0	0.565	0.642	29.2	23.4	0.260	0.226
35	8	1	36.8	37.2	0.370	0.379	62.8	66.5	0.646	0.705	27.2	26.3	0.268	0.244
		2	33.1	38.7	0.357	0.376	60.3	71.8	0.655	0.718	23.6	27.2	0.253	0.235
		3	31.6	39.7	0.352	0.375	68.8	59.8	0.639	0.722	27.3	25.3	0.263	0.232
35	10	1	43.9	35.9	0.395	0.397	62.0	60.8	0.614	0.670	26.3	24.8	0.255	0.233
		2	38.5	37.8	0.382	0.384	59.2	66.3	0.626	0.680	21.4	25.7	0.234	0.225
		3	37.5	39.7	0.386	0.383	57.5	68.0	0.623	0.683	27.1	23.6	0.252	0.223

D Resultate – tabellarisch

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>				
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung</i>															
<i>w</i>	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
35	12	1	37.1	38.9	0.380	0.379	55.8	62.3	0.588	0.644	24.8	24.3	0.246	0.228	
		2	29.3	40.2	0.339	0.375	54.3	67.5	0.602	0.645	22.1	25.1	0.235	0.226	
		3	47.9	35.9	0.411	0.374	63.0	51.5	0.567	0.647	28.3	22.8	0.253	0.219	
35	16	1	45.9	37.8	0.415	0.382	59.5	47.0	0.525	0.608	23.1	23.6	0.233	0.216	
		2	42.7	38.4	0.404	0.376	56.8	51.8	0.541	0.609	19.3	24.3	0.215	0.211	
		3	40.6	38.5	0.395	0.373	55.0	53.8	0.544	0.604	17.6	24.8	0.206	0.207	
35	20	1	45.3	36.2	0.403	0.375	56.5	44.3	0.496	0.550	19.4	23.2	0.212	0.208	
		2	42.9	36.8	0.396	0.371	51.0	47.8	0.493	0.548	13.2	24.3	0.171	0.201	
		3	41.4	37.2	0.392	0.370	49.5	49.8	0.496	0.548	31.0	20.3	0.246	0.202	
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung</i>															
	<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
	3	1	35.2	33.9	0.345	0.311	47.3	42.5	0.447	0.473	20.3	22.1	0.212	0.159	
		2	32.8	34.9	0.339	0.308	46.0	45.0	0.455	0.475	19.3	22.7	0.209	0.160	
		3	36.4	33.3	0.348	0.309	45.8	46.8	0.462	0.476	18.9	22.9	0.207	0.159	
	4	1	40.4	35.4	0.377	0.358	57.3	58.5	0.579	0.636	26.4	21.1	0.235	0.192	
		2	38.0	37.2	0.376	0.357	58.0	52.2	0.550	0.631	25.2	21.7	0.233	0.191	
		3	34.9	38.2	0.365	0.353	56.8	54.3	0.555	0.627	24.0	22.1	0.230	0.189	
	5	1	26.0	47.2	0.335	0.388	59.5	58.3	0.589	0.636	20.1	22.1	0.211	0.169	
		2	54.2	34.0	0.418	0.385	57.5	63.8	0.605	0.635	23.3	19.8	0.214	0.165	
		3	53.3	34.5	0.419	0.384	60.8	53.0	0.566	0.633	22.1	20.0	0.210	0.162	
	6	1	40.6	41.7	0.411	0.432	63.5	60.5	0.620	0.715	21.7	29.1	0.248	0.222	
		2	36.7	42.8	0.395	0.428	61.8	66.8	0.642	0.717	19.4	30.1	0.236	0.216	
		3	34.5	43.5	0.385	0.423	59.8	69.0	0.640	0.710	31.7	21.2	0.254	0.210	
	7	1	40.4	42.5	0.414	0.437	60.8	57.0	0.588	0.650	27.8	24.7	0.261	0.230	
		2	37.2	44.9	0.407	0.427	59.0	61.3	0.601	0.656	25.9	25.3	0.256	0.222	
		3	43.1	38.1	0.404	0.425	58.0	63.3	0.605	0.656	25.0	26.1	0.255	0.218	
	8	1	37.6	43.5	0.404	0.437	58.3	65.5	0.617	0.667	28.6	28.2	0.284	0.253	
		2	45.0	38.6	0.416	0.432	60.3	62.0	0.611	0.668	25.8	29.4	0.275	0.246	
		3	43.3	39.5	0.413	0.430	59.5	65.3	0.622	0.668	29.0	26.7	0.278	0.241	
	9	1	41.8	41.3	0.415	0.434	60.5	68.5	0.643	0.689	27.1	27.3	0.272	0.253	
		2	37.8	42.7	0.401	0.429	63.0	62.5	0.627	0.681	28.9	24.8	0.267	0.245	
		3	35.8	43.5	0.393	0.427	61.8	65.8	0.637	0.676	27.2	25.9	0.265	0.243	
	10	1	45.8	39.8	0.426	0.440	62.3	57.8	0.599	0.666	27.6	27.9	0.277	0.261	
		2	41.4	41.0	0.412	0.433	60.5	61.8	0.611	0.666	24.6	29.6	0.268	0.256	
		3	39.6	41.8	0.407	0.431	58.5	64.5	0.614	0.663	28.6	25.7	0.270	0.251	
	11	1	41.8	37.8	0.397	0.414	59.5	63.8	0.616	0.673	27.8	29.0	0.284	0.269	
		2	38.2	39.2	0.387	0.413	61.0	60.3	0.606	0.674	29.0	27.3	0.281	0.266	
		3	35.7	39.8	0.376	0.410	60.3	62.8	0.615	0.673	27.3	28.2	0.278	0.261	
	12	1	42.0	37.7	0.397	0.437	64.0	63.8	0.639	0.709	28.8	29.9	0.293	0.273	
		2	38.9	39.1	0.390	0.438	61.5	70.0	0.655	0.716	32.1	27.0	0.293	0.268	
		3	36.2	39.6	0.378	0.431	68.0	60.0	0.638	0.720	30.0	28.0	0.290	0.264	

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftneigung</i>													
<i>q</i>	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
13	1	47.0	38.7	0.424	0.442	59.2	62.8	0.609	0.679	31.9	28.2	0.299	0.273
	2	42.4	39.7	0.410	0.432	62.0	56.8	0.593	0.686	27.6	29.6	0.285	0.265
	3	39.6	40.1	0.398	0.428	61.0	59.8	0.604	0.690	29.6	27.3	0.284	0.261
14	1	42.0	38.6	0.402	0.419	62.8	54.5	0.583	0.653	27.1	27.2	0.272	0.258
	2	38.0	40.7	0.393	0.417	60.8	61.8	0.612	0.653	28.7	24.7	0.265	0.252
	3	35.4	41.2	0.381	0.412	58.7	64.0	0.613	0.648	26.9	25.8	0.263	0.250
15	1	41.5	40.5	0.410	0.413	58.0	60.0	0.590	0.644	24.7	29.2	0.268	0.260
	2	38.2	42.6	0.403	0.412	56.5	65.3	0.606	0.648	28.4	26.8	0.276	0.254
	3	41.7	38.7	0.401	0.409	59.0	53.0	0.558	0.646	25.4	27.3	0.264	0.250
16	1	35.7	40.9	0.381	0.400	61.0	59.0	0.600	0.647	30.2	28.6	0.294	0.277
	2	43.6	36.6	0.398	0.397	59.8	58.0	0.589	0.655	26.7	30.2	0.283	0.271
	3	42.5	37.3	0.397	0.396	58.0	60.8	0.593	0.656	32.2	26.9	0.293	0.266
18	1	33.5	37.5	0.354	0.383	59.2	53.5	0.562	0.619	28.0	31.0	0.294	0.273
	2	41.9	34.9	0.381	0.381	57.5	60.0	0.587	0.623	31.4	28.3	0.298	0.270
	3	39.8	35.6	0.376	0.381	59.2	53.0	0.560	0.624	29.7	29.1	0.294	0.265
20	1	39.0	37.1	0.380	0.392	55.5	58.3	0.568	0.595	27.6	27.1	0.273	0.254
	2	35.8	38.8	0.372	0.388	57.3	54.5	0.558	0.604	27.6	25.6	0.265	0.248
	3	34.0	39.6	0.366	0.387	56.5	57.5	0.570	0.606	25.8	26.3	0.261	0.246
22	1	30.2	35.9	0.328	0.368	53.8	59.5	0.565	0.587	26.2	26.9	0.266	0.248
	2	40.5	33.2	0.365	0.364	55.5	52.7	0.541	0.595	28.8	24.9	0.267	0.240
	3	39.3	33.6	0.362	0.365	54.8	55.5	0.551	0.599	27.0	25.8	0.264	0.238
24	1	36.2	33.9	0.350	0.352	54.3	57.8	0.559	0.578	32.0	24.6	0.278	0.250
	2	32.2	35.0	0.335	0.350	55.5	54.8	0.551	0.590	28.7	25.3	0.269	0.245
	3	35.7	33.4	0.345	0.350	55.0	58.0	0.565	0.594	26.0	26.0	0.260	0.240
26	1	33.9	37.7	0.357	0.364	53.3	59.5	0.562	0.567	24.9	26.4	0.256	0.242
	2	30.9	38.8	0.344	0.362	55.3	51.8	0.534	0.575	21.7	27.9	0.244	0.239
	3	40.2	35.0	0.374	0.362	54.0	55.0	0.545	0.577	30.6	22.7	0.260	0.236
28	1	28.8	33.9	0.311	0.346	55.5	50.5	0.529	0.557	27.3	23.6	0.253	0.224
	2	37.8	31.2	0.342	0.342	54.3	56.0	0.551	0.560	24.4	24.9	0.247	0.223
	3	36.8	31.9	0.342	0.341	53.5	60.3	0.567	0.566	22.9	24.6	0.237	0.221
30	1	33.9	32.5	0.332	0.335	52.0	50.0	0.510	0.530	23.9	24.9	0.244	0.232
	2	30.4	33.5	0.319	0.331	51.3	55.8	0.534	0.539	28.7	23.8	0.260	0.229
	3	28.0	34.2	0.308	0.330	53.0	47.0	0.498	0.543	26.9	24.2	0.255	0.226
32	1	29.5	33.3	0.313	0.327	50.8	54.8	0.527	0.509	22.6	25.0	0.237	0.222
	2	36.5	29.8	0.328	0.322	52.2	44.8	0.482	0.517	22.8	23.4	0.231	0.219
	3	35.3	30.1	0.325	0.321	52.2	47.5	0.498	0.526	21.1	24.3	0.226	0.218
34	1	34.2	29.5	0.316	0.318	52.2	47.3	0.496	0.506	24.7	22.6	0.236	0.215
	2	31.2	31.0	0.311	0.320	51.3	51.8	0.515	0.520	21.7	23.3	0.225	0.211
	3	29.4	31.7	0.305	0.317	50.8	54.5	0.526	0.525	24.6	21.6	0.230	0.210
36	1	24.8	32.1	0.280	0.309	47.5	51.0	0.492	0.472	22.0	24.4	0.232	0.215
	2	34.2	29.2	0.315	0.306	51.3	44.5	0.476	0.483	26.8	21.8	0.240	0.211
	3	32.7	29.6	0.311	0.305	50.8	46.8	0.487	0.489	25.6	22.2	0.238	0.210

D.3 Multialgorithmische Fusion

D.3.1 Fusion auf Merkmalsebene

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung und -richtung</i>														
<i>w</i>	<i>q_c</i>	<i>q_d</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	12	8	62.2	79.3	0.697	0.800	92.3	78.5	0.848	0.933	55.8	61.9	0.587	0.621
		16	70.5	68.7	0.696	0.762	78.0	81.0	0.795	0.889	55.0	55.2	0.551	0.570
		20	65.5	68.3	0.669	0.743	77.0	78.8	0.779	0.865	49.6	53.9	0.516	0.541
	17	8	75.2	61.0	0.673	0.757	79.3	88.8	0.837	0.928	61.3	52.6	0.566	0.591
		16	69.2	65.2	0.671	0.734	79.8	77.5	0.786	0.883	53.6	52.7	0.531	0.544
		20	61.0	65.7	0.633	0.709	73.5	80.5	0.768	0.856	48.1	52.6	0.502	0.522
10	12	8	74.8	60.4	0.668	0.750	78.8	90.0	0.840	0.931	60.6	53.8	0.570	0.592
		16	68.9	63.8	0.663	0.725	81.3	78.3	0.797	0.884	52.4	52.2	0.523	0.541
		20	65.4	61.4	0.633	0.696	74.3	79.3	0.767	0.858	47.7	51.7	0.496	0.517
	17	8	59.5	65.9	0.626	0.707	78.8	86.8	0.826	0.920	40.9	61.2	0.490	0.553
		16	62.2	61.8	0.620	0.685	77.8	75.8	0.767	0.864	48.4	51.1	0.497	0.511
		20	56.8	62.2	0.594	0.666	72.8	79.3	0.759	0.835	48.8	47.4	0.481	0.489
20	12	8	59.8	57.3	0.585	0.614	78.5	80.5	0.795	0.873	46.2	50.9	0.484	0.485
		16	58.2	53.8	0.559	0.581	74.5	72.5	0.735	0.807	47.7	44.4	0.460	0.459
		20	60.7	49.3	0.544	0.556	65.0	74.5	0.694	0.761	42.0	45.3	0.436	0.437
	17	8	55.4	54.4	0.549	0.581	78.3	74.3	0.762	0.852	45.8	44.7	0.452	0.442
		16	45.6	55.3	0.500	0.559	73.0	62.5	0.673	0.763	42.8	43.0	0.429	0.425
		20	60.2	46.4	0.524	0.524	73.8	52.5	0.613	0.724	42.7	40.9	0.418	0.408
35	12	8	49.4	46.6	0.480	0.492	69.3	66.5	0.678	0.759	42.0	39.6	0.407	0.392
		16	44.7	44.8	0.447	0.466	65.0	55.5	0.599	0.663	38.1	36.6	0.373	0.369
		20	30.8	50.8	0.384	0.448	57.5	64.3	0.607	0.618	39.1	33.3	0.360	0.345
	17	8	45.0	45.5	0.452	0.469	66.5	64.5	0.655	0.716	37.0	35.9	0.364	0.353
		16	36.1	47.2	0.409	0.451	58.3	61.8	0.599	0.624	31.6	36.9	0.340	0.332
		20	47.8	41.4	0.443	0.427	56.3	56.8	0.565	0.573	41.8	28.7	0.340	0.315

D.3.2 Fusion auf Vergleichsebene

		<i>ioPen</i>					<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>			
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung und -richtung</i>														
<i>w</i>	<i>q_c</i>	<i>q_d</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>
7	17	Δ	65.6	61.5	0.635	0.690	85.5	81.8	0.836	0.924	47.7	43.1	0.453	0.464
		∇	64.1	70.4	0.671	0.746	80.3	70.8	0.752	0.868	46.6	49.9	0.482	0.509
		∅	77.8	71.4	0.745	0.810	81.8	88.3	0.849	0.934	56.3	49.9	0.529	0.565
	17	Δ	56.4	60.1	0.582	0.646	79.0	79.8	0.794	0.882	42.3	41.9	0.421	0.416
		∇	67.2	69.6	0.684	0.755	74.3	79.8	0.769	0.874	50.0	48.8	0.494	0.521
		∅	71.5	73.8	0.726	0.796	83.0	83.0	0.830	0.911	49.6	51.6	0.505	0.544

		<i>ioPen</i>				<i>DigiMemo</i>				<i>Notes Taker</i>					
<i>Merkmale auf Basis der lokalen Schriftkrümmung und -richtung</i>															
<i>w</i>	<i>q_c</i>	<i>q_d</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>AUC</i>	
10	17	12	Δ	67.0	67.9	0.675	0.727	85.8	85.5	0.856	0.931	51.2	47.1	0.491	0.507
			▽	68.3	62.7	0.654	0.709	75.3	74.5	0.749	0.847	48.1	42.4	0.451	0.467
			∅	77.7	70.5	0.739	0.801	85.3	85.8	0.855	0.936	54.4	50.9	0.526	0.560
	17	14	Δ	66.6	59.8	0.630	0.689	79.5	84.0	0.817	0.896	45.7	46.0	0.458	0.457
			▽	60.2	68.9	0.642	0.714	78.0	72.3	0.750	0.850	43.4	48.1	0.457	0.480
			∅	70.2	72.8	0.715	0.791	86.8	79.8	0.831	0.914	47.8	53.8	0.506	0.539
20	17	12	Δ	60.4	65.8	0.630	0.687	80.8	83.3	0.820	0.898	58.0	52.1	0.549	0.575
			▽	53.9	55.8	0.549	0.592	67.8	68.8	0.682	0.786	37.7	37.7	0.377	0.376
			∅	67.6	63.8	0.656	0.717	78.0	83.0	0.804	0.893	49.4	52.3	0.508	0.531
	17	14	Δ	63.6	60.5	0.620	0.651	77.3	81.3	0.792	0.867	50.8	50.0	0.504	0.521
			▽	55.5	54.4	0.550	0.588	70.0	67.8	0.689	0.788	39.9	37.7	0.387	0.387
			∅	56.6	66.1	0.610	0.694	80.5	76.8	0.786	0.870	50.2	47.3	0.487	0.508
35	17	12	Δ	55.2	51.4	0.532	0.552	74.3	74.5	0.744	0.822	45.4	50.7	0.479	0.497
			▽	38.2	48.7	0.428	0.471	62.0	66.3	0.641	0.716	33.1	34.3	0.337	0.330
			∅	53.2	53.7	0.535	0.571	71.8	76.8	0.742	0.813	44.6	47.0	0.457	0.466
	17	14	Δ	51.4	50.1	0.507	0.522	69.3	68.3	0.687	0.759	48.7	43.2	0.458	0.460
			▽	40.8	48.7	0.444	0.471	63.8	64.3	0.640	0.721	35.7	33.9	0.348	0.339
			∅	57.5	51.2	0.541	0.555	71.8	65.0	0.682	0.778	45.8	42.2	0.439	0.447

D.3.3 Fusion auf Entscheidungsebene

		<i>ioPen</i>			<i>DigiMemo</i>			<i>Notes Taker</i>			
<i>Fusion auf Entscheidungsebene: <u>Quadrat-</u> und <u>Dreiecksgittermerkmale</u></i>											
<i>w_{g\square}</i>	<i>w_{gΔ}</i>		<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F₁</i>
7	7	∪ ²	86.0	88.2	0.871	95.3	90.5	0.928	76.1	75.6	0.758
		∩	83.8	87.2	0.855	96.3	88.5	0.922	75.1	73.6	0.743
10	10	∪	86.9	83.8	0.853	93.0	94.0	0.935	77.2	72.4	0.748
		∩	85.3	81.2	0.832	93.3	91.3	0.922	75.2	72.0	0.736
12	12	∪	89.8	80.0	0.846	93.8	93.5	0.936	78.3	72.0	0.750
		∩	88.5	76.5	0.821	95.0	89.3	0.920	76.1	70.8	0.733
20	20	∪	79.6	78.8	0.792	88.8	91.8	0.902	68.6	72.3	0.704
		∩	78.8	72.4	0.754	91.3	86.0	0.885	69.4	69.0	0.692
35	35	∪	73.2	51.9	0.608	74.3	87.3	0.802	62.7	61.9	0.623
		∩	58.2	53.4	0.557	74.0	77.8	0.758	63.3	56.7	0.598

²Die Symbole ∪ und ∩ stehen für die Fusion mittels Mengenvereinigung und -schnitt.

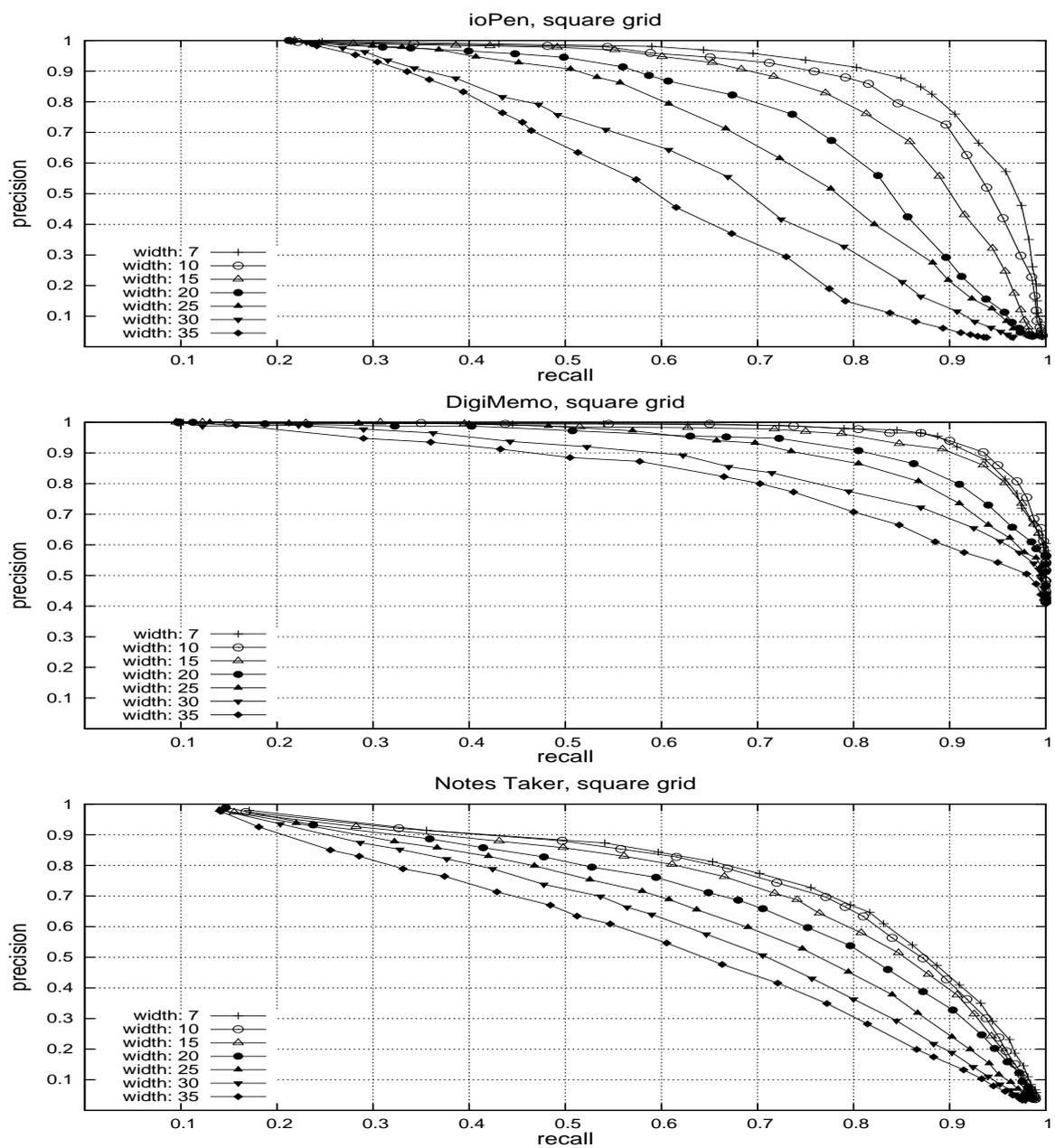
D Resultate – tabellarisch

				<i>ioPen</i>			<i>DigiMemo</i>			<i>Notes Taker</i>		
<i>Fusion auf Entscheidungsebene: Quadratgitter- und richtungsbasierte Merkmale</i>												
$w_{g_{\square}}$	w	q		P	R	F_1	P	R	F_1	P	R	F_1
7	7	12	U	87.0	88.3	0.876	97.0	89.3	0.930	77.0	75.6	0.763
			∩	90.9	80.6	0.855	95.5	88.8	0.920	74.7	73.7	0.742
10	10	12	U	86.7	88.5	0.876	97.3	89.3	0.931	76.7	75.6	0.761
			∩	90.9	80.6	0.855	95.5	88.8	0.920	74.9	73.6	0.742
10	10	14	U	86.6	88.4	0.875	96.5	89.3	0.927	76.4	75.7	0.761
			∩	85.8	84.9	0.854	95.8	87.5	0.914	73.3	74.1	0.737
10	10	12	U	89.2	82.5	0.857	93.8	94.0	0.939	78.1	72.2	0.751
			∩	85.5	81.4	0.834	90.8	93.5	0.921	74.6	72.2	0.734
<i>Fusion auf Entscheidungsebene: Quadratgitter- und krümmungsbasierte Merkmale</i>												
$w_{g_{\square}}$	w	q		P	P	F_1	P	R	F_1	P	R	F_1
7	10	10	U	82.5	88.2	0.852	96.0	88.8	0.922	65.7	75.8	0.704
			∩	85.8	80.4	0.830	90.5	88.3	0.894	64.2	75.7	0.695
7	10	12	U	83.4	88.2	0.857	96.0	88.8	0.922	68.2	75.7	0.718
			∩	85.4	80.5	0.829	90.8	88.0	0.895	64.0	75.4	0.693
7	10	14	U	83.8	88.2	0.859	96.0	88.8	0.922	70.6	75.6	0.730
			∩	85.5	80.5	0.829	89.3	88.8	0.890	64.0	75.2	0.692
<i>Fusion auf Entscheidungsebene: Quadratgitter- und schriftnigungsbasierte Merkmale</i>												
$w_{g_{\square}}$		q		P	P	F_1	P	R	F_1	P	R	F_1
7	7	6	U	84.8	88.2	0.864	96.0	89.8	0.928	69.2	75.7	0.723
			∩	85.4	79.6	0.824	90.3	88.0	0.891	67.2	73.8	0.703
7	7	8	U	84.7	88.8	0.867	96.0	88.8	0.922	73.8	75.6	0.747
			∩	84.6	79.7	0.821	91.0	88.3	0.896	67.6	73.1	0.702
7	7	17	U	84.8	88.2	0.864	96.0	88.8	0.922	74.7	75.6	0.751
			∩	84.5	79.4	0.819	90.8	85.3	0.879	67.0	72.1	0.695

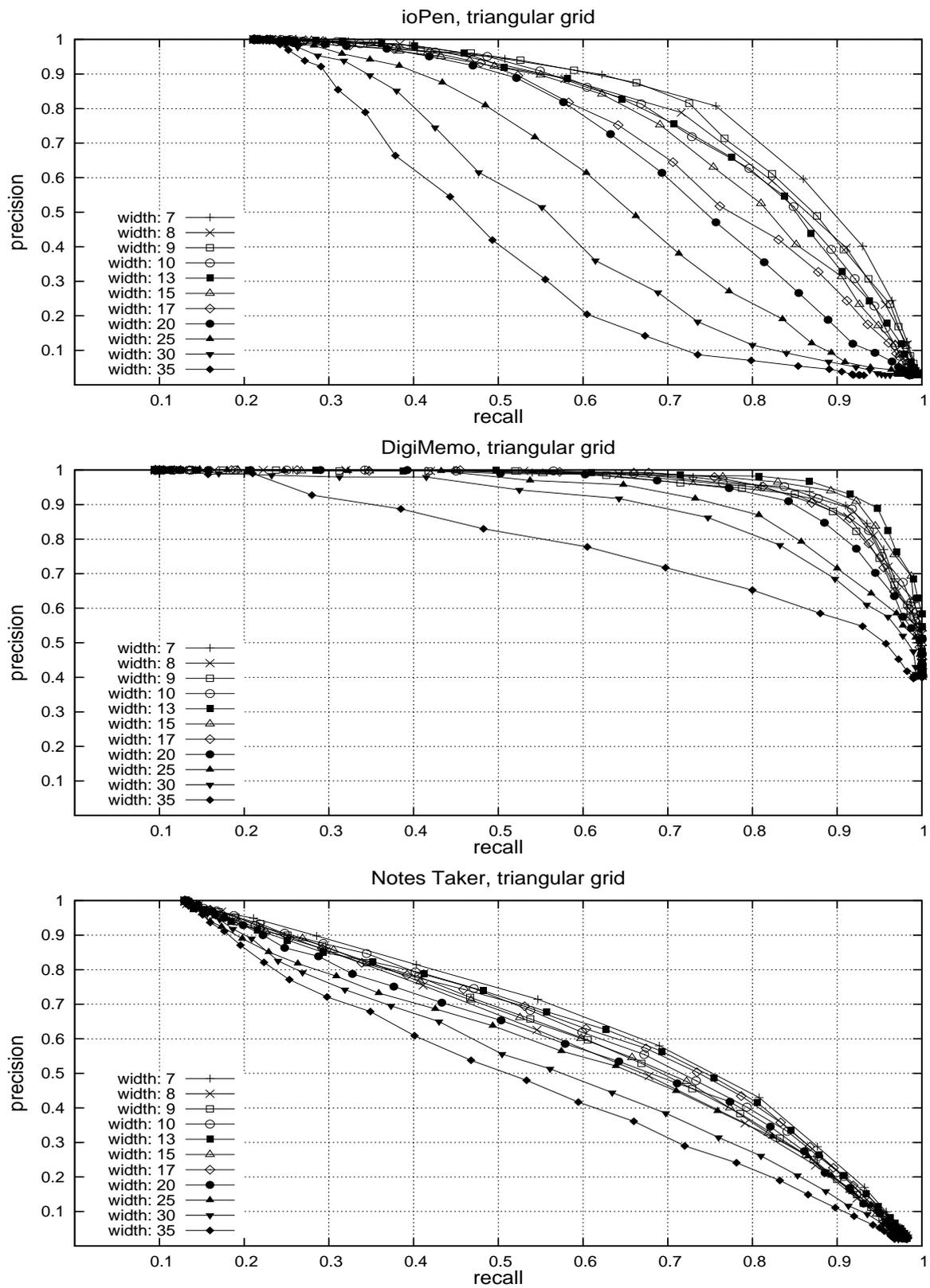
E Resultate – grafisch

E.1 Ohne Fusion

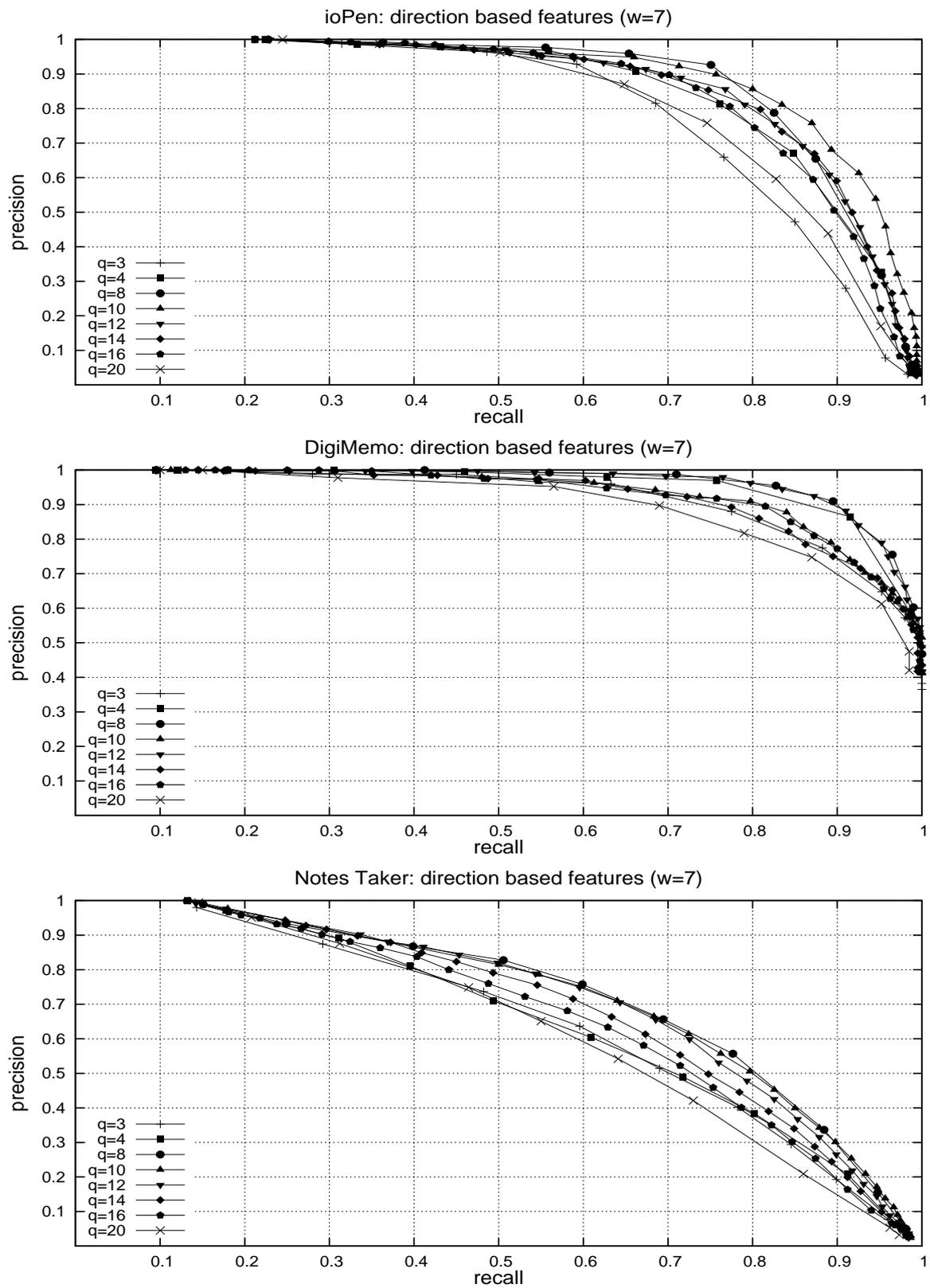
Quadratische Gitter

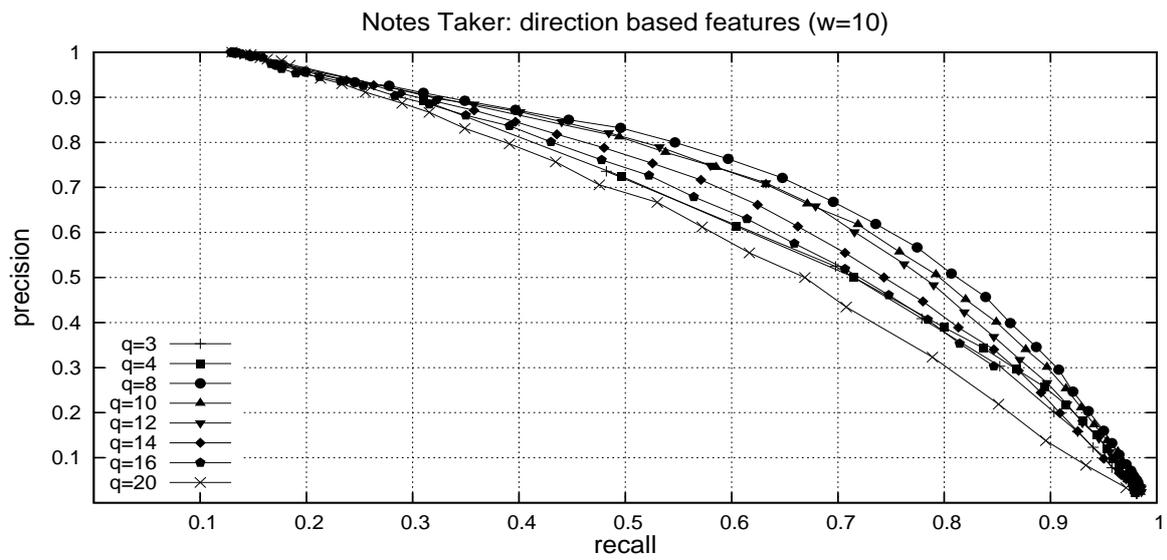
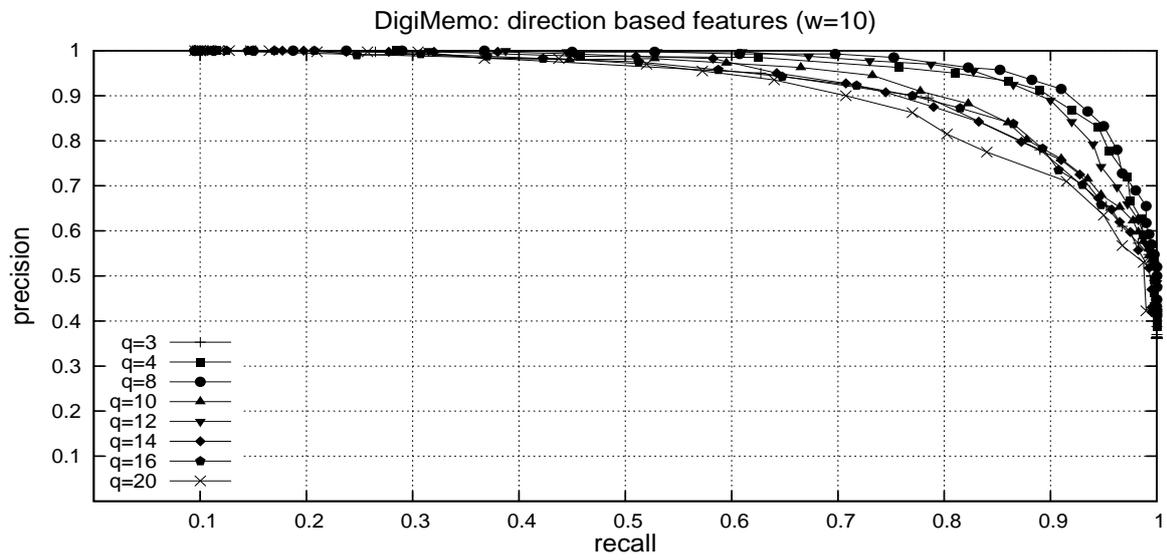
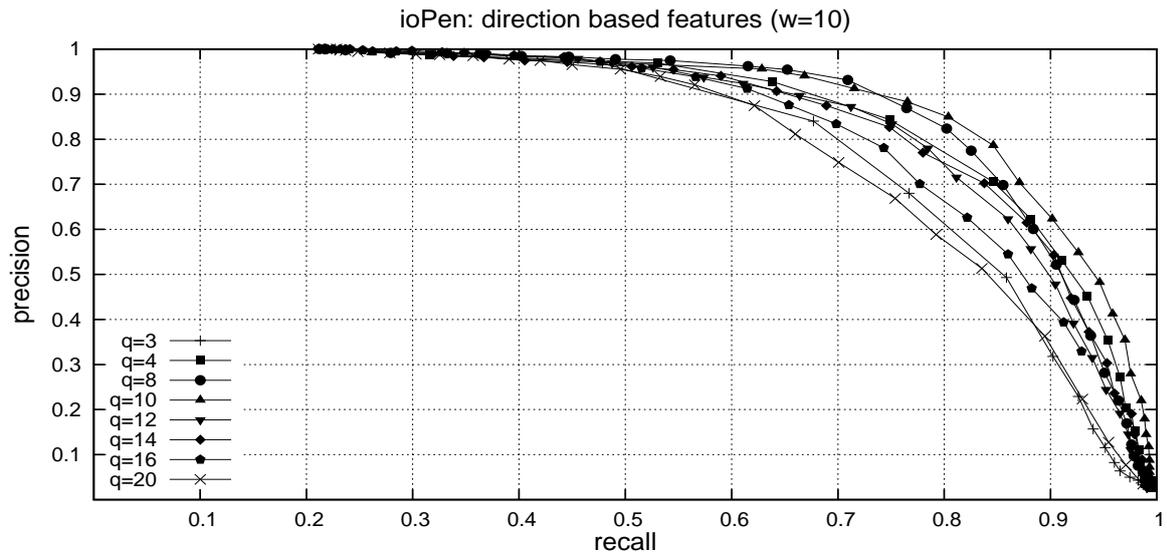


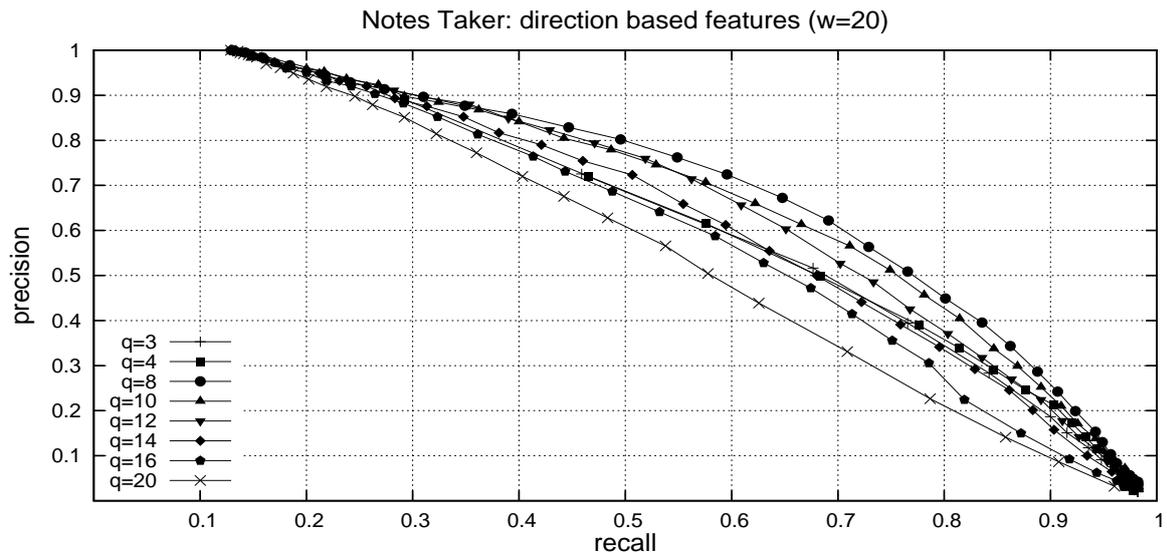
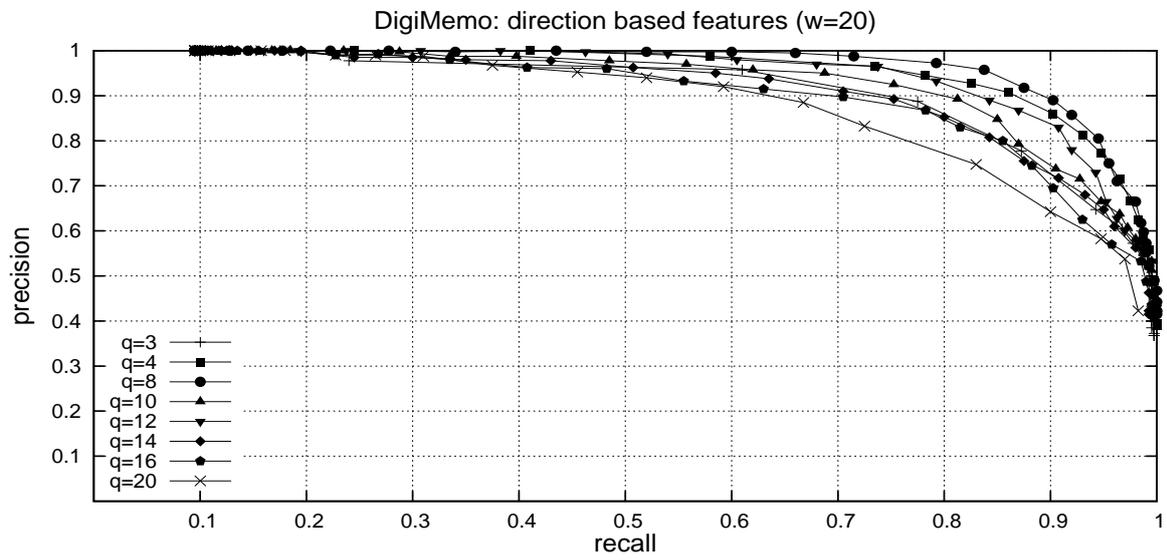
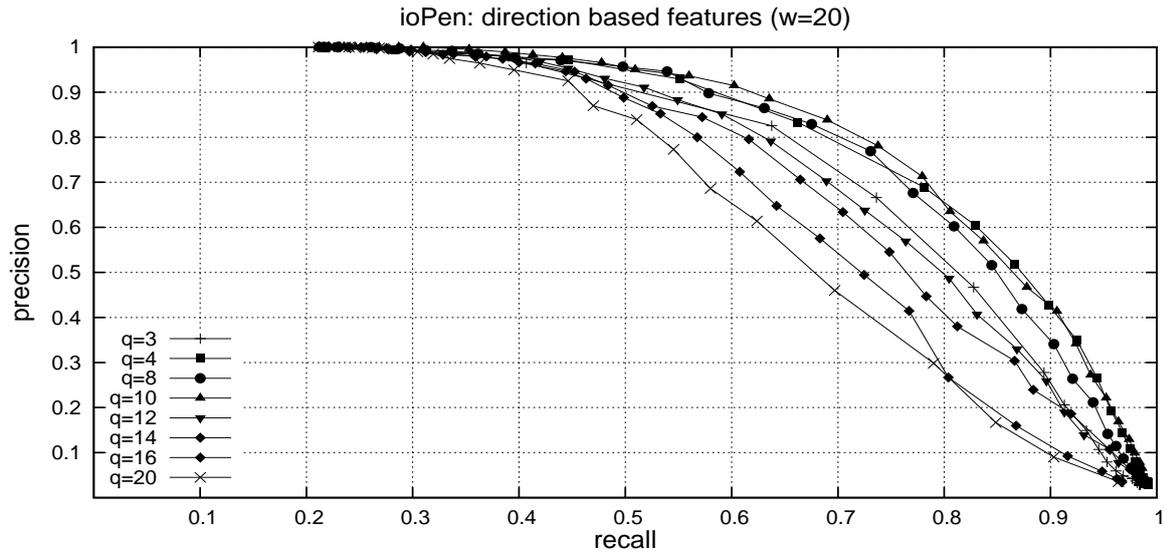
Dreiecksgitter

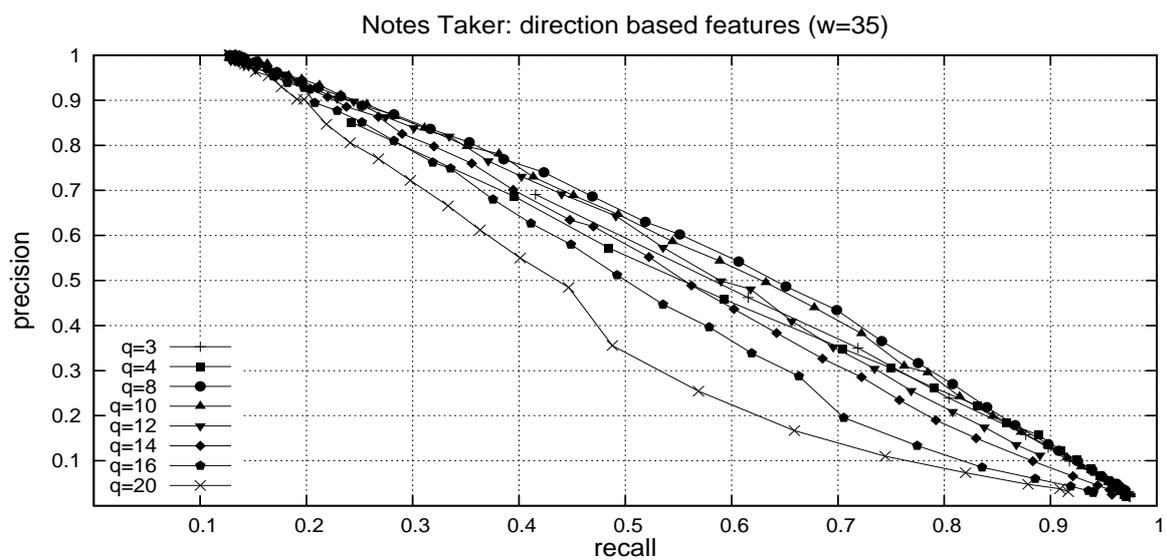
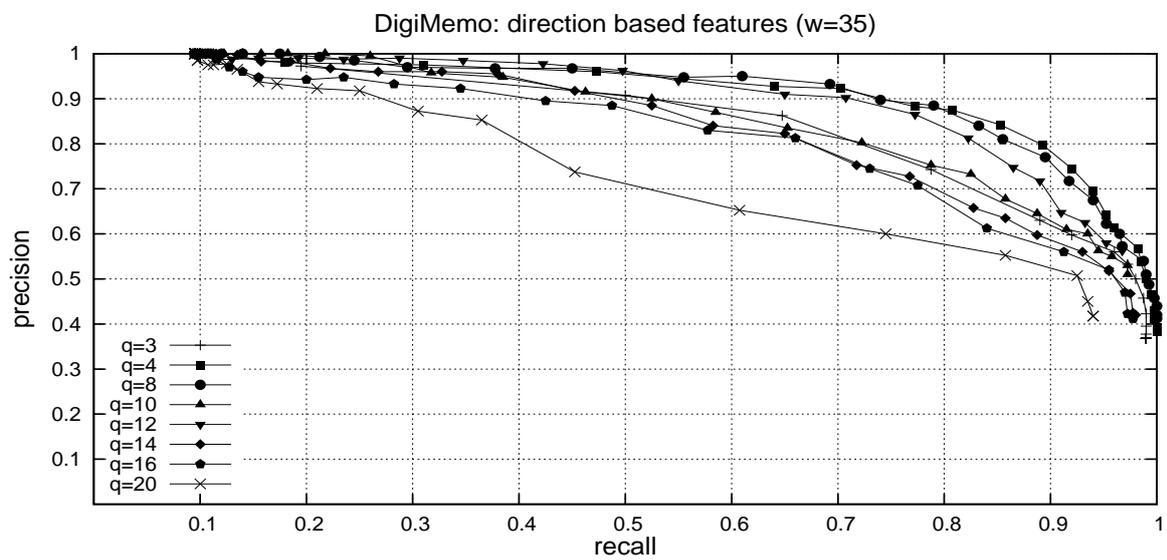
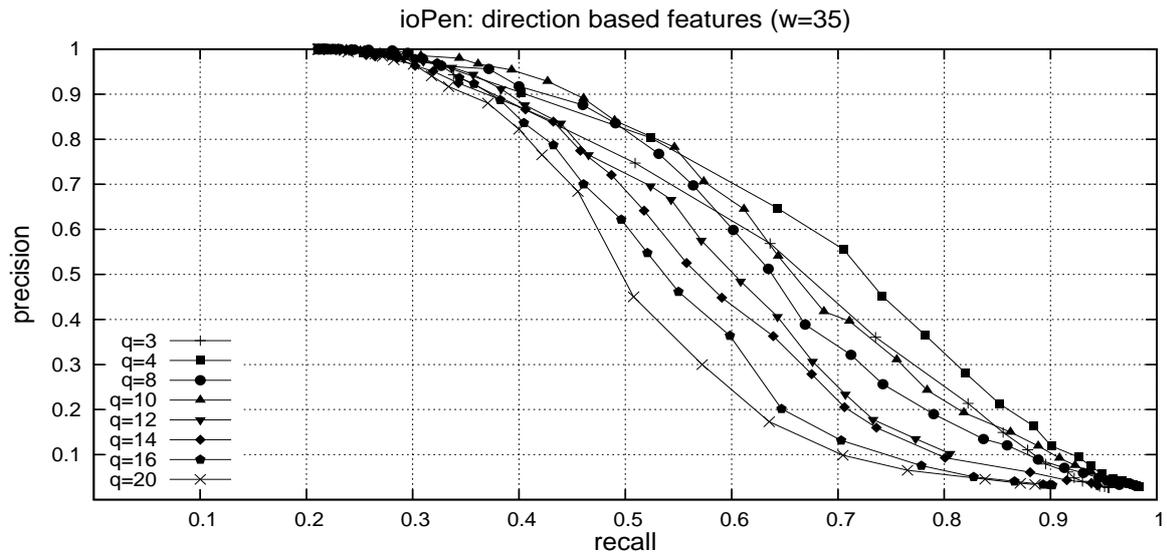


Lokale Schriftrichtung

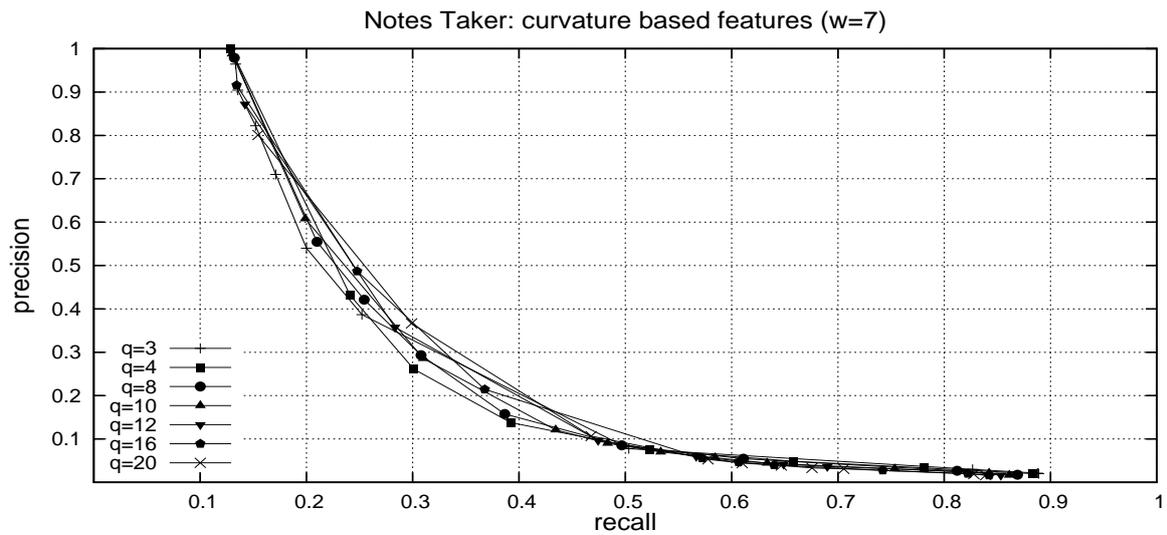
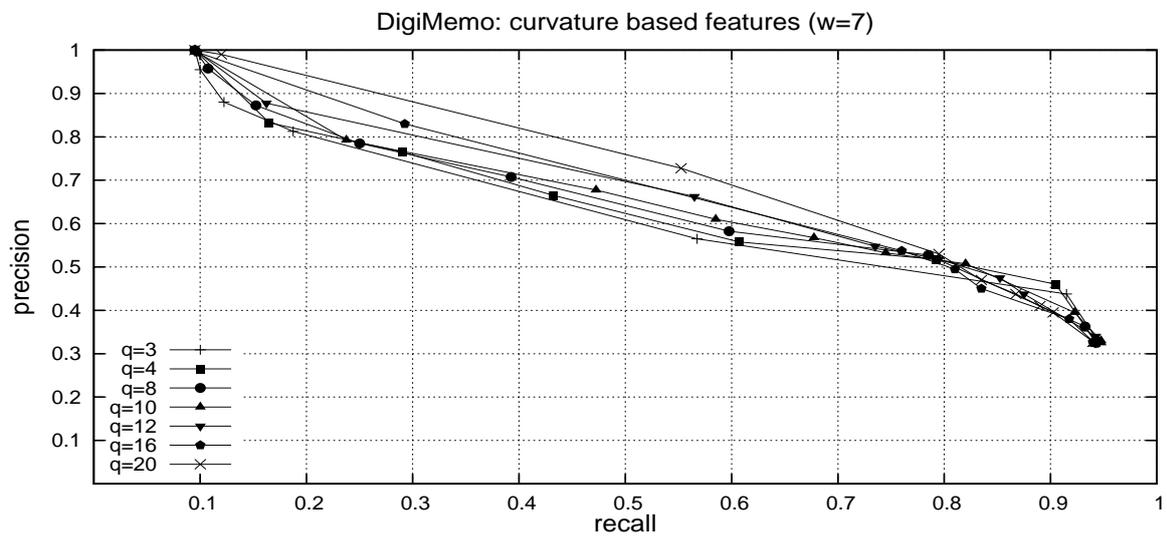
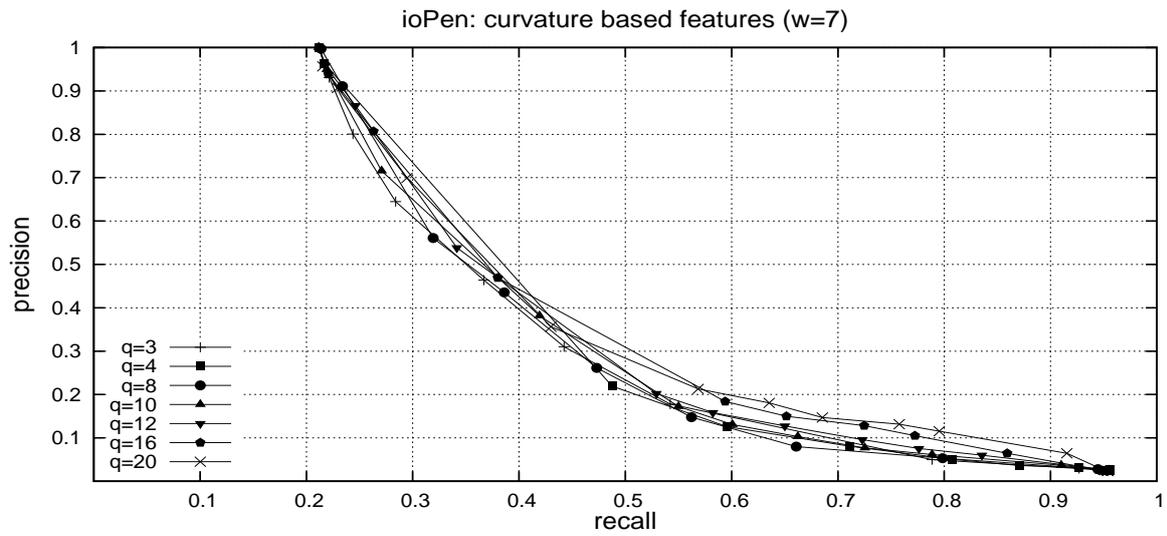


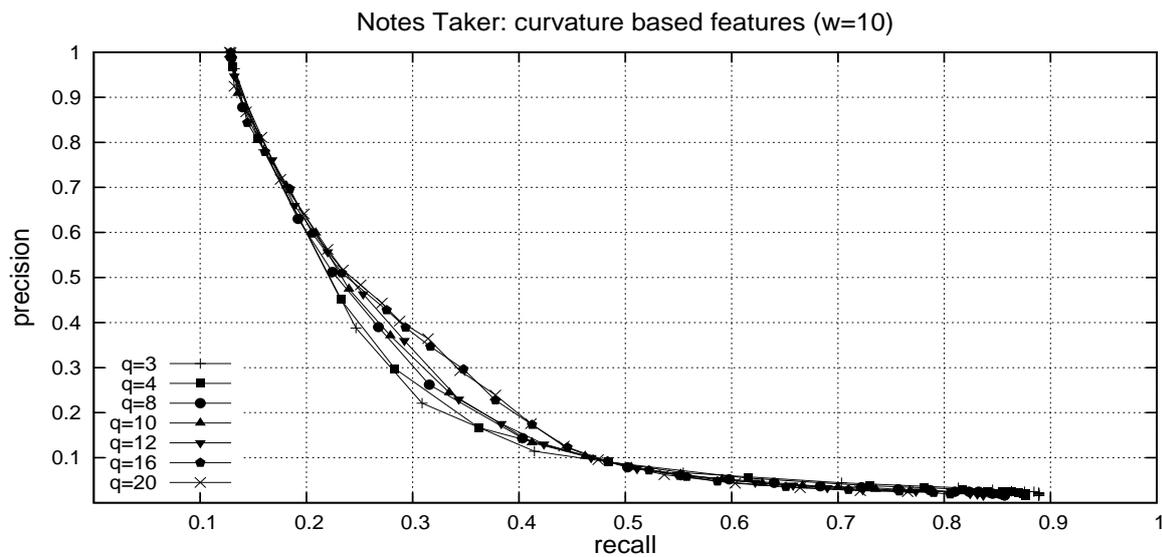
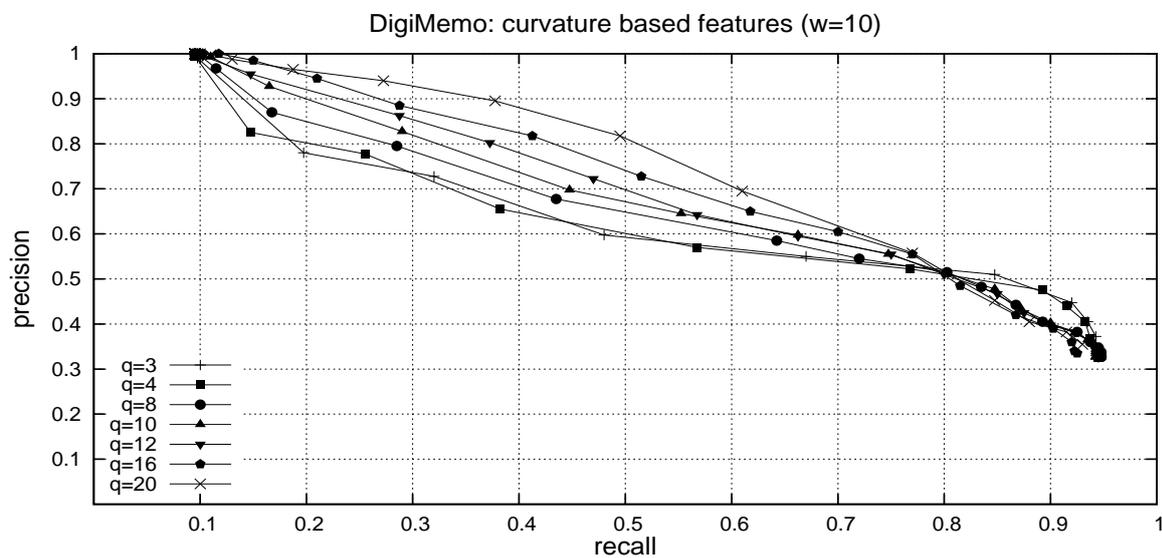
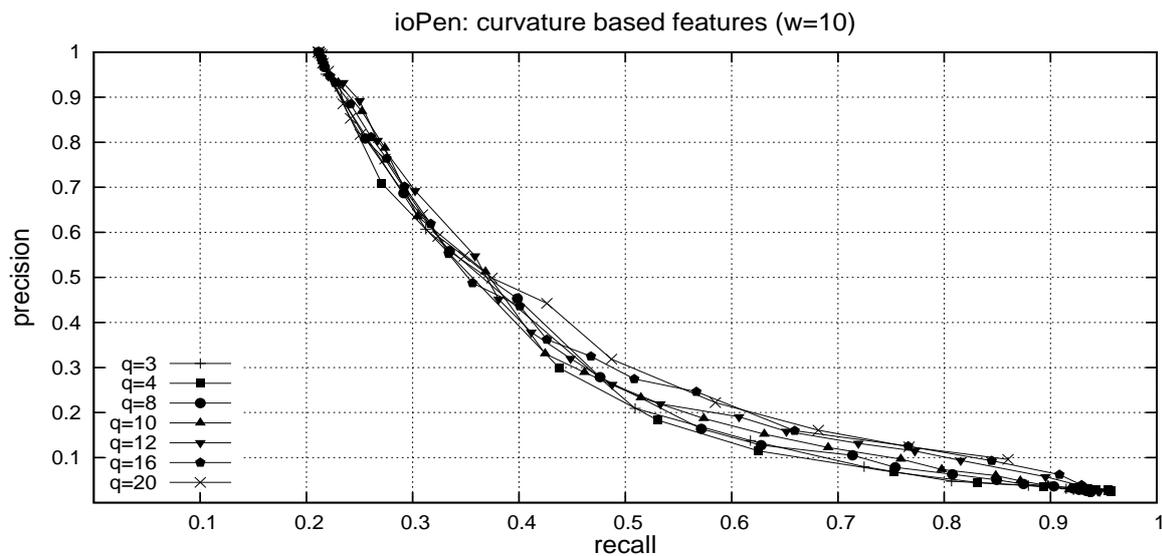


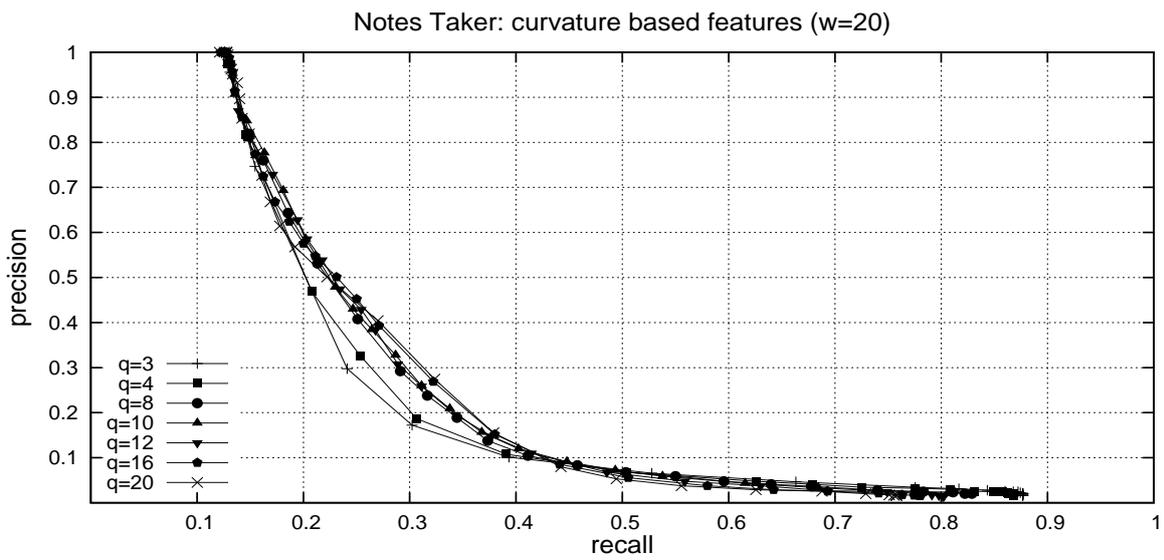
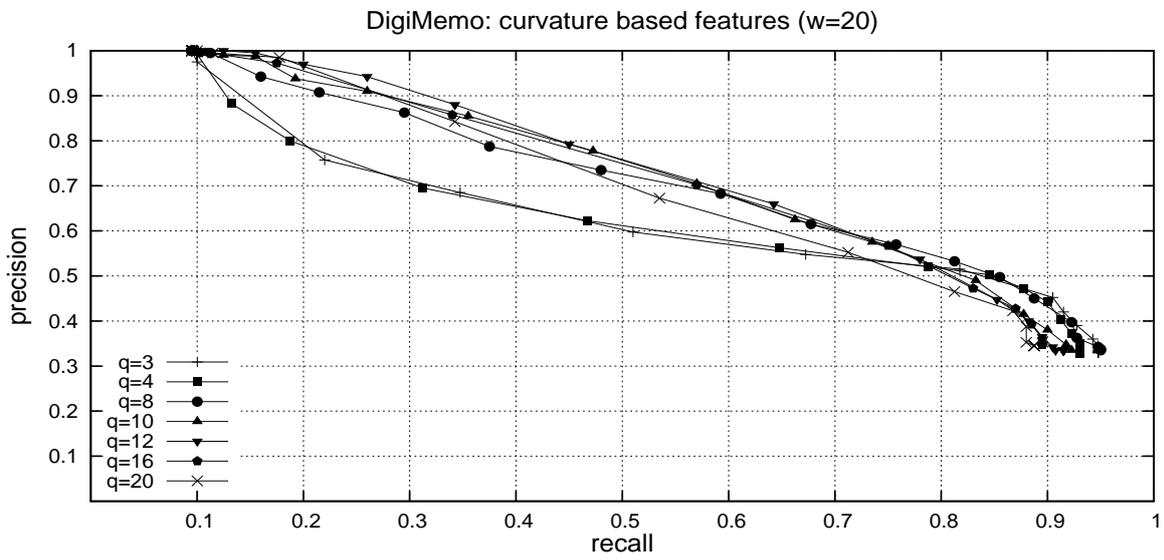
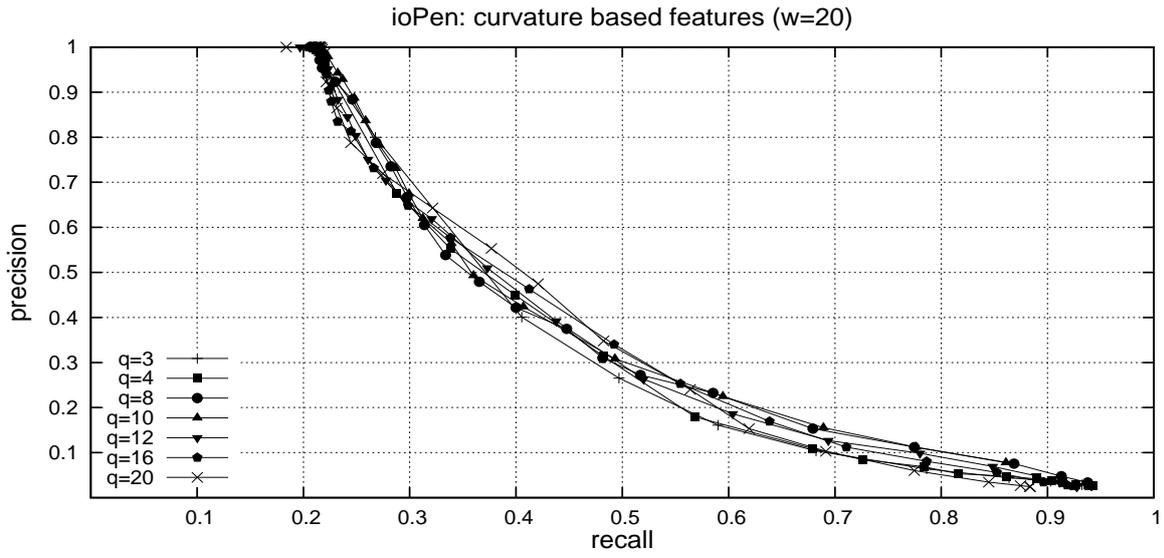


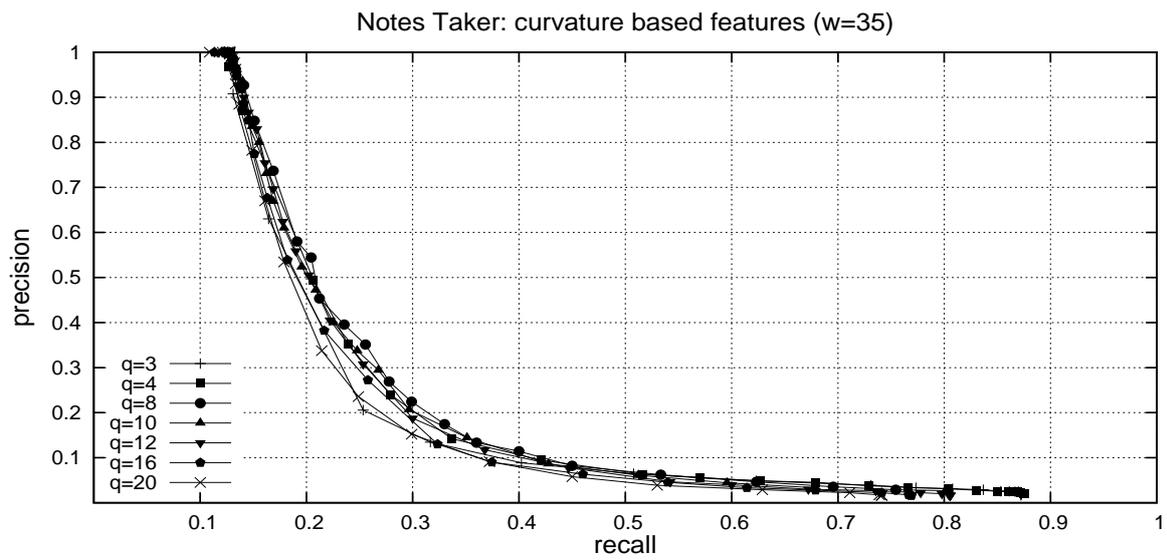
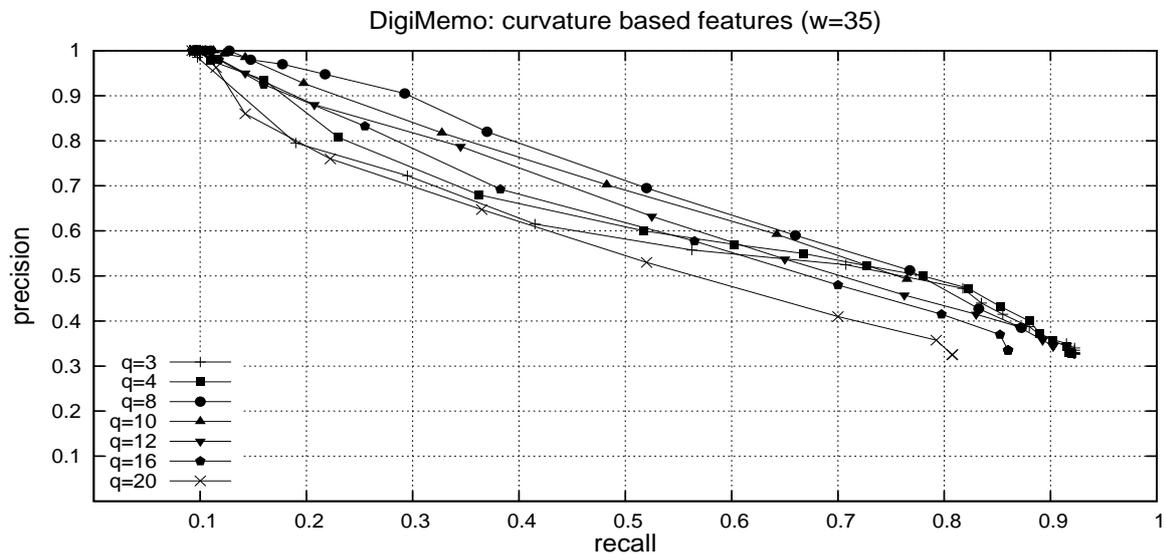
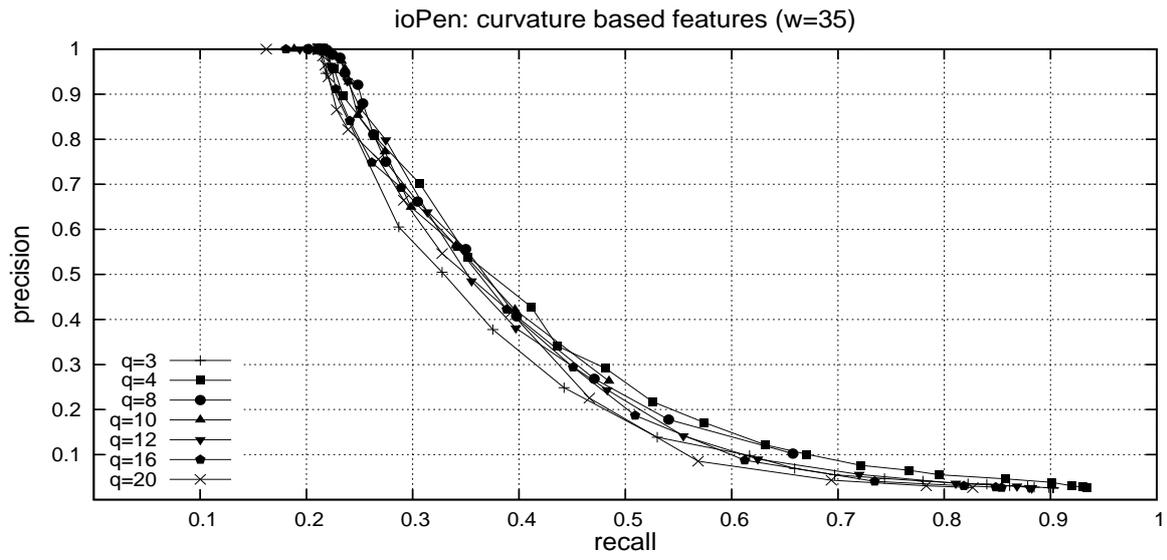


Lokale Schriftkrümmung

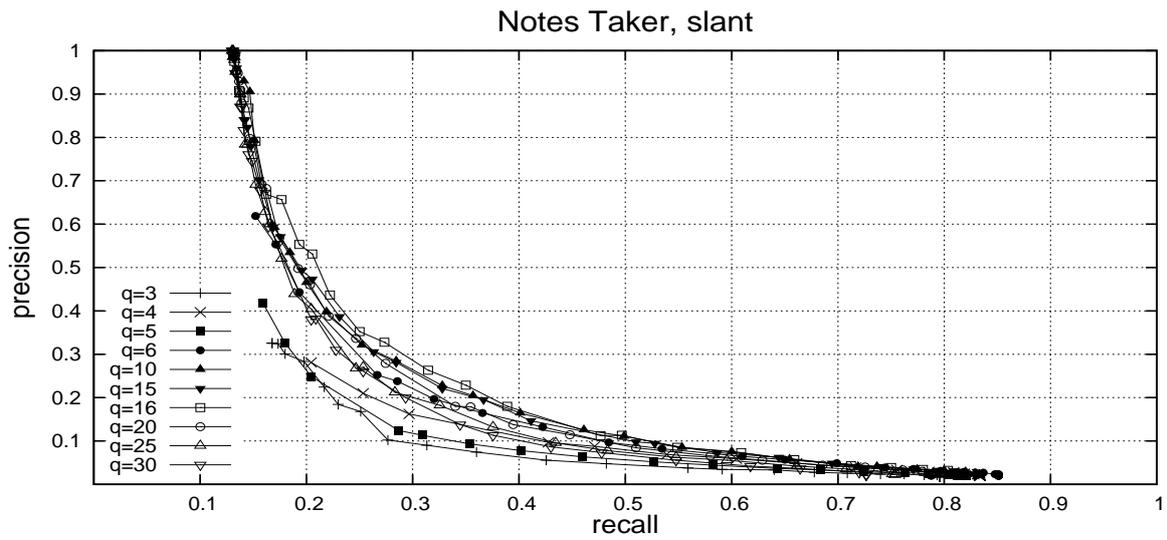
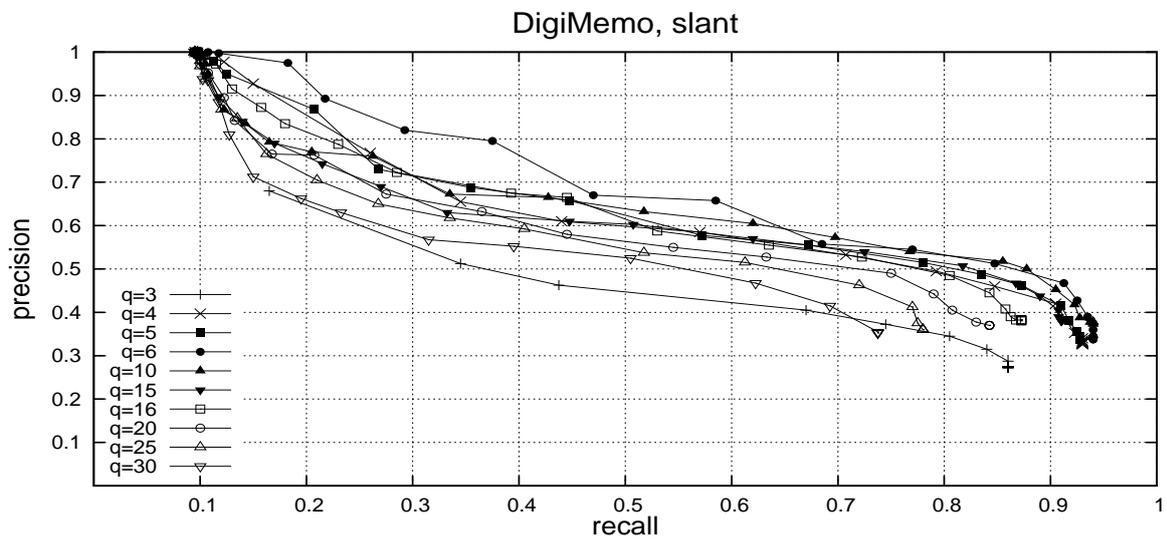
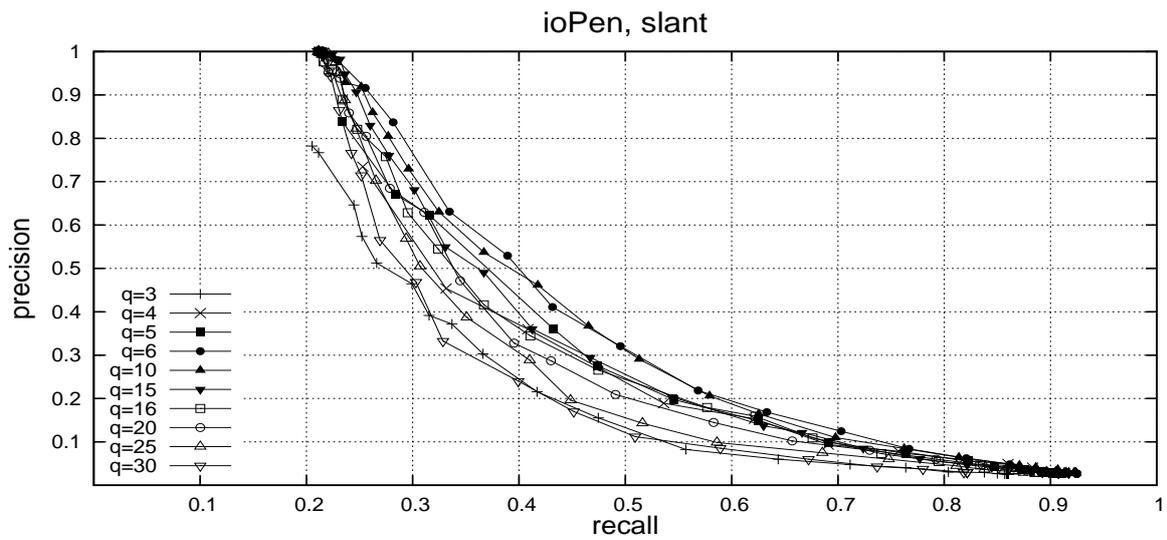








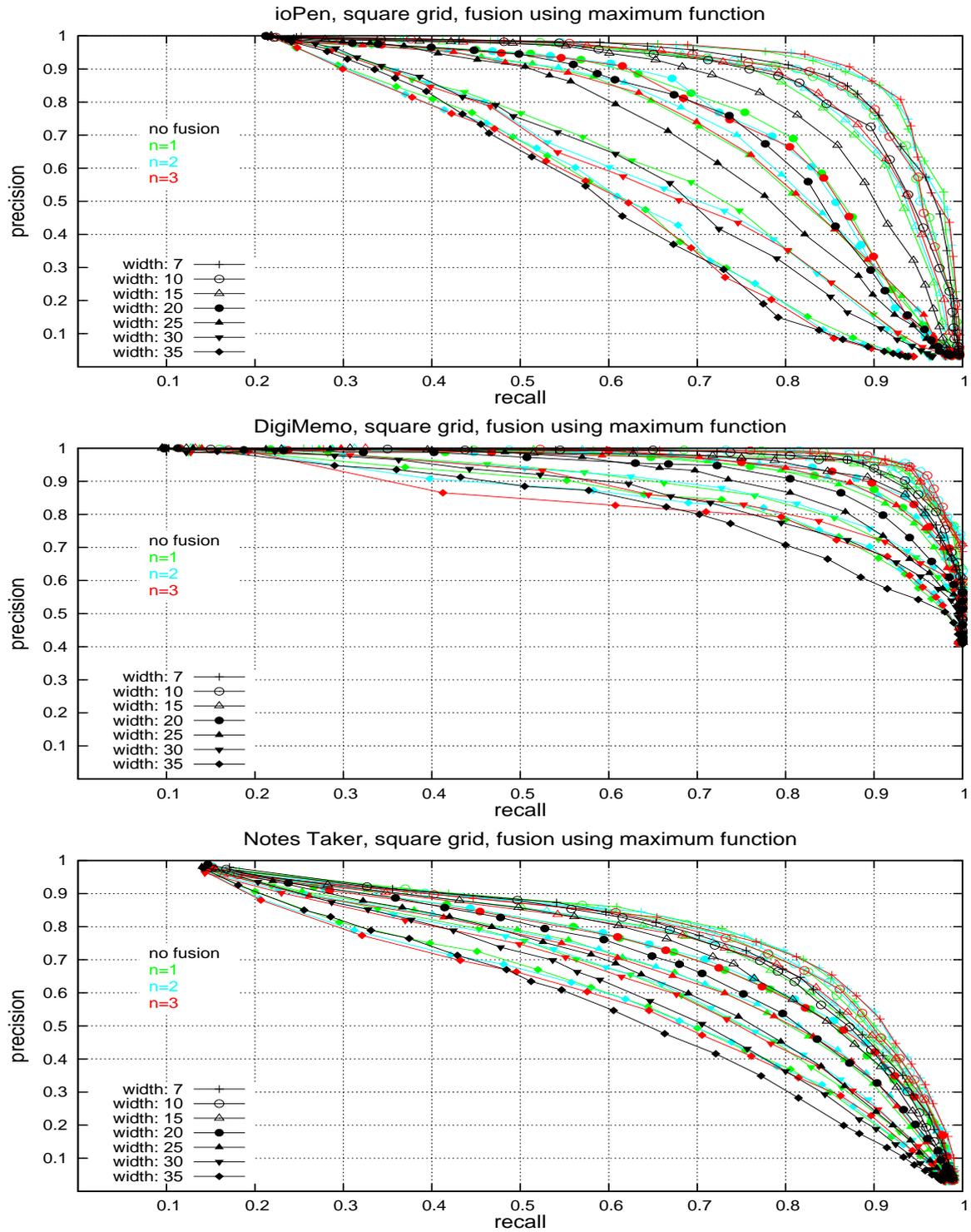
Lokale Schriftneigung

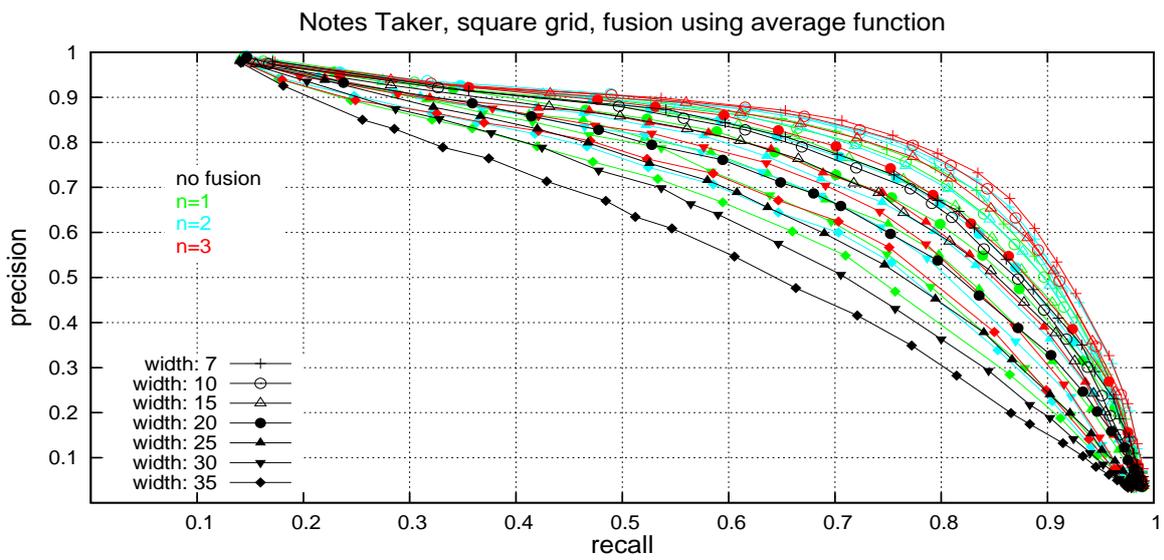
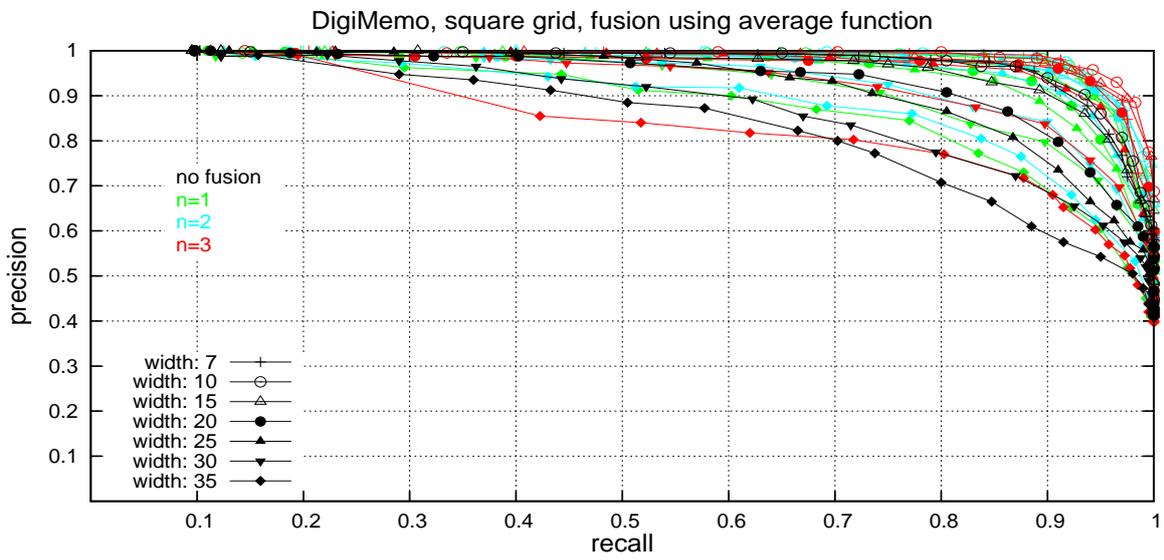
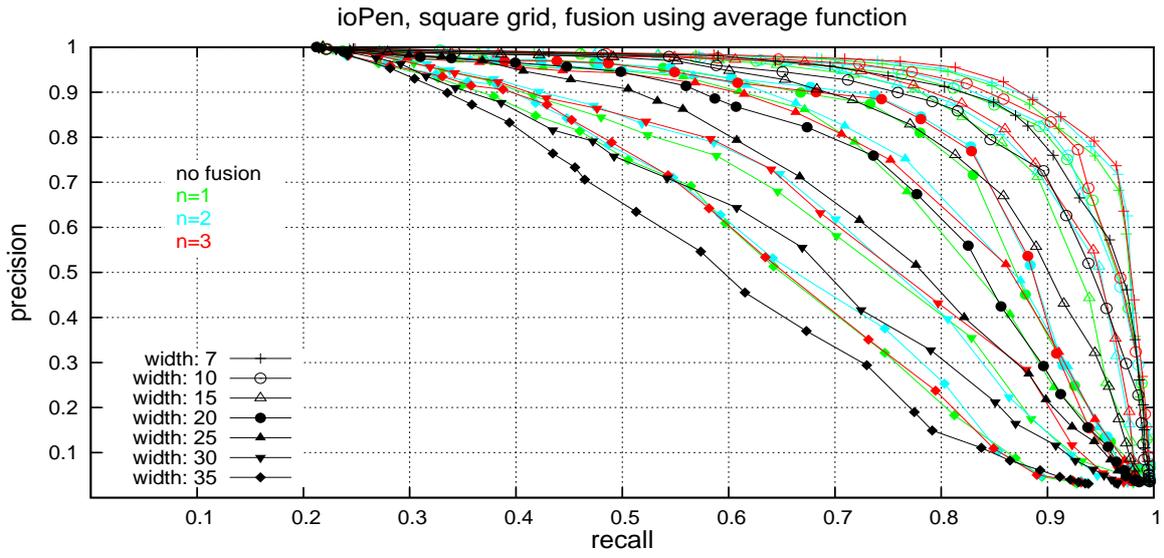


E.2 Multi-Sample-Fusion

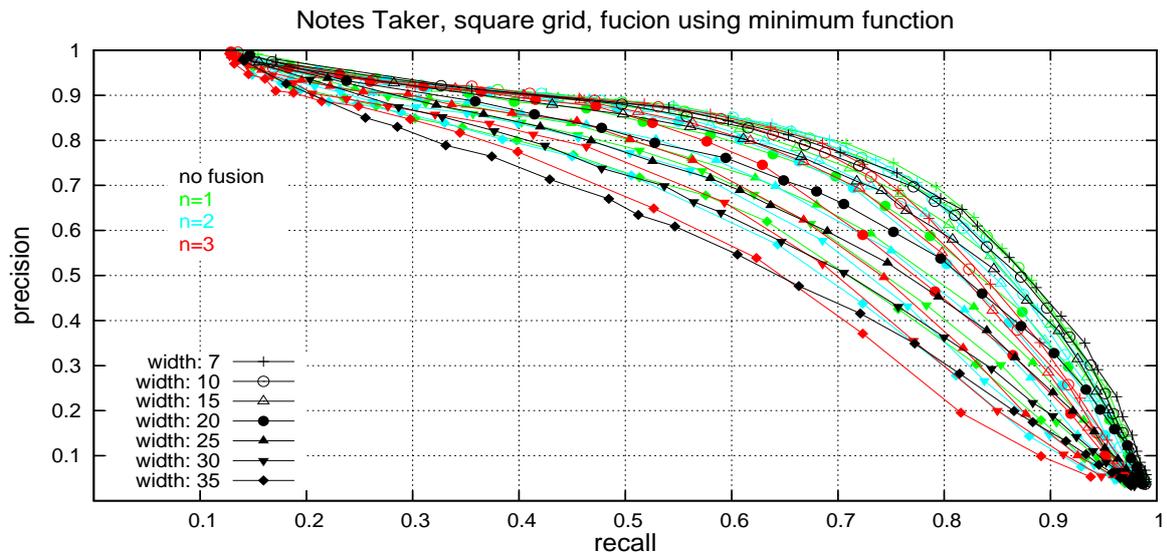
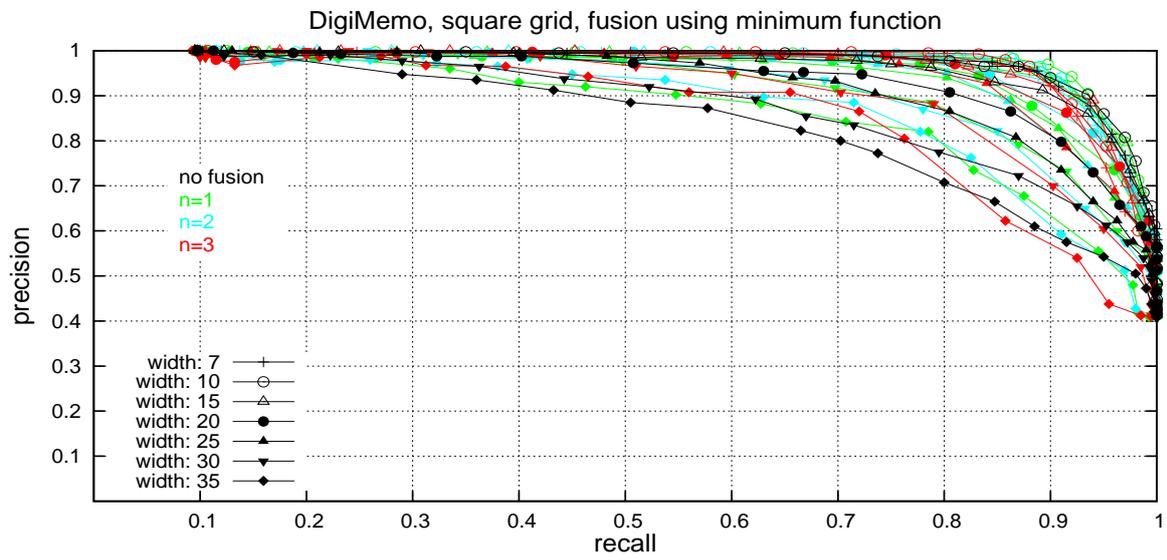
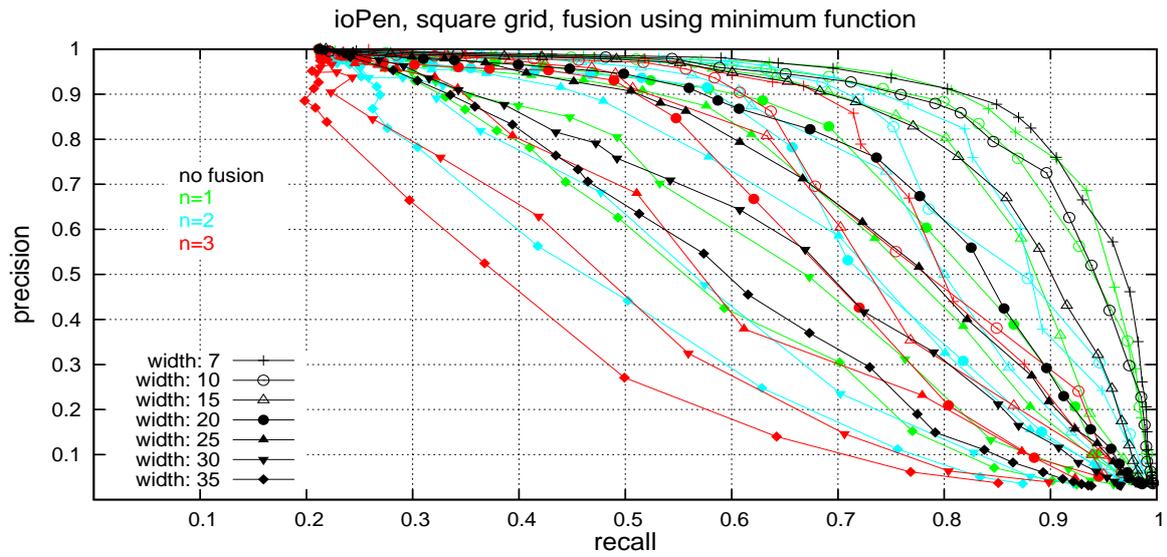
E.2.1 Fusion auf Vergleichsebene

Quadratische Gitter

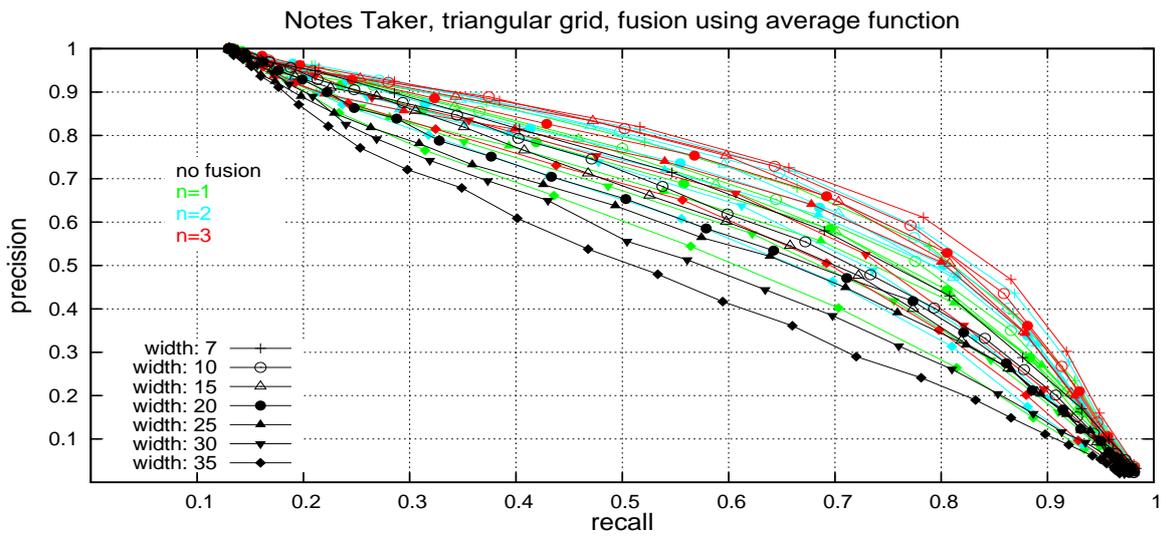
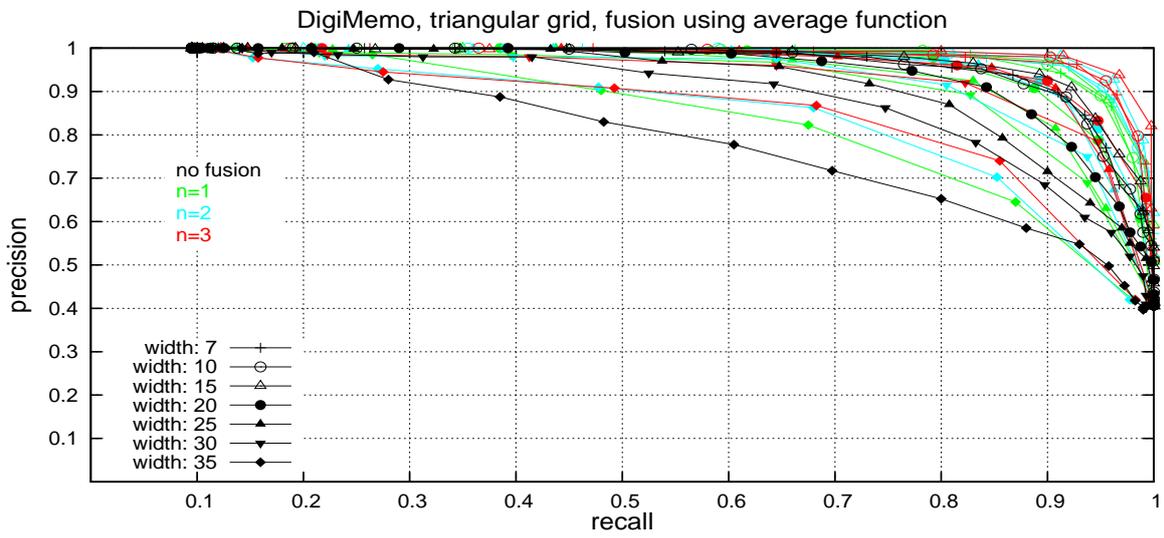
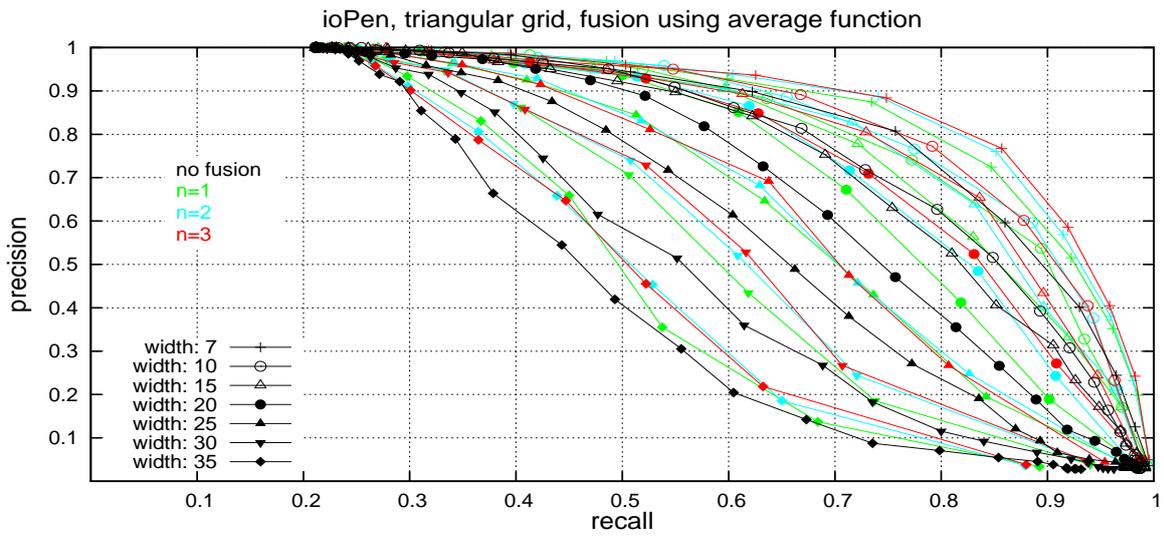




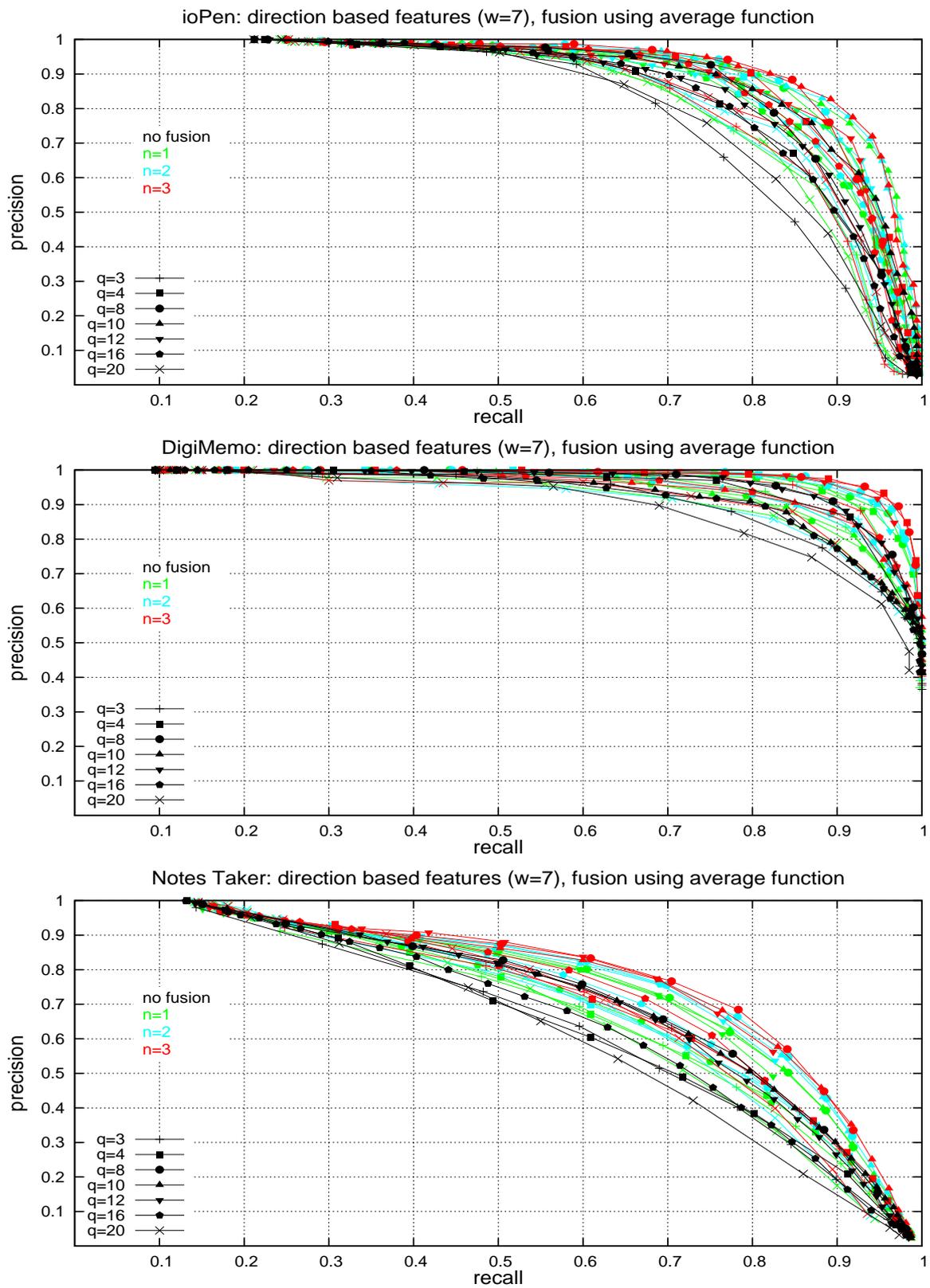
E Resultate – grafisch

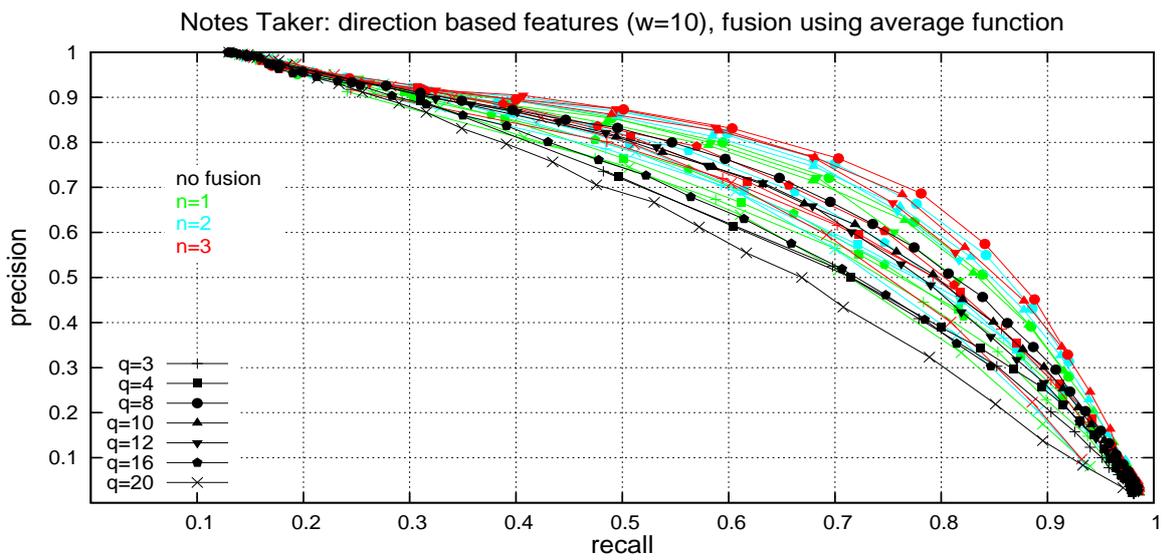
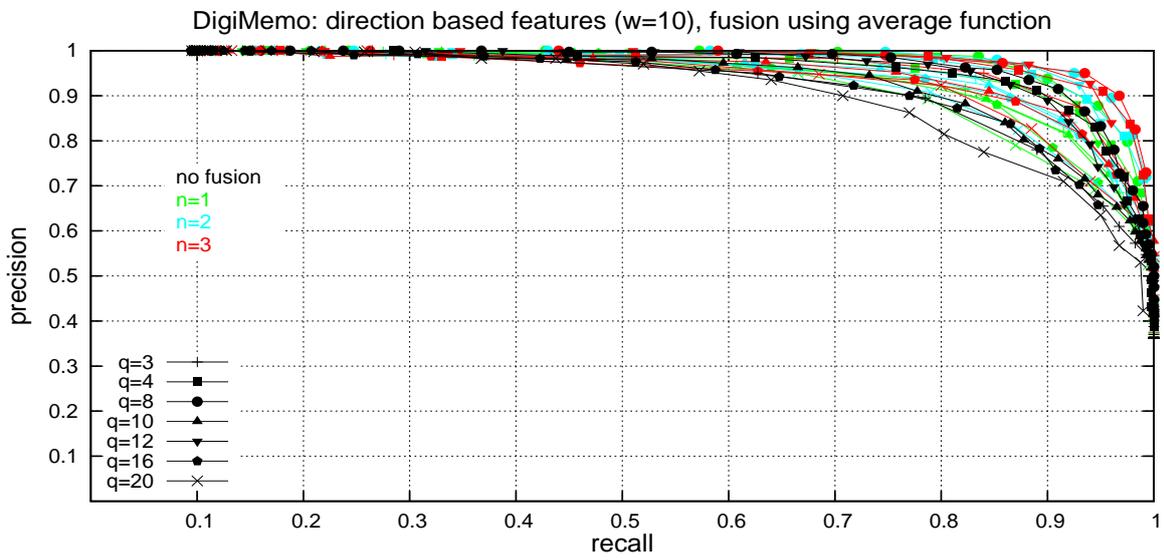
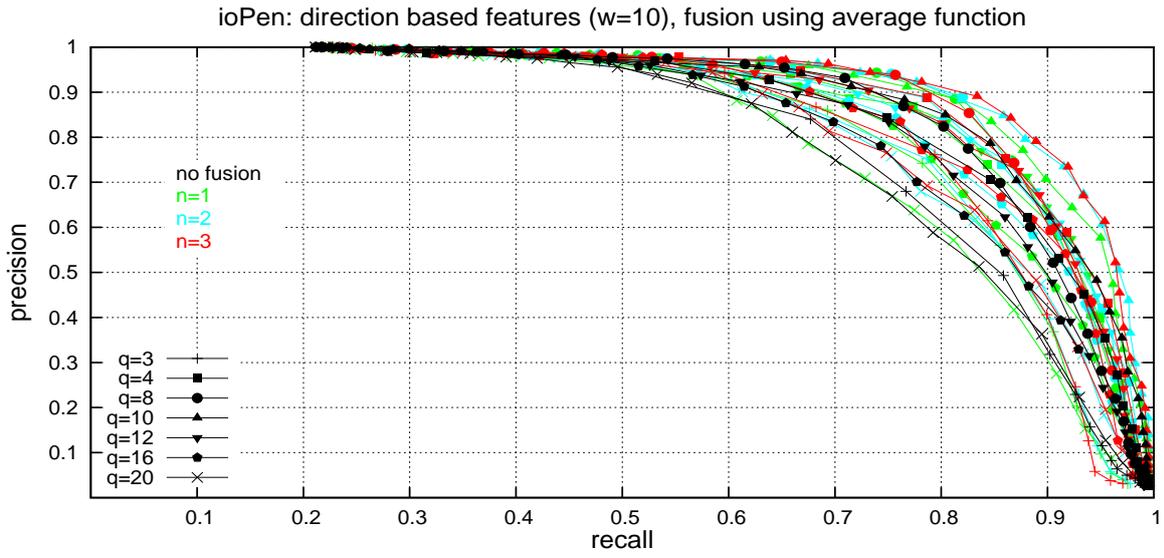


Dreiecksgitter

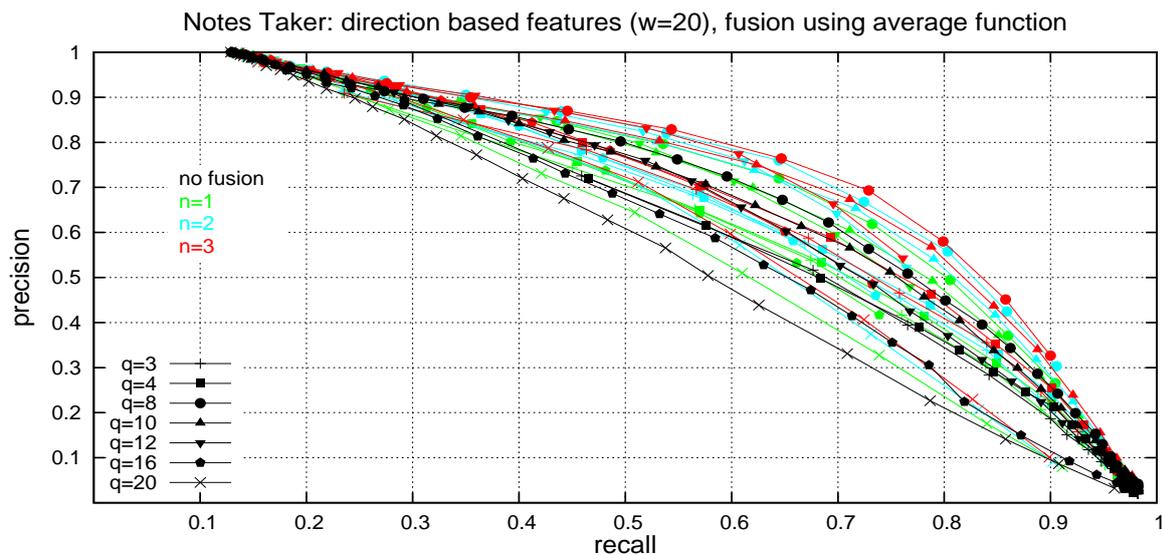
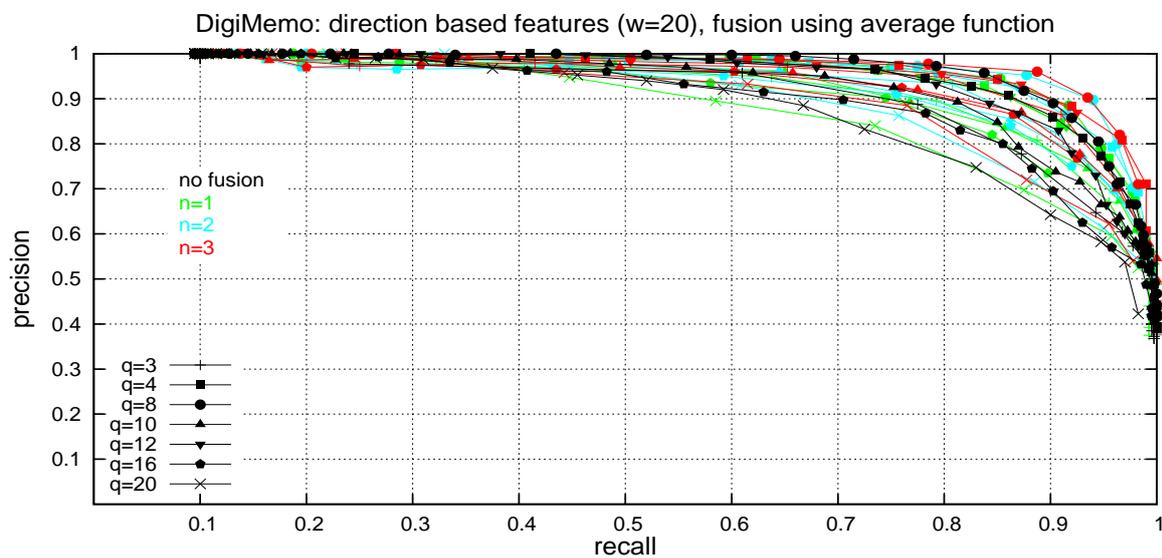
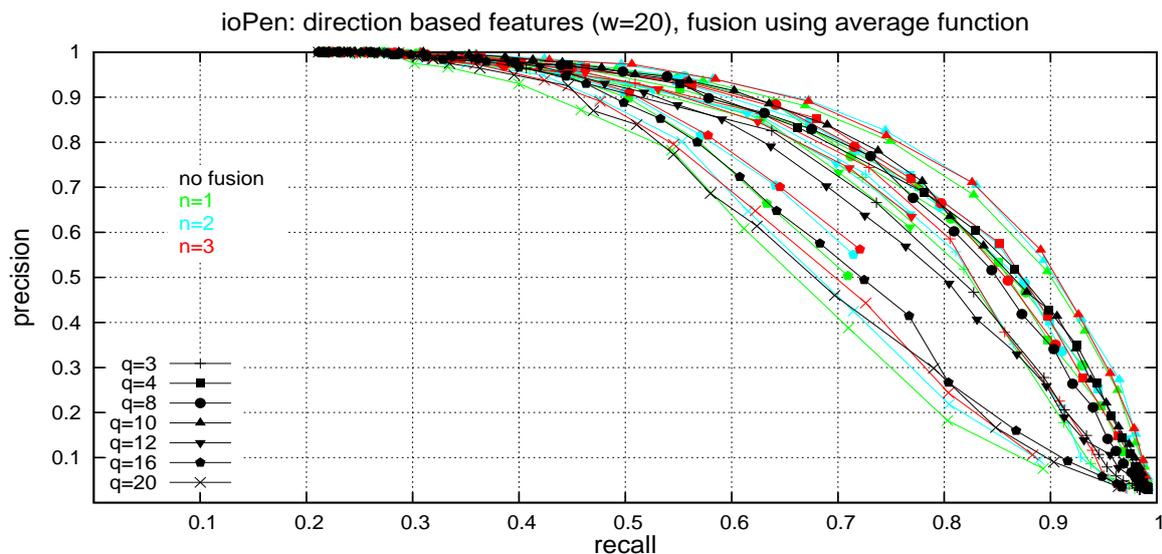


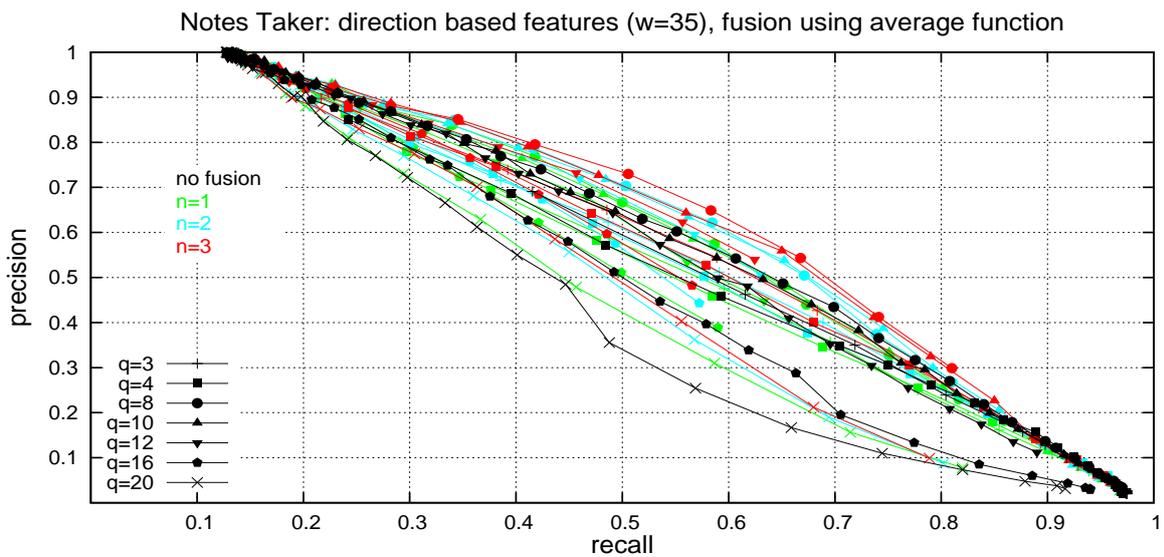
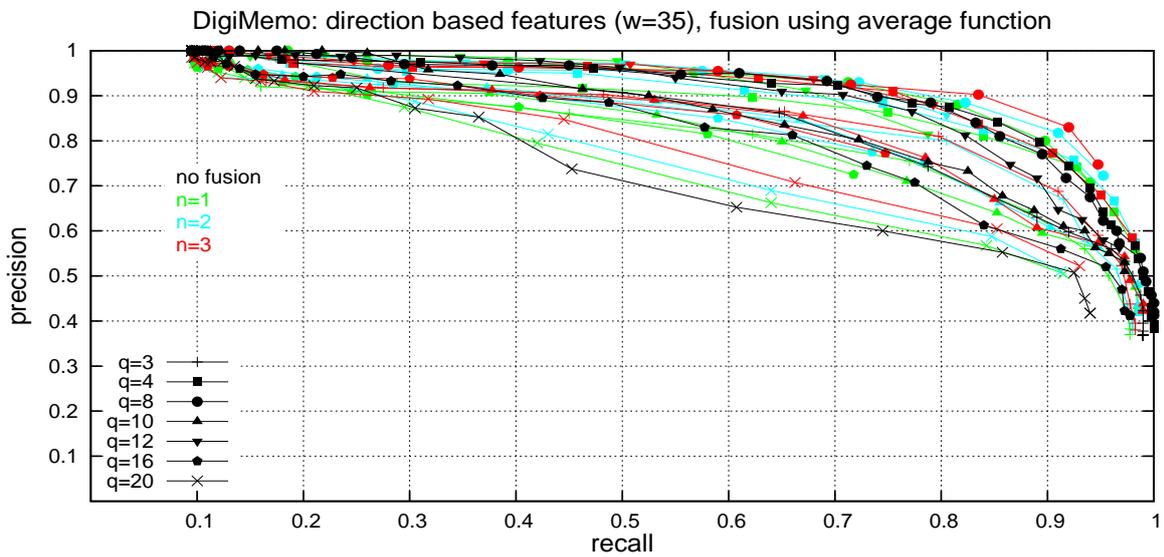
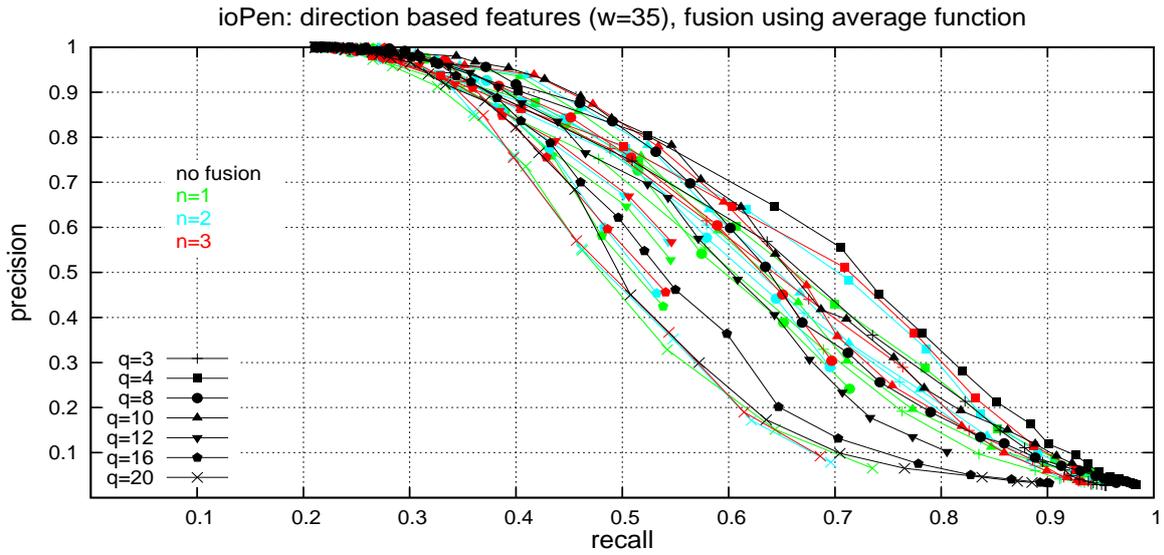
Lokale Schriftrichtung



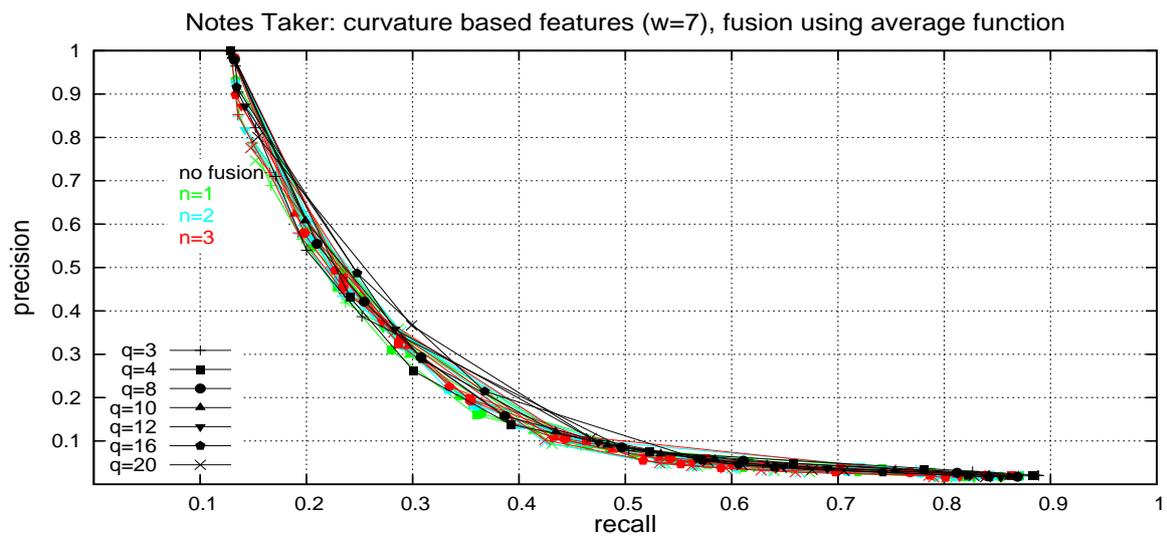
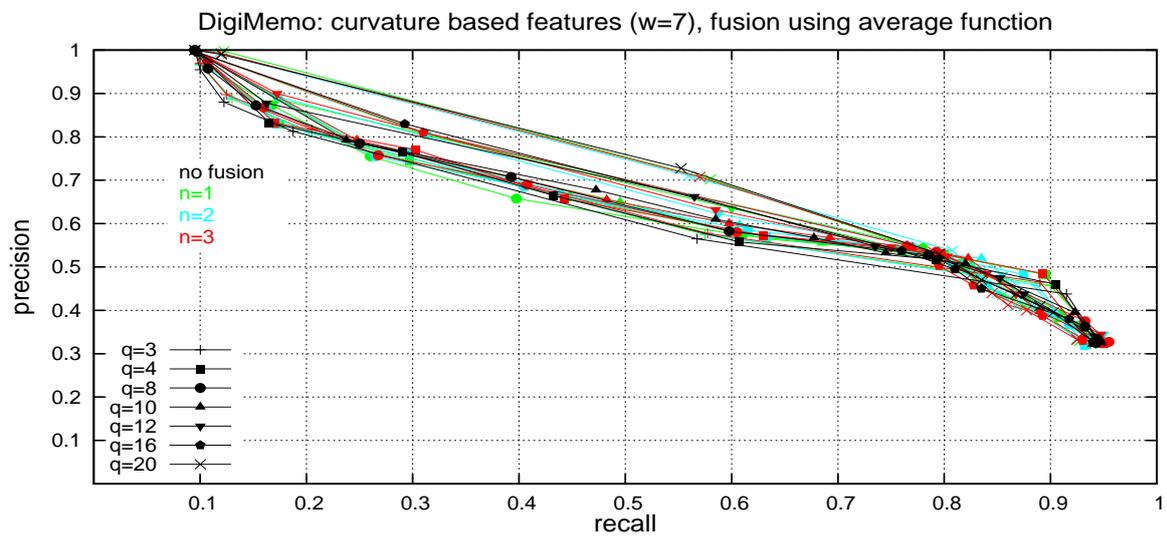
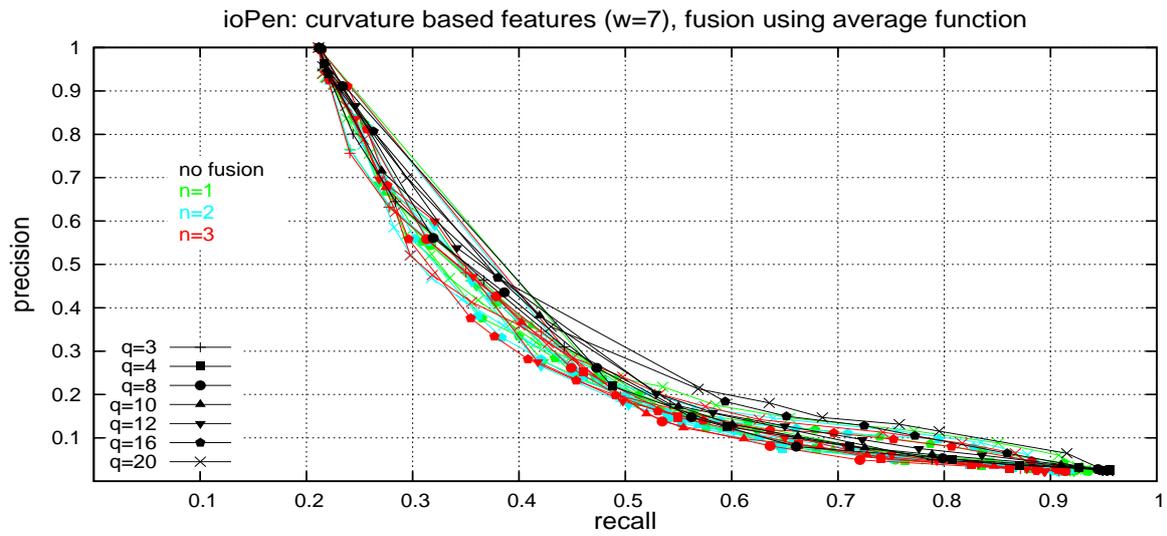


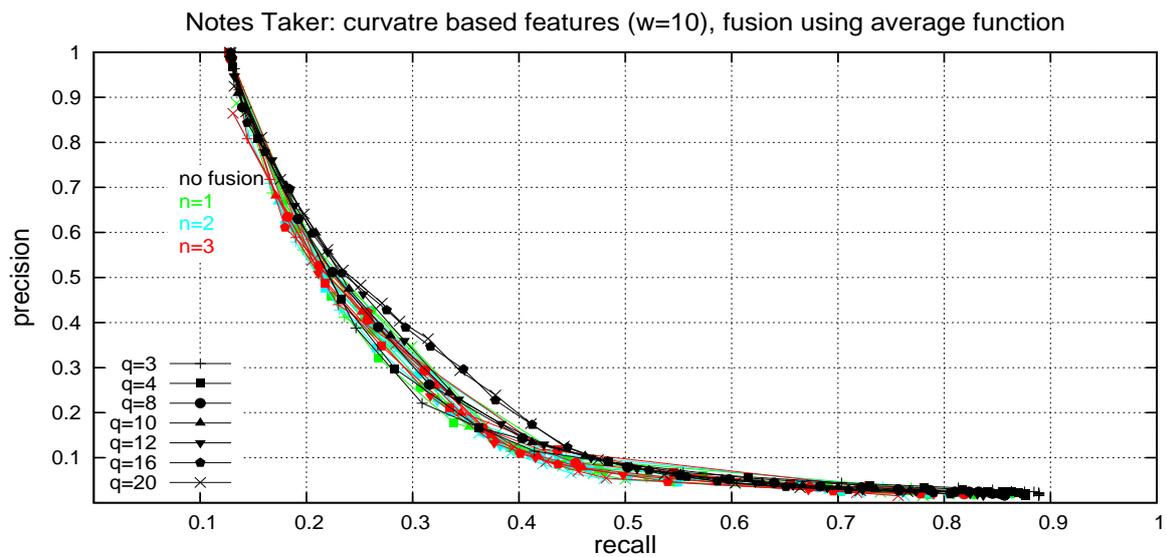
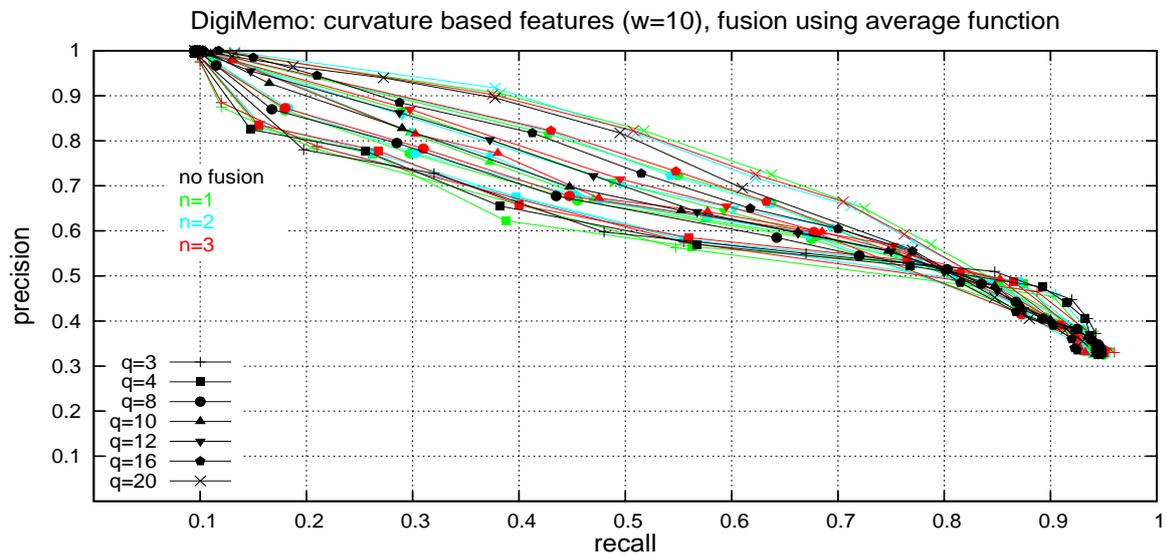
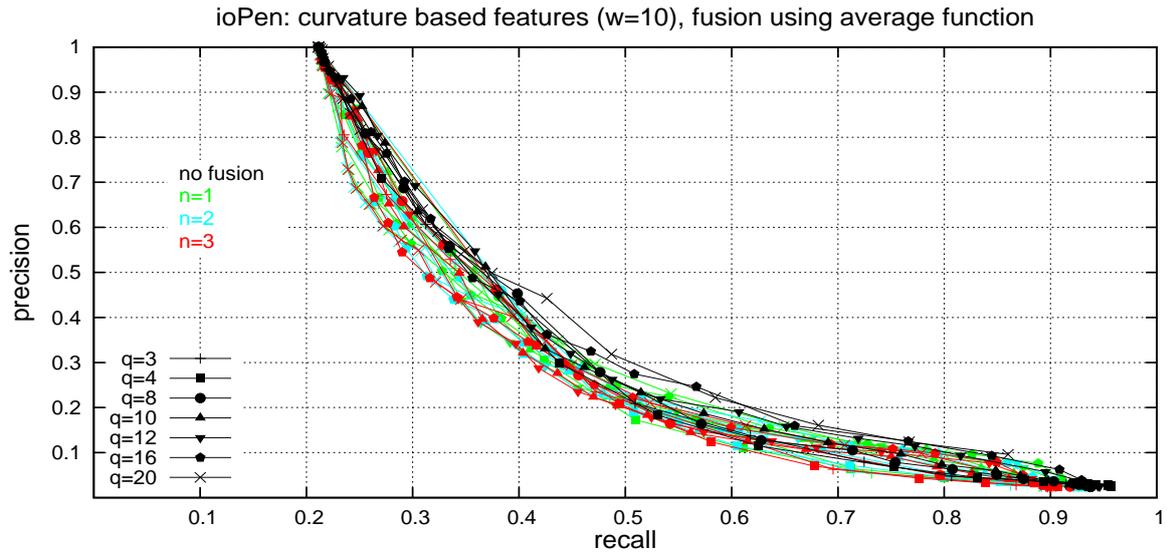
E Resultate – grafisch



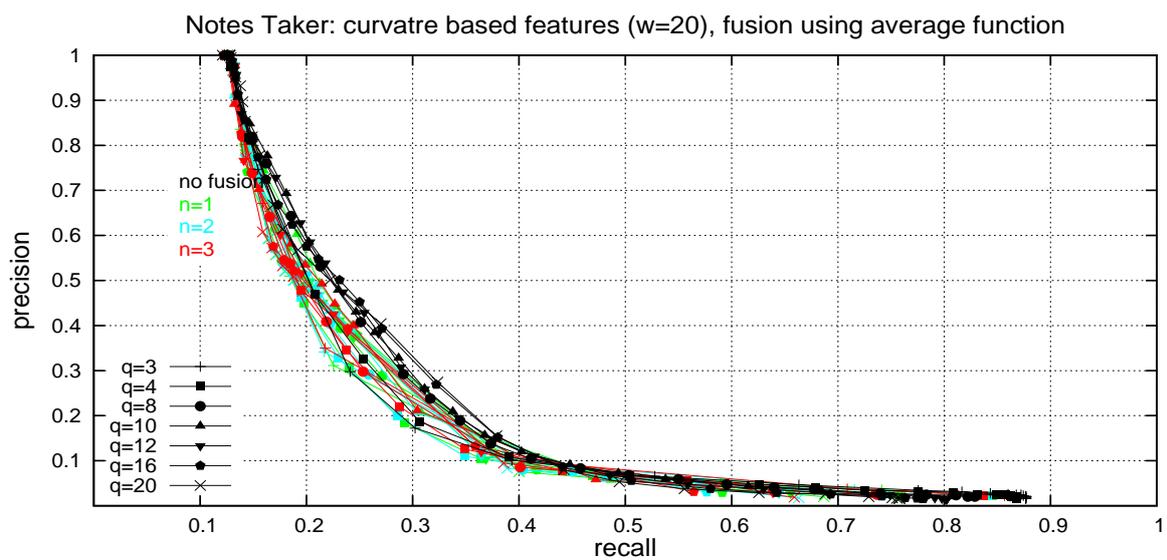
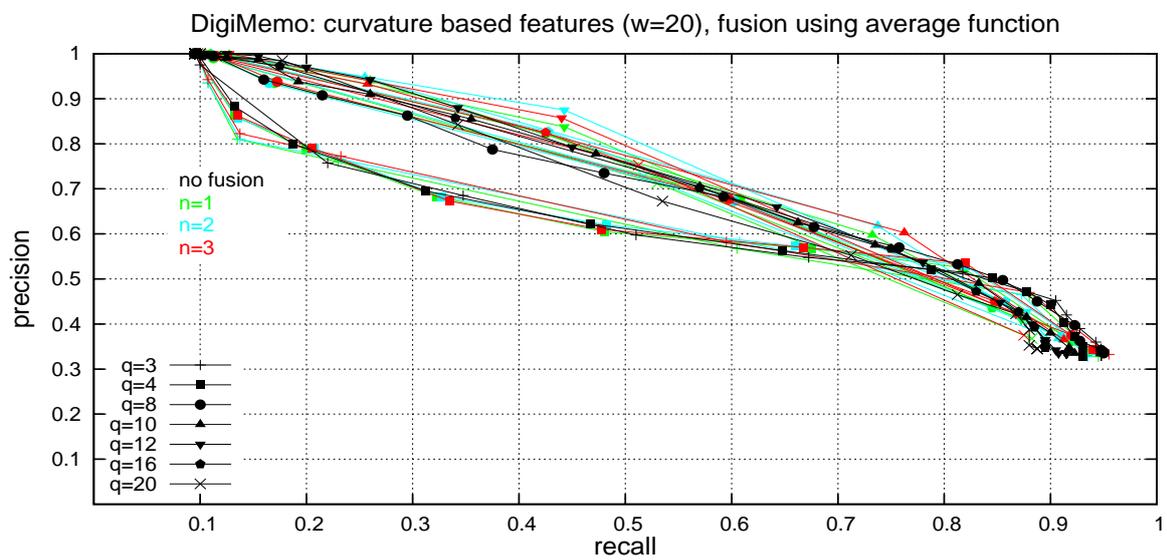
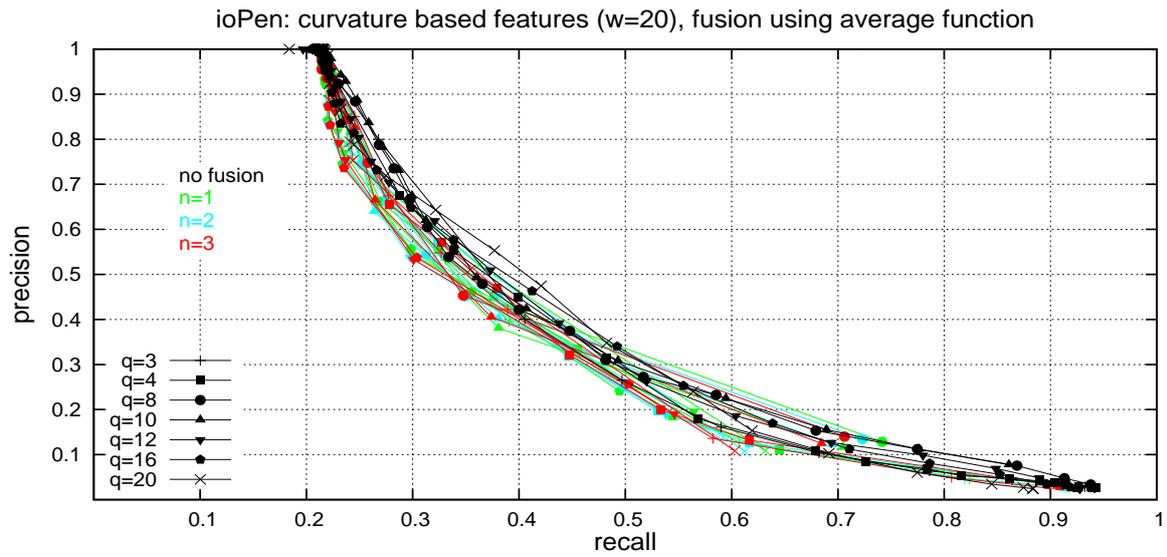


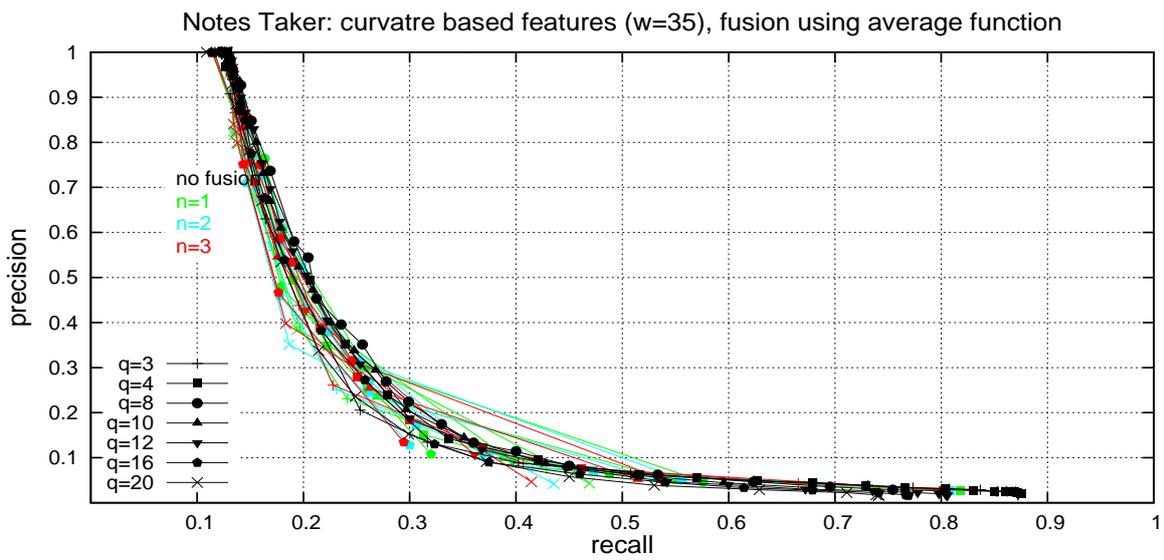
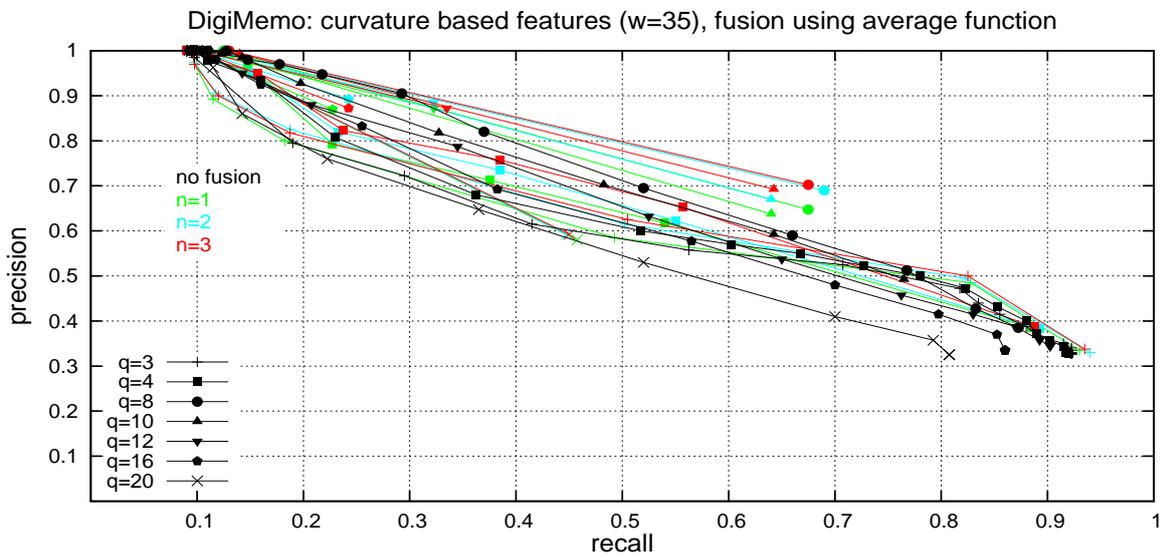
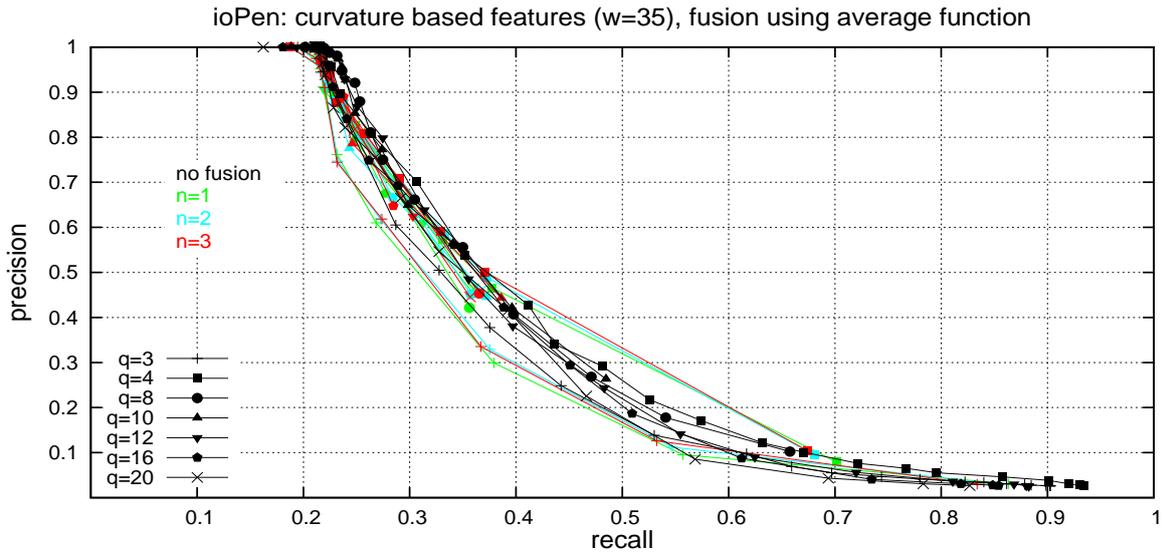
Lokale Schriftkrümmung



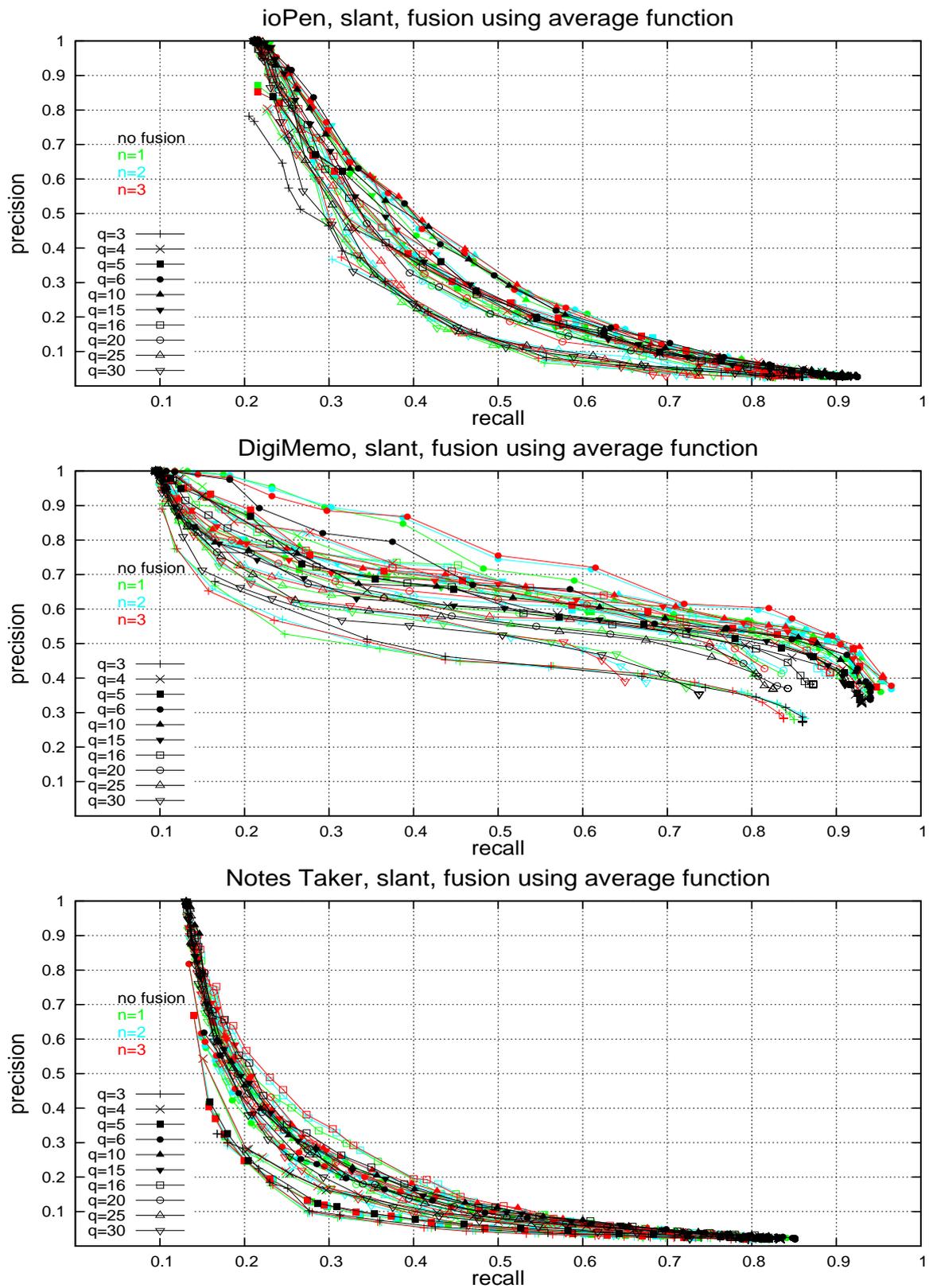


E Resultate – grafisch



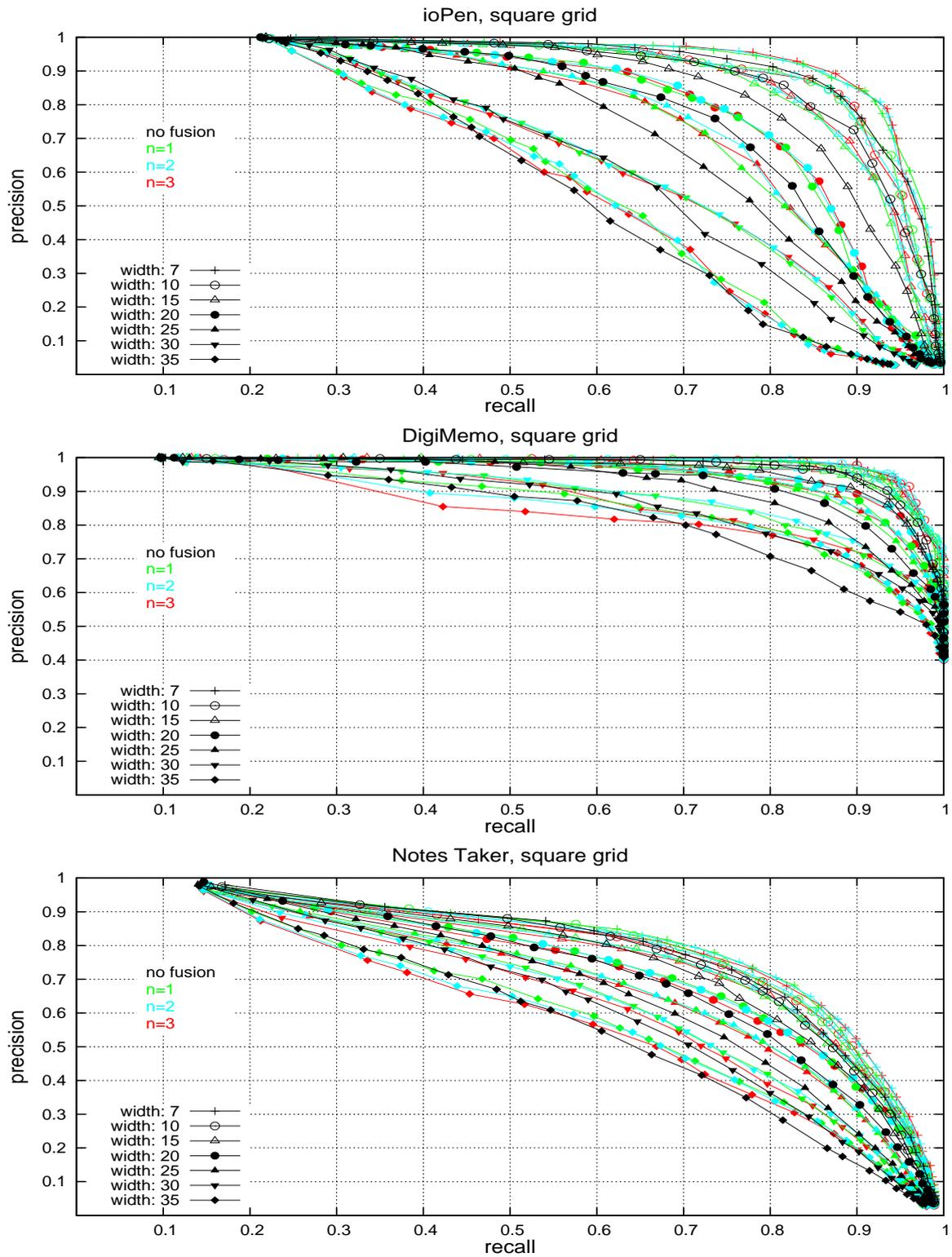


Lokale Schriftneigung

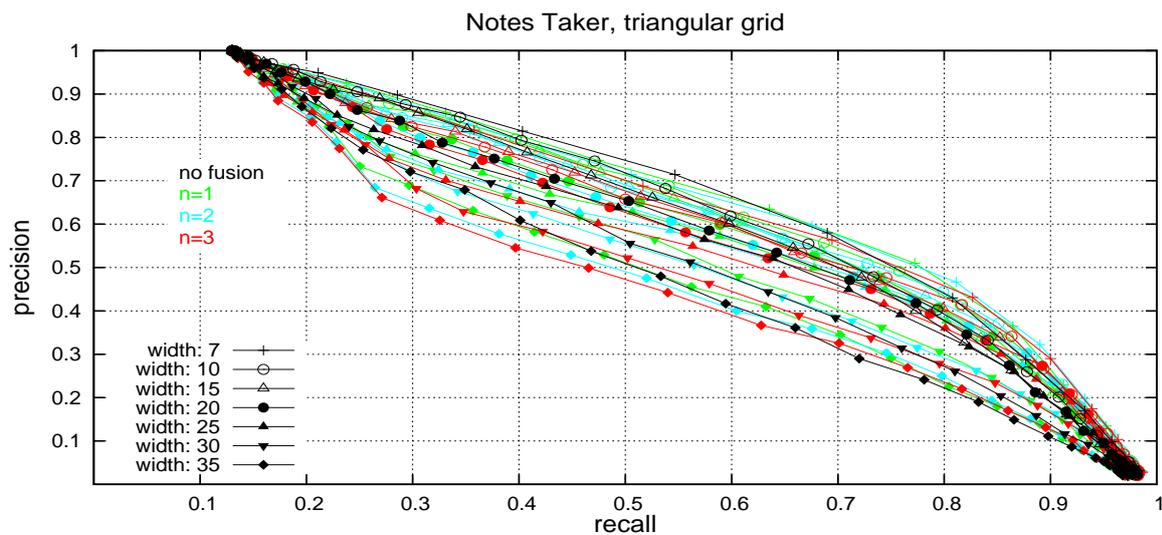
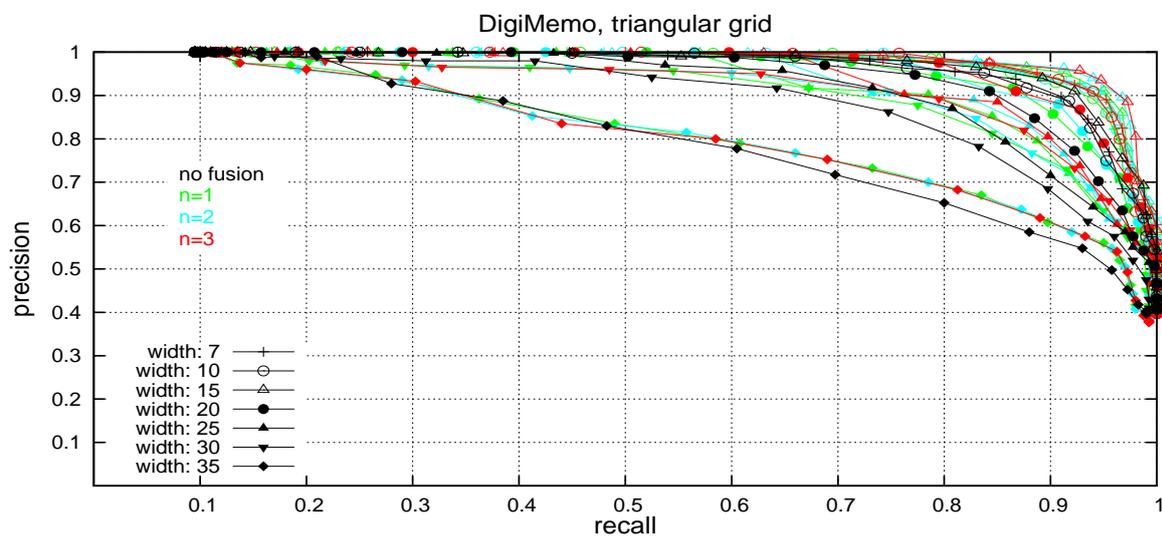
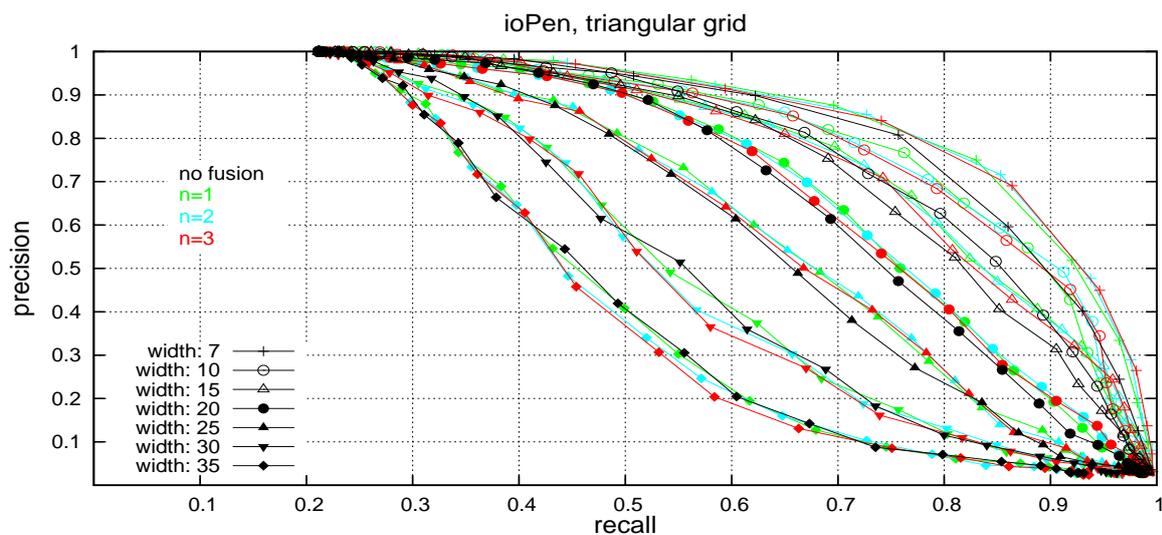


E.2.2 Fusion auf Entscheidungsebene

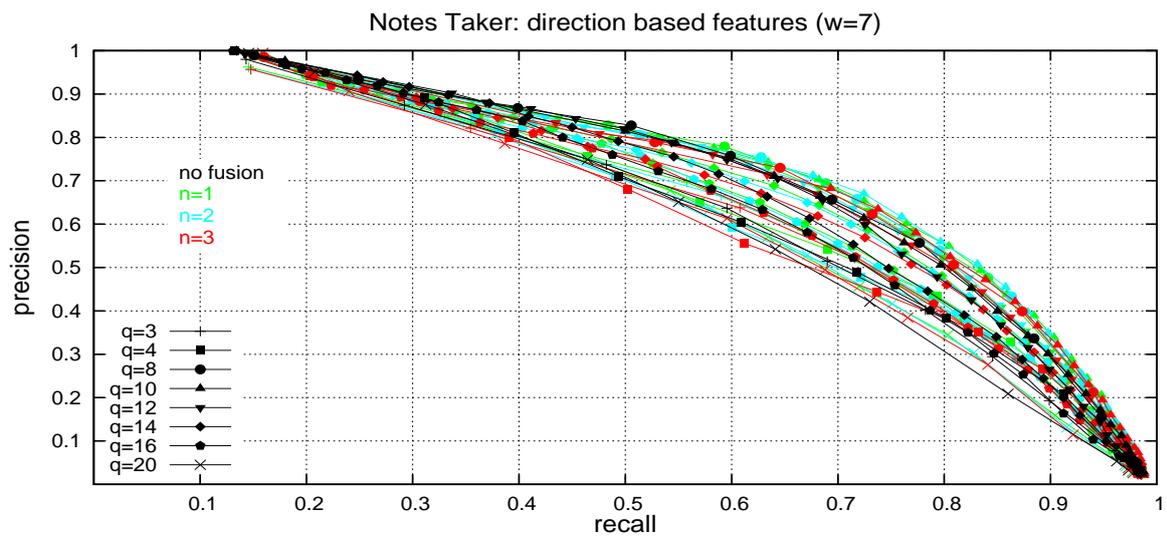
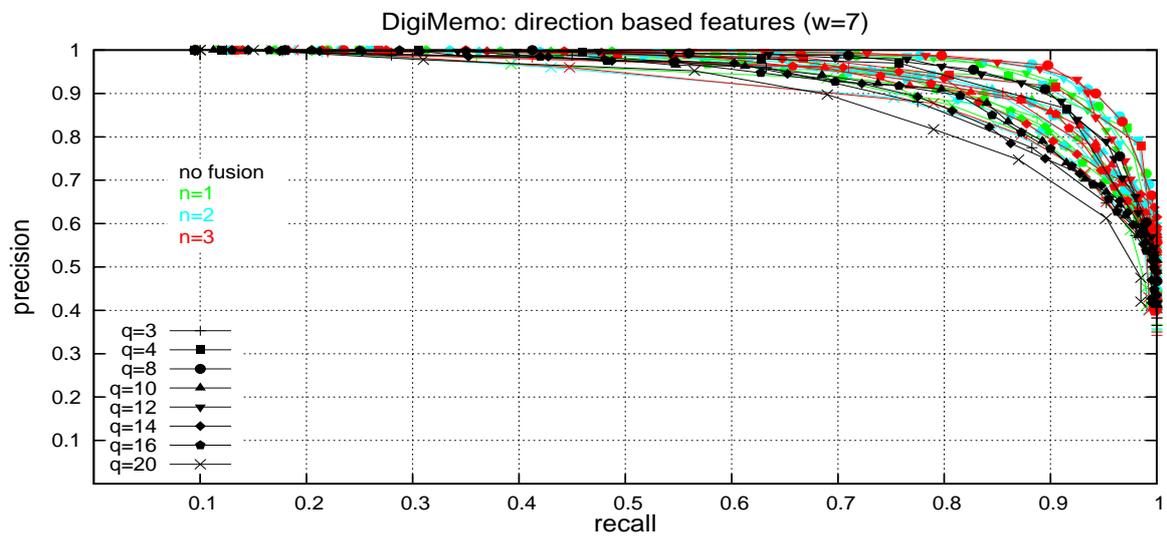
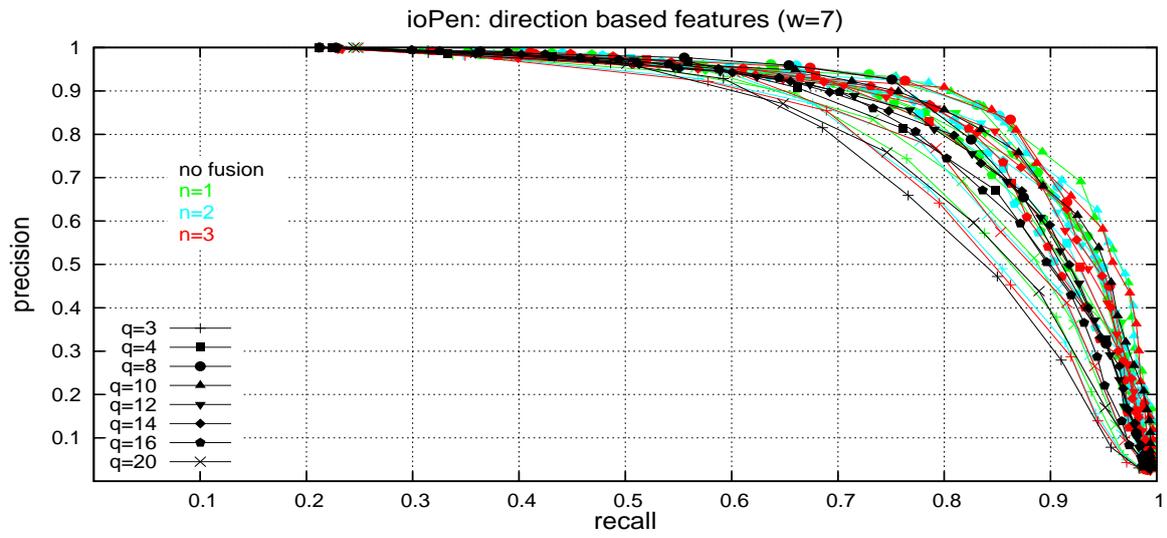
Quadratische Gitter

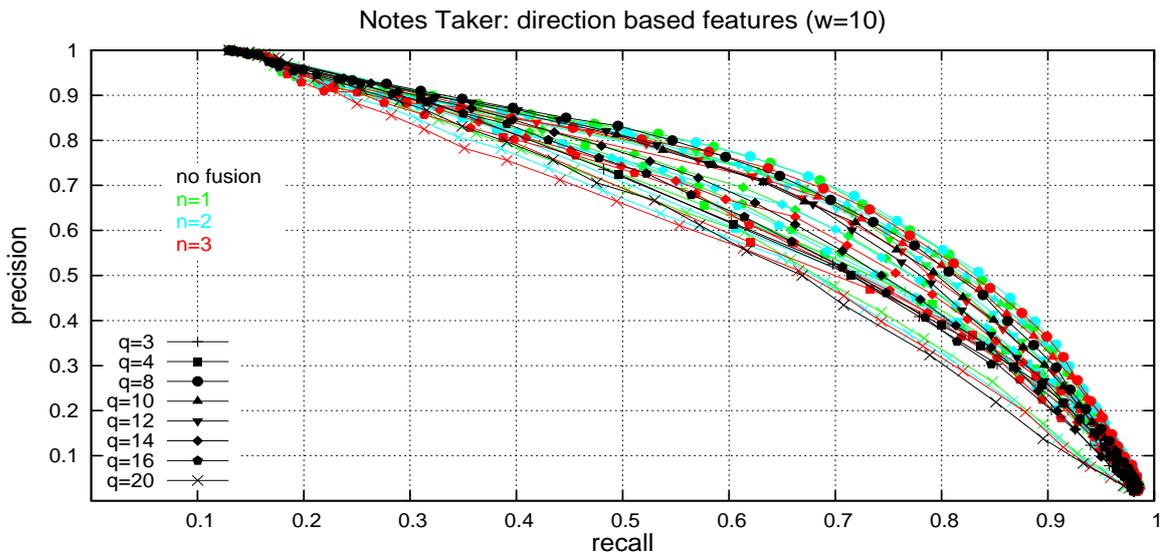
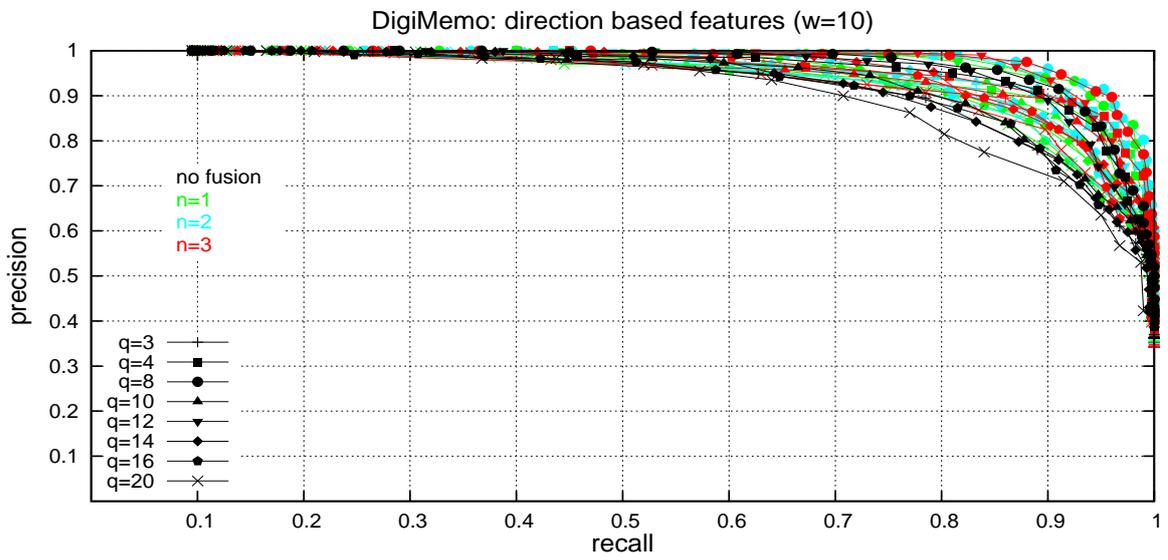
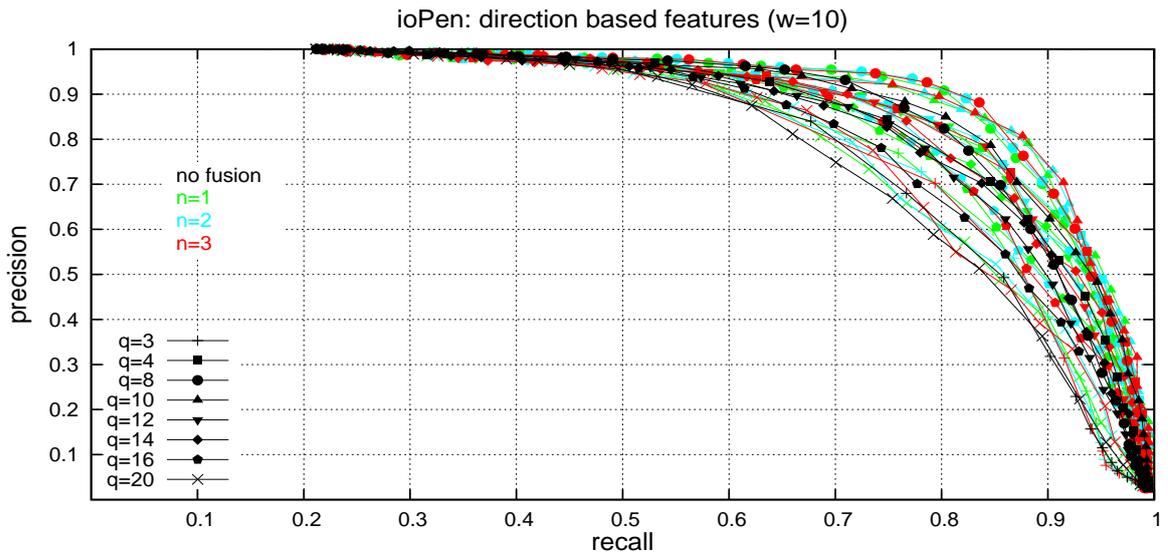


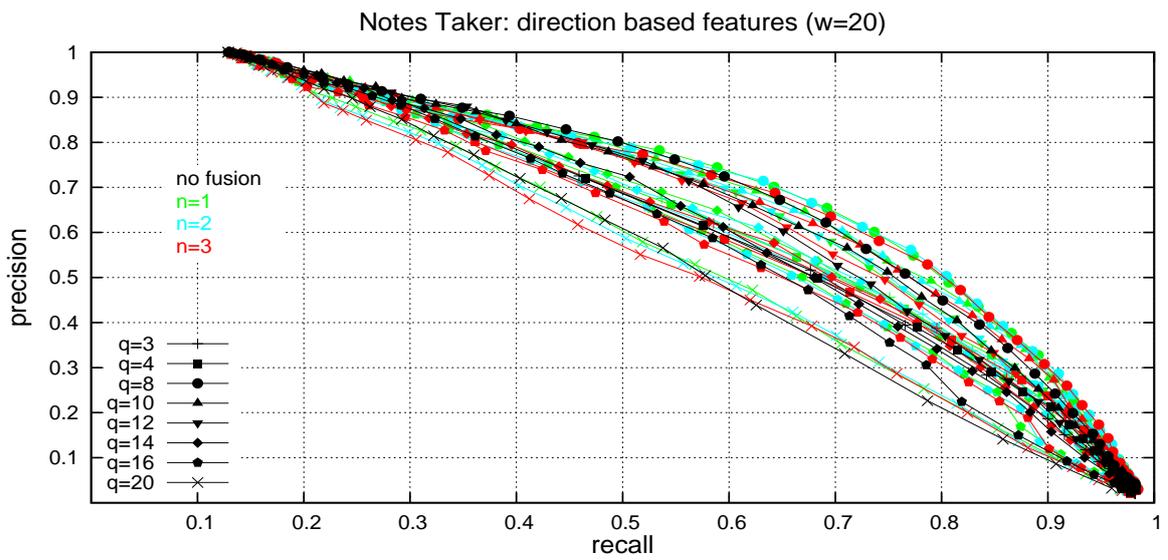
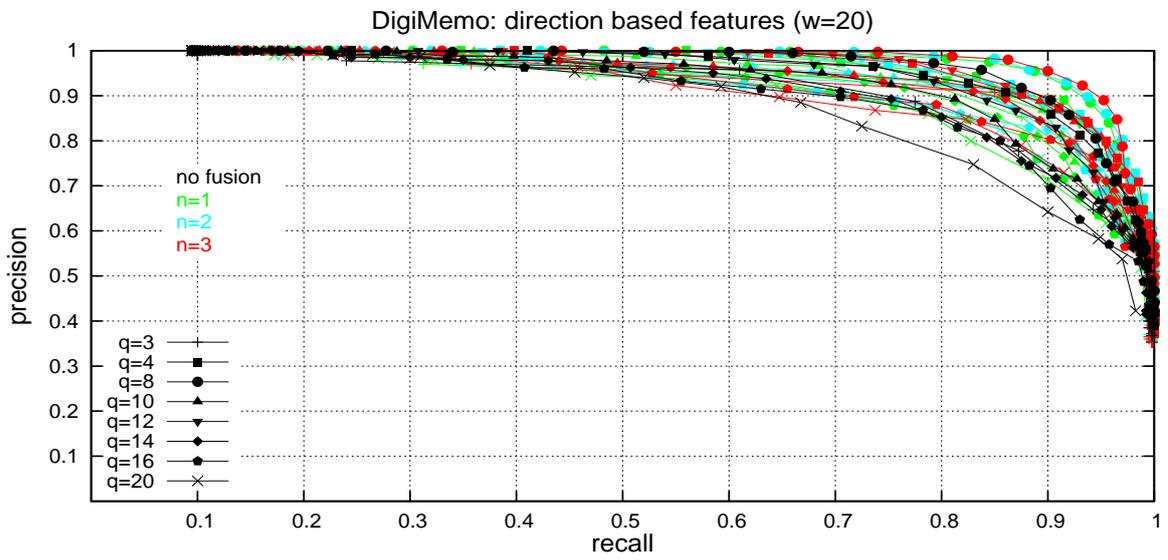
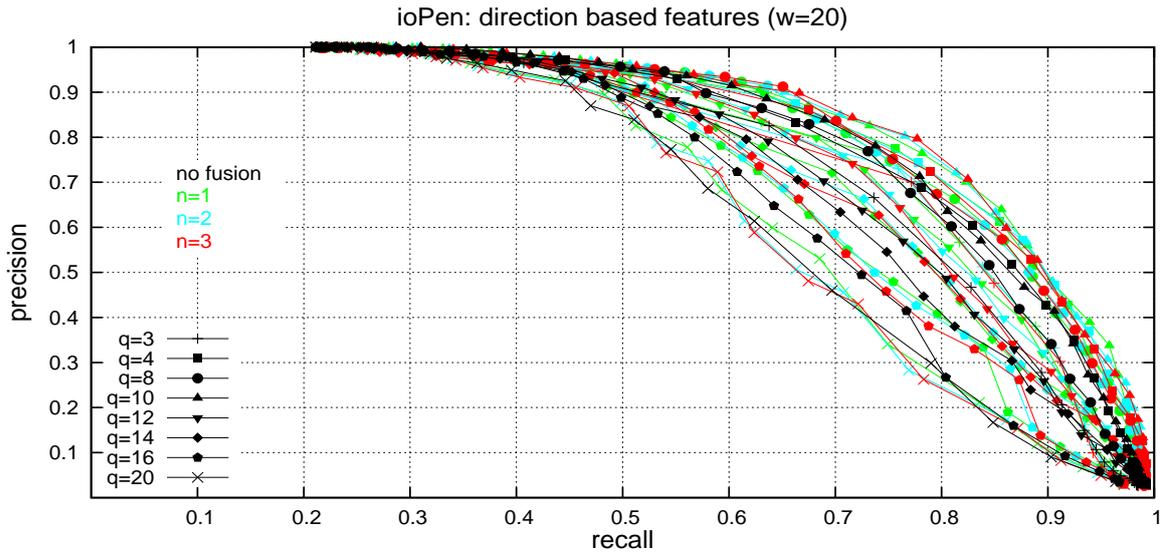
Dreiecksgitter

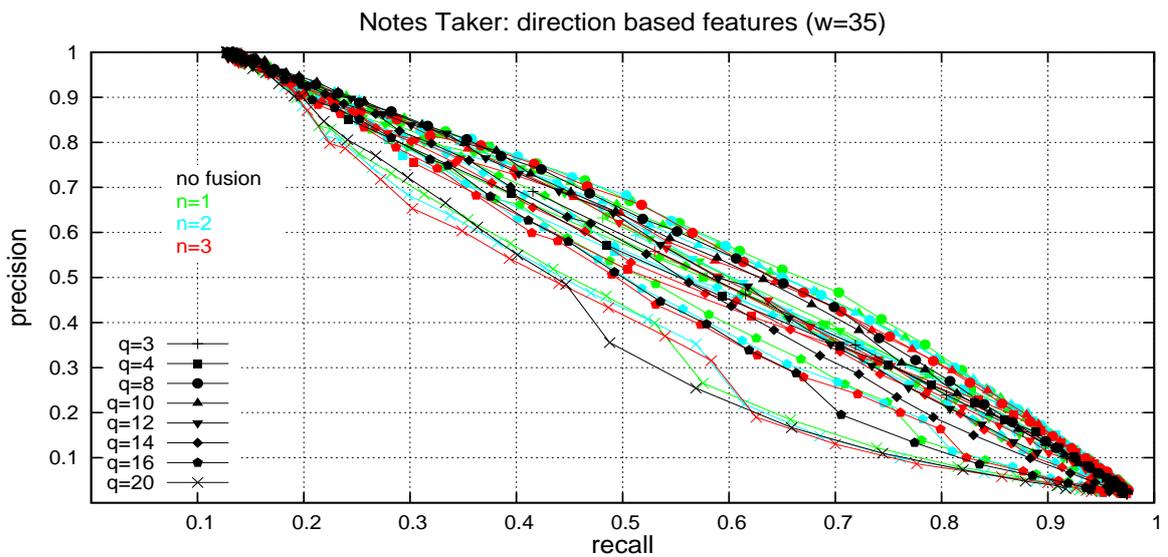
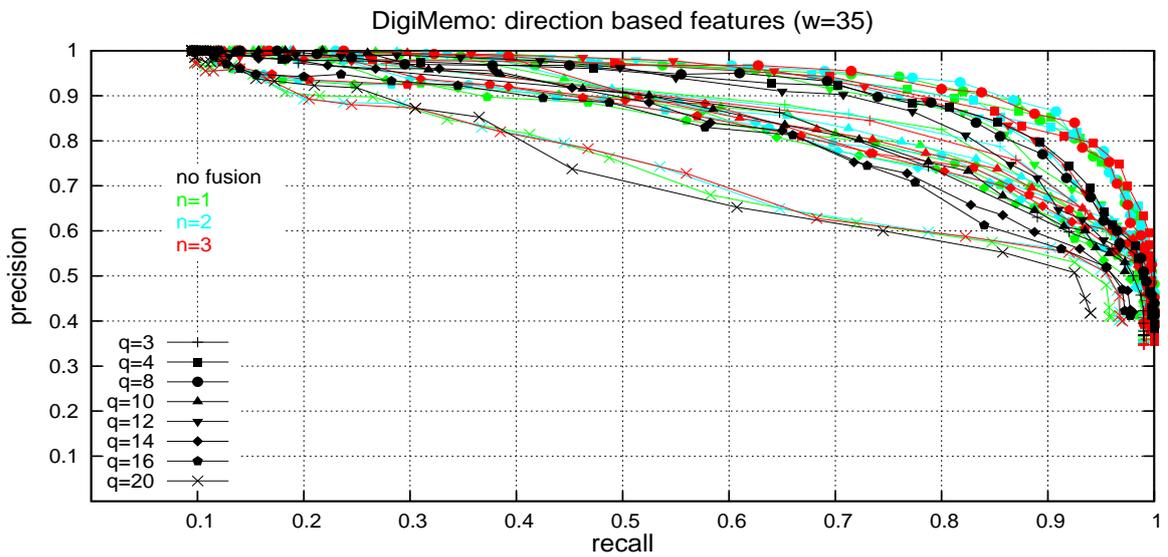
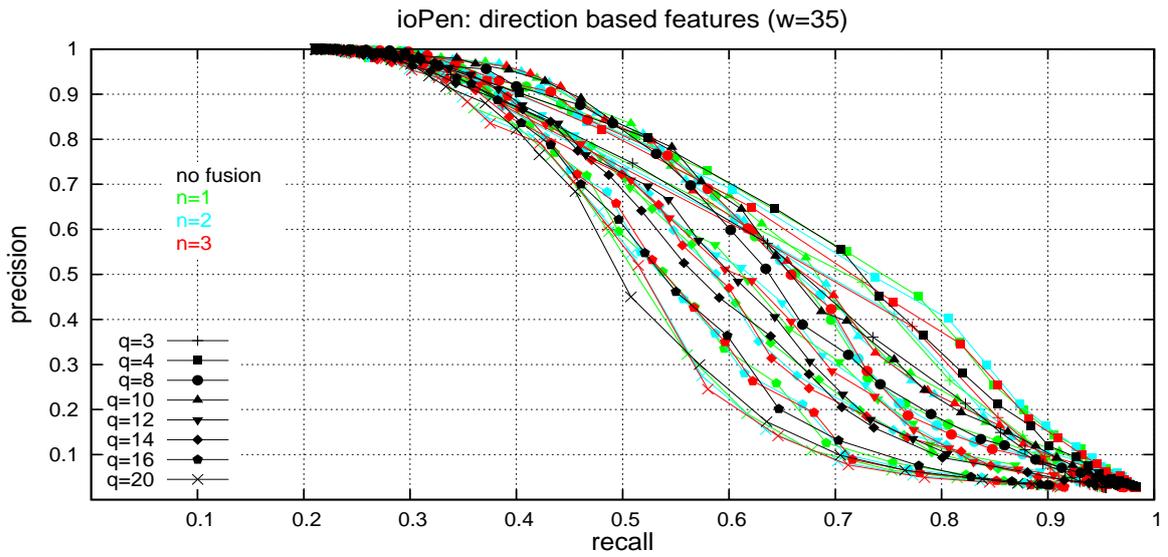


Lokale Schriftrichtung

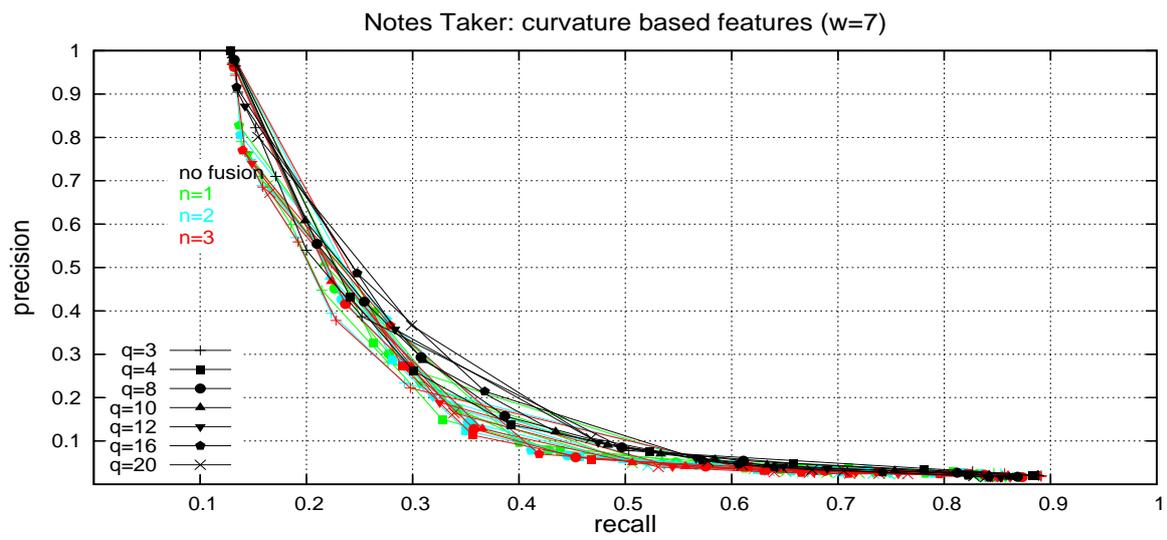
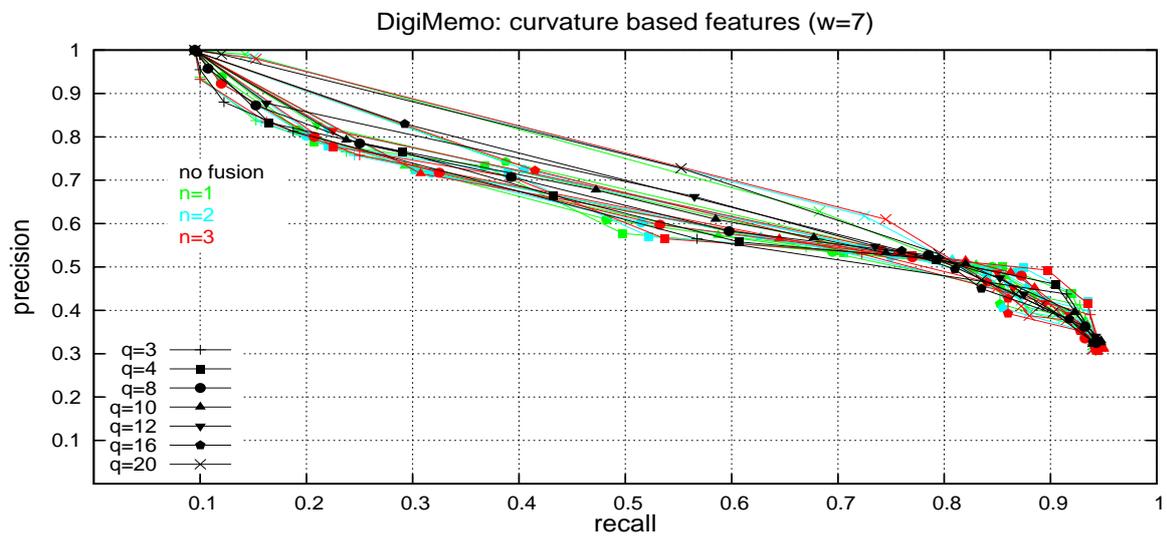
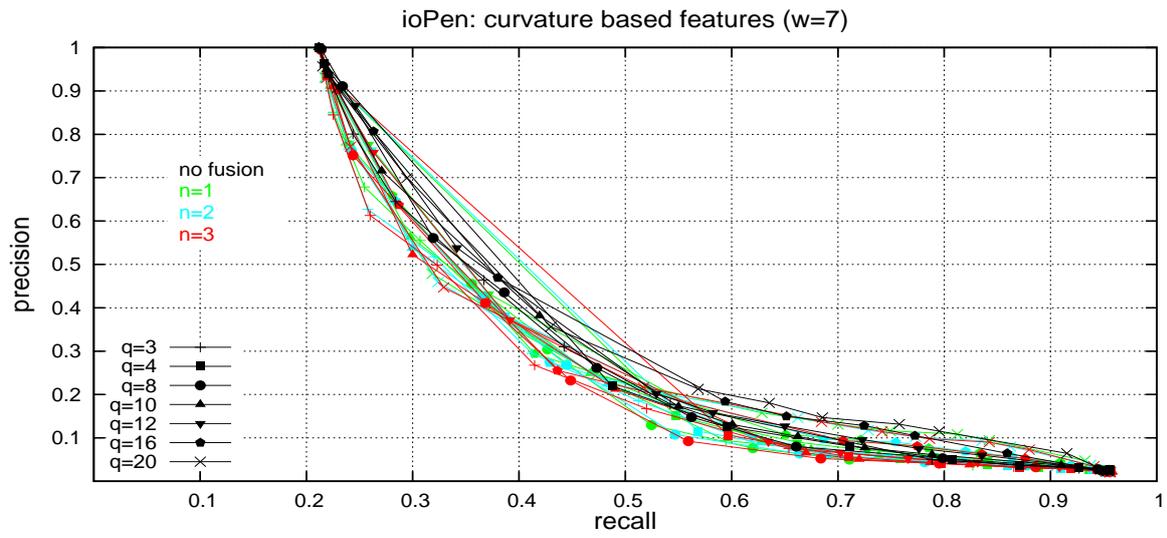


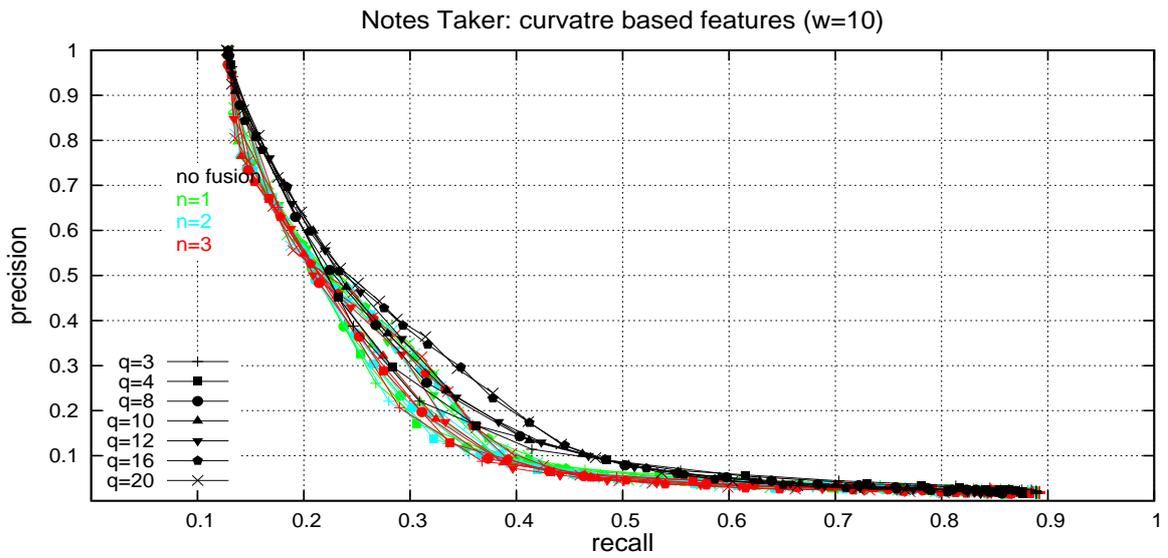
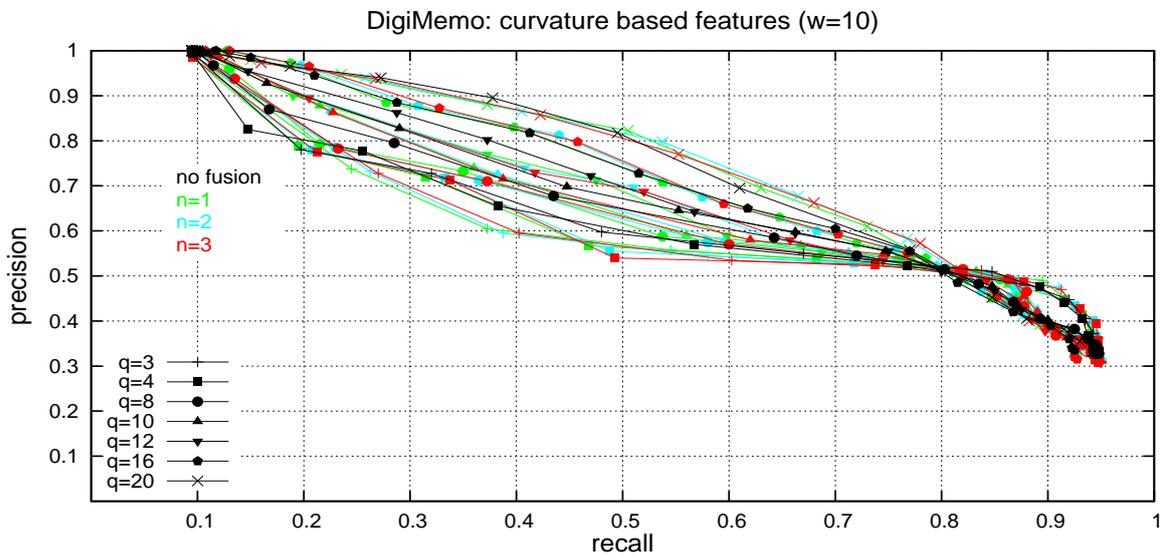
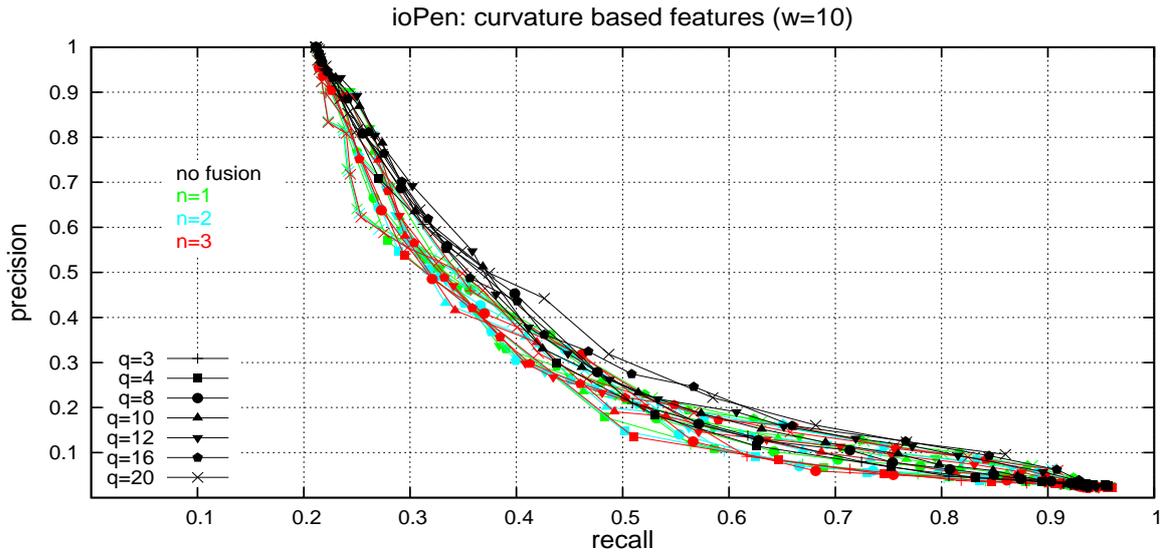


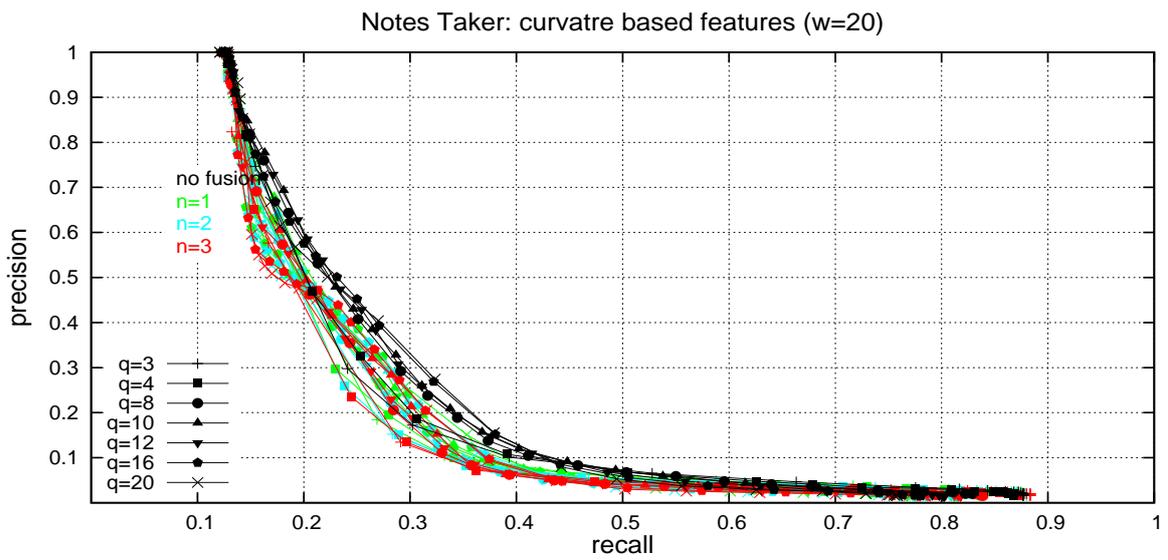
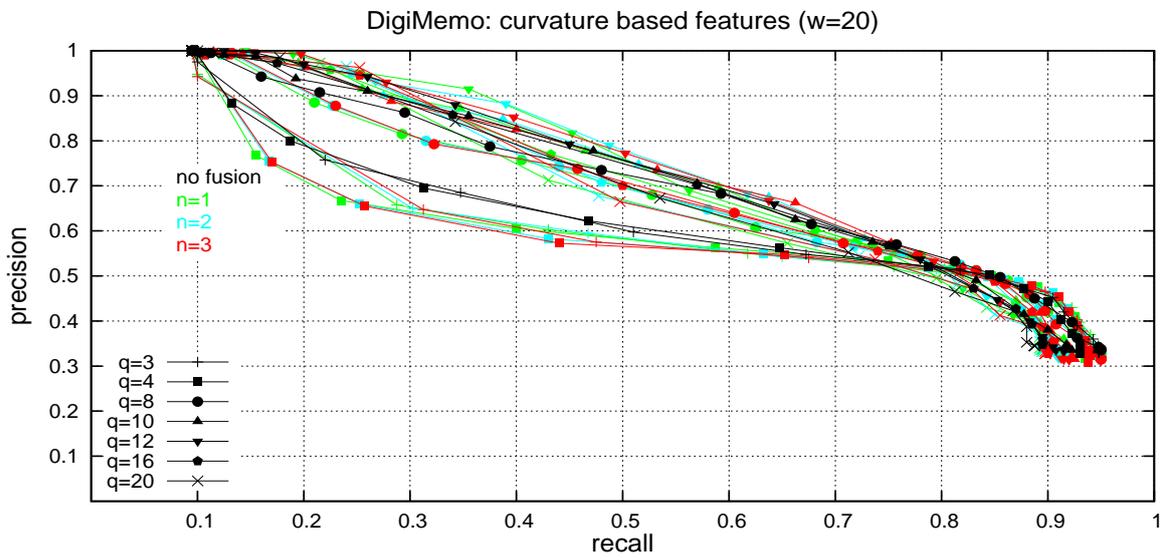
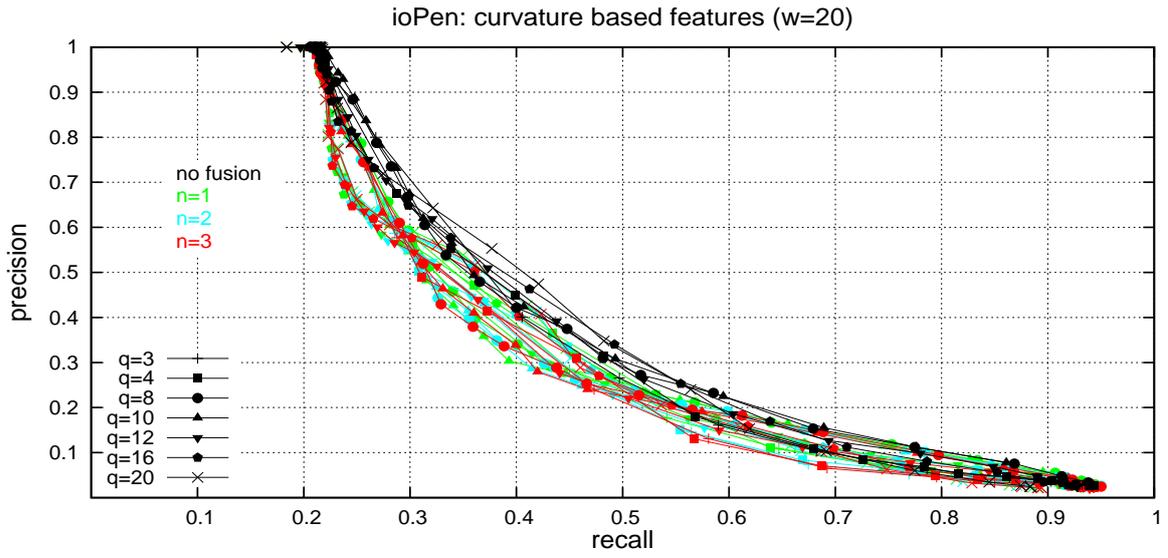


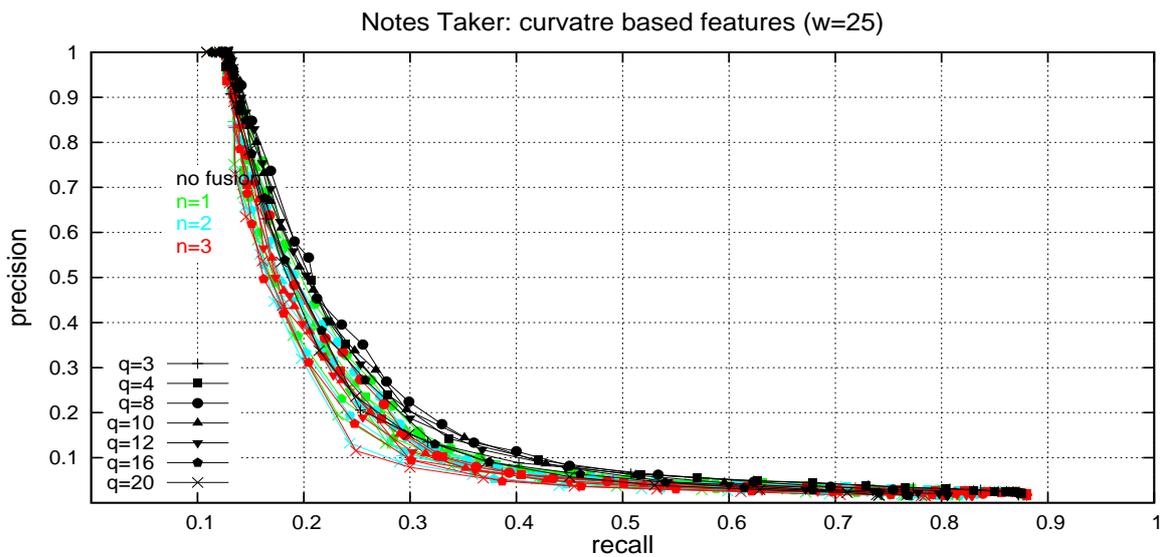
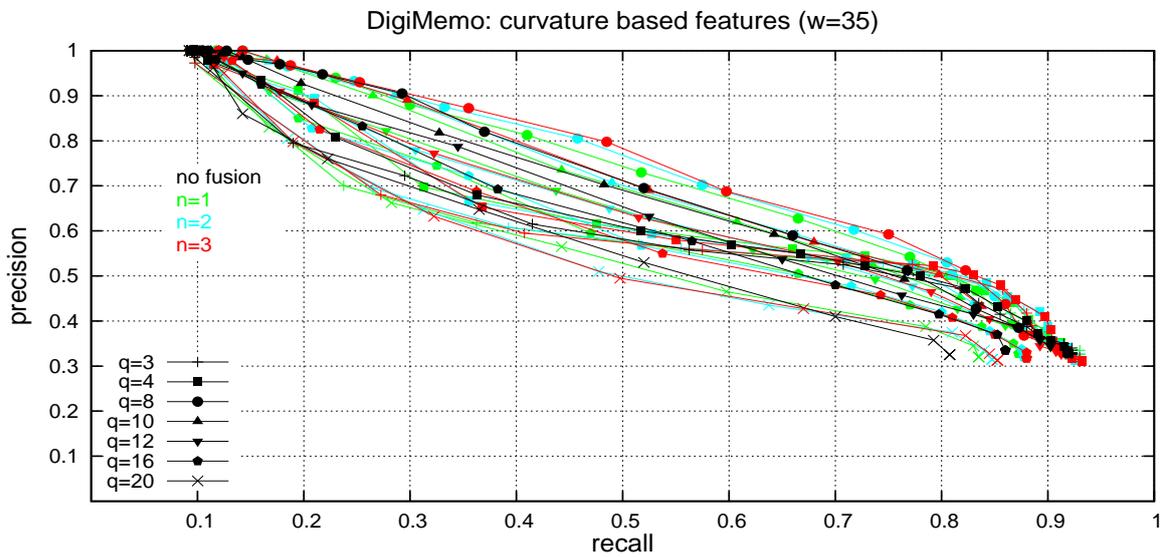
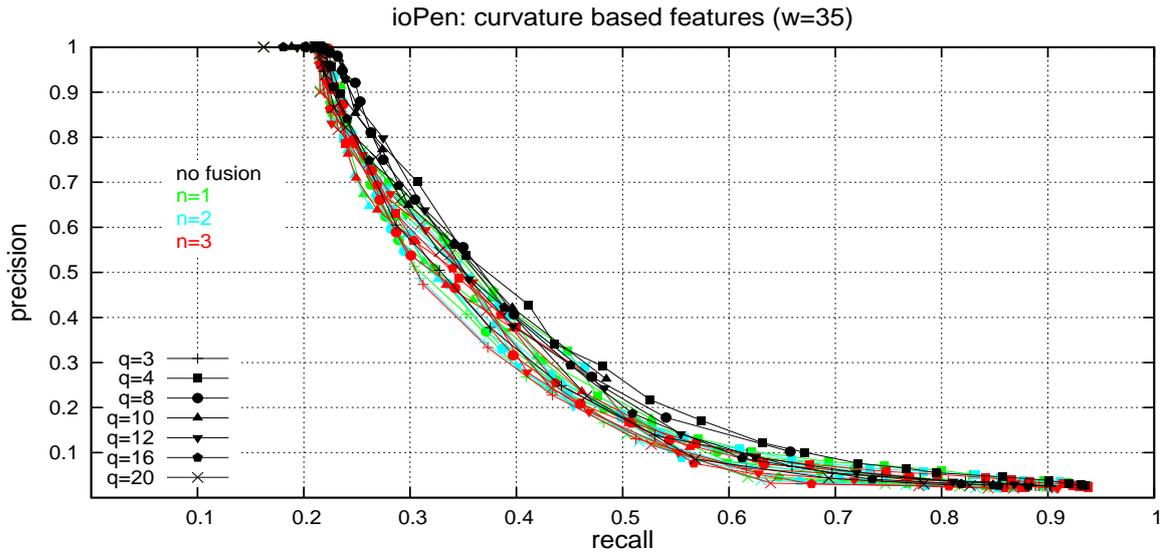


Lokale Schriftkrümmung

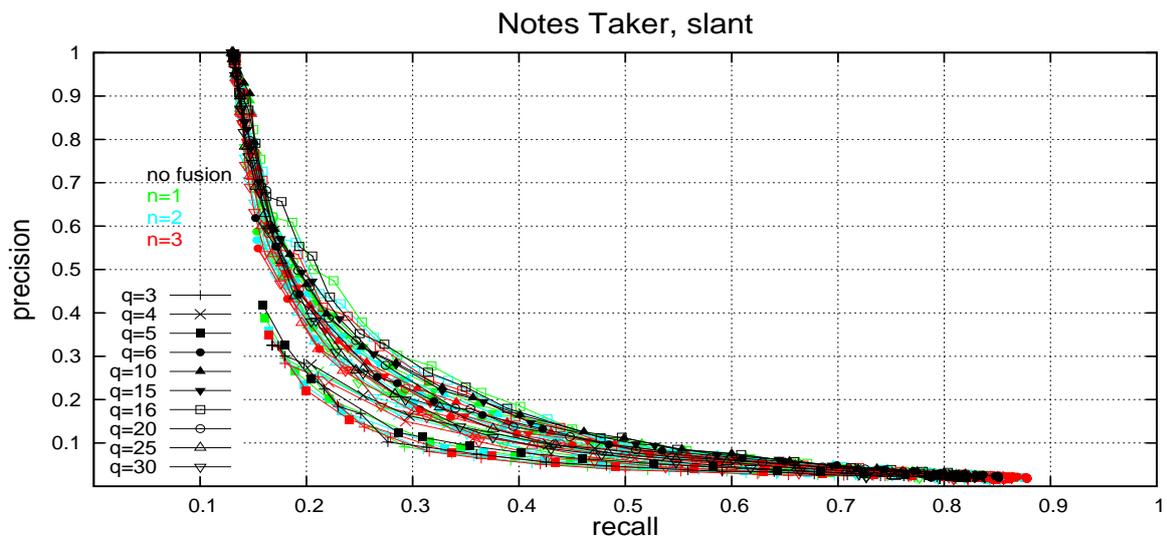
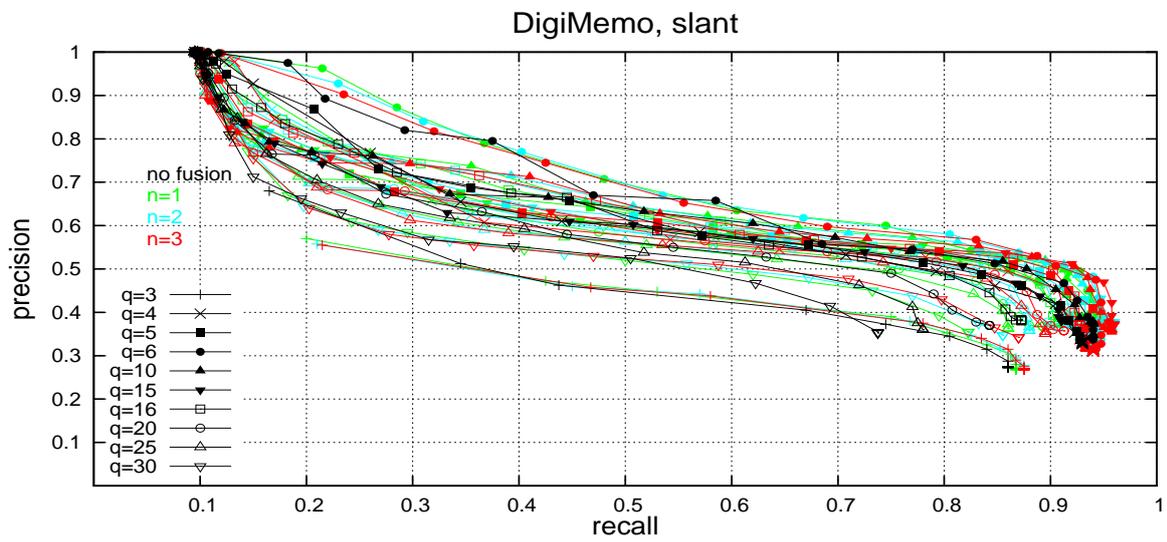
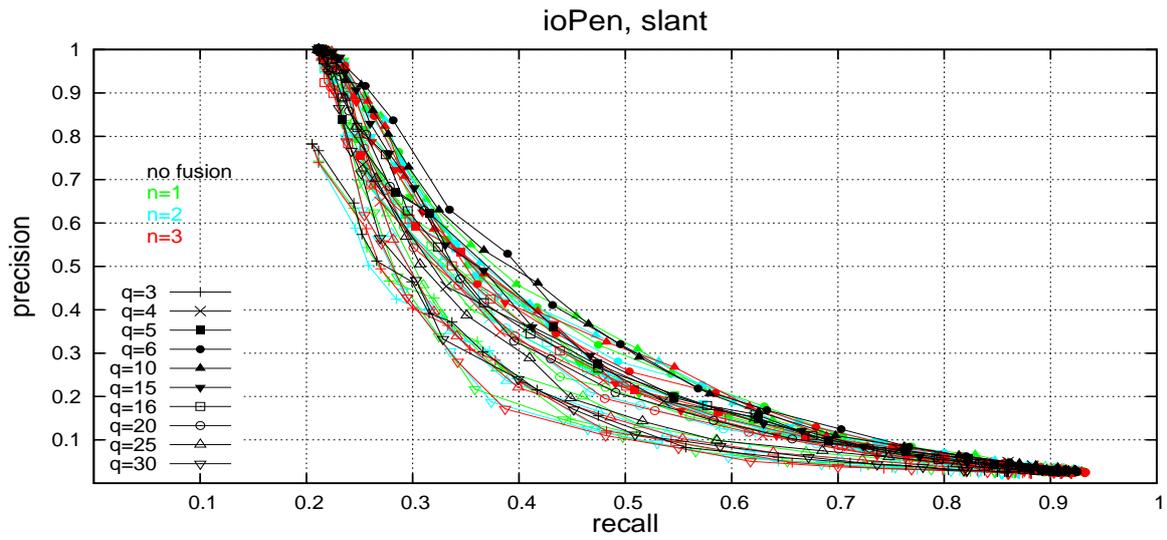






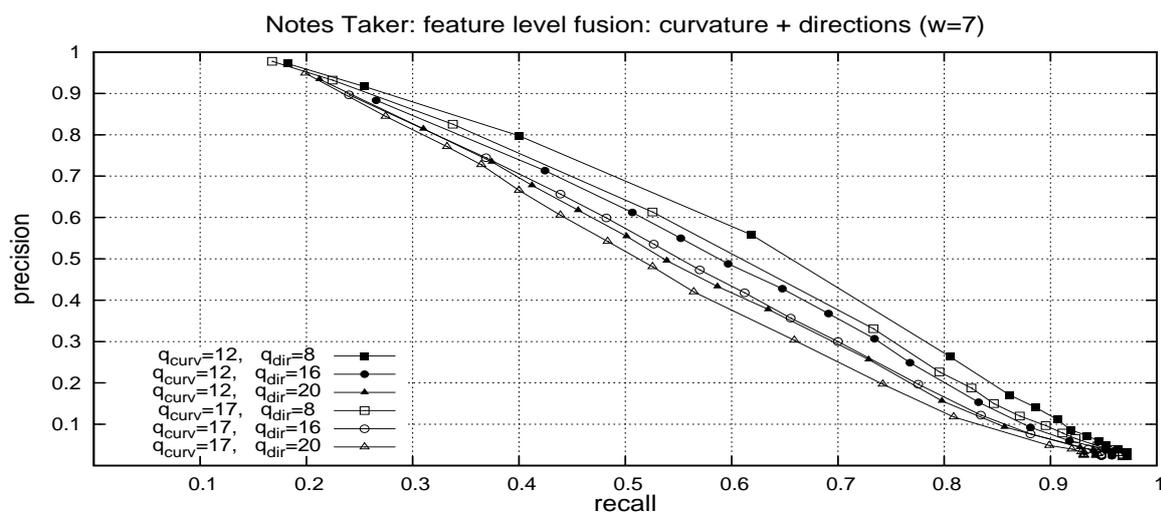
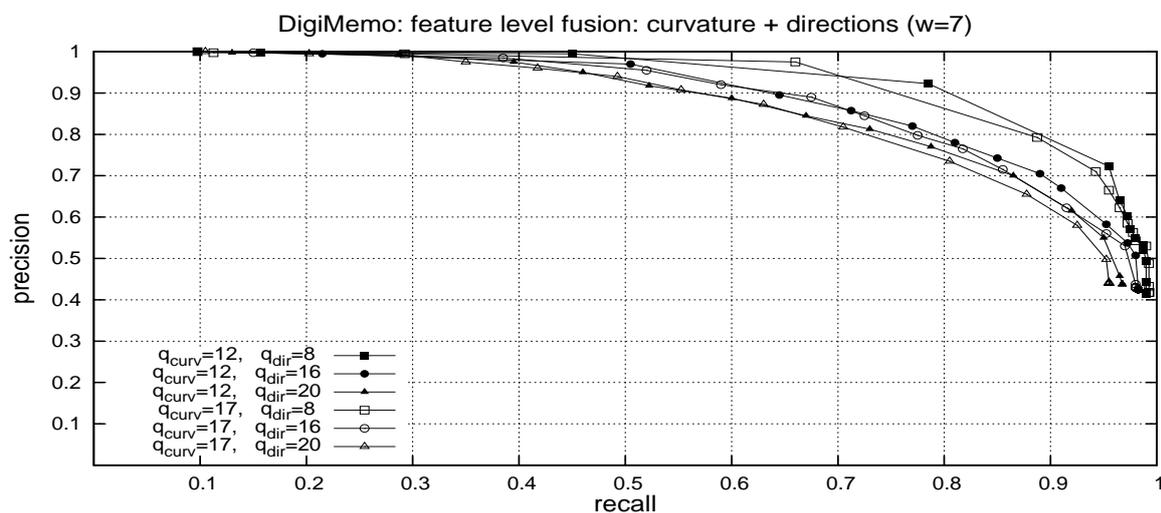
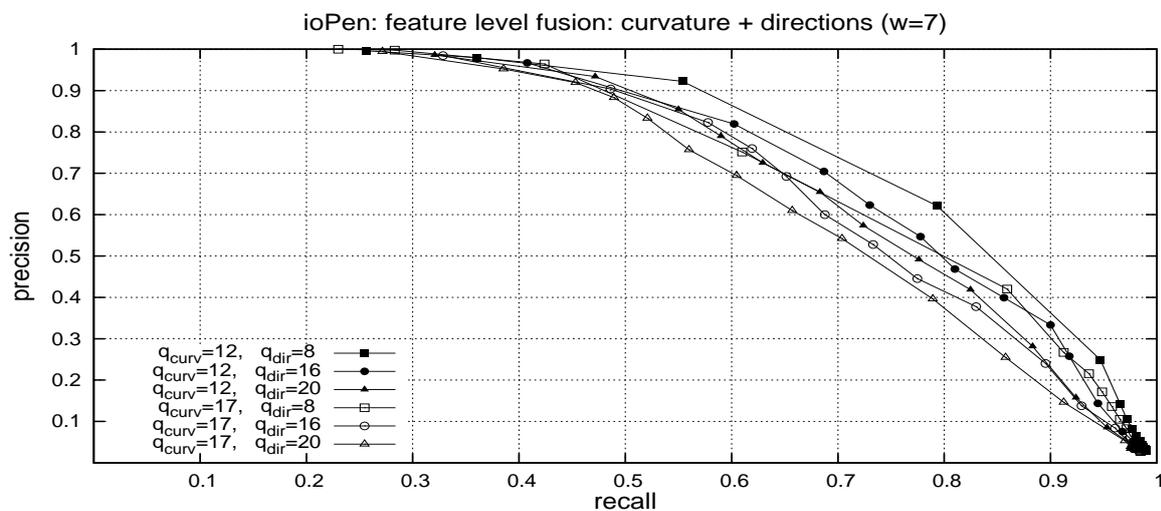


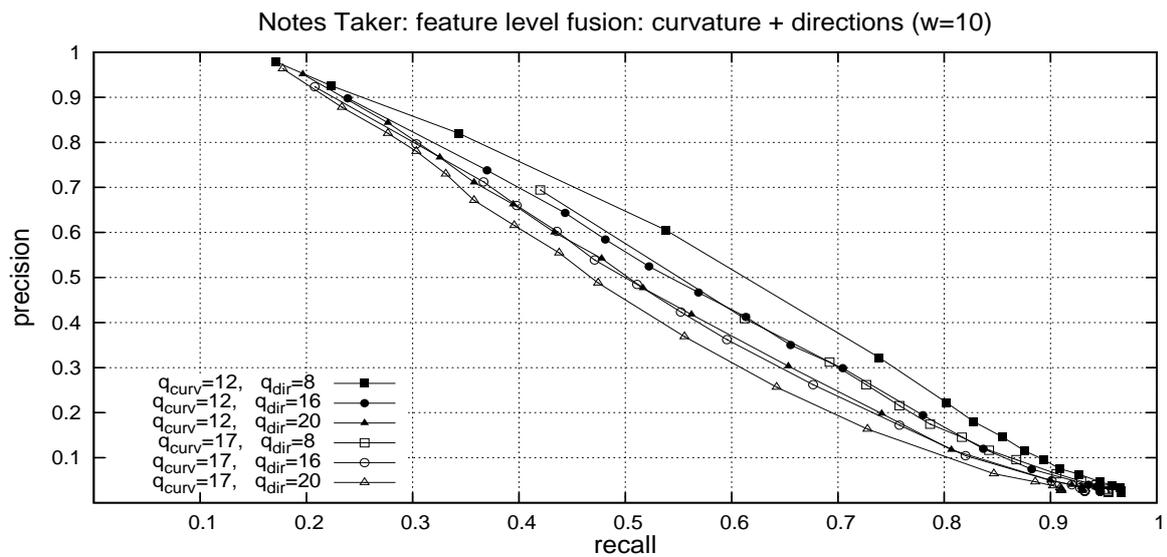
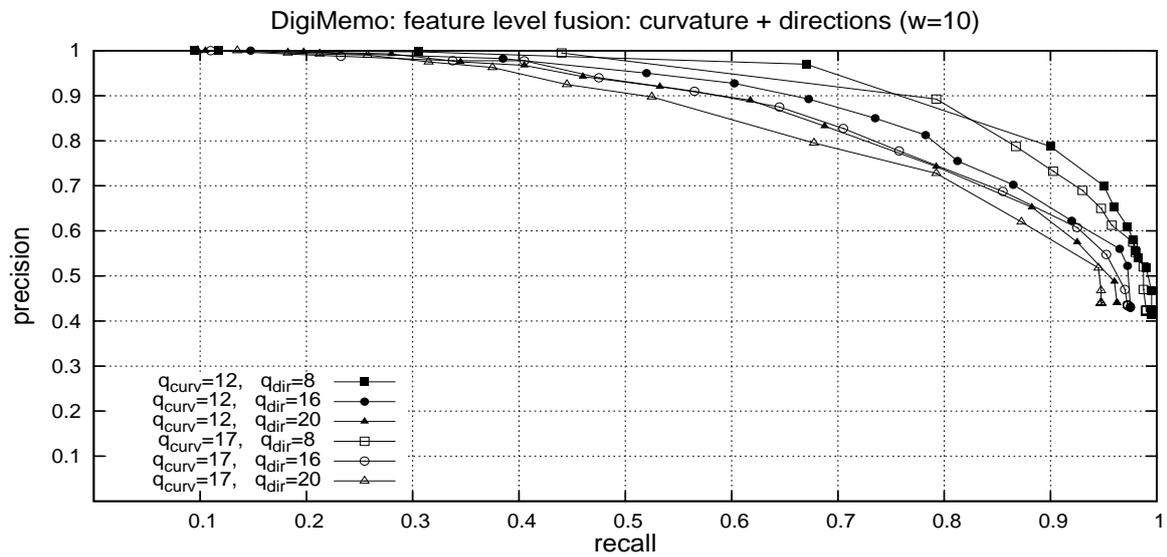
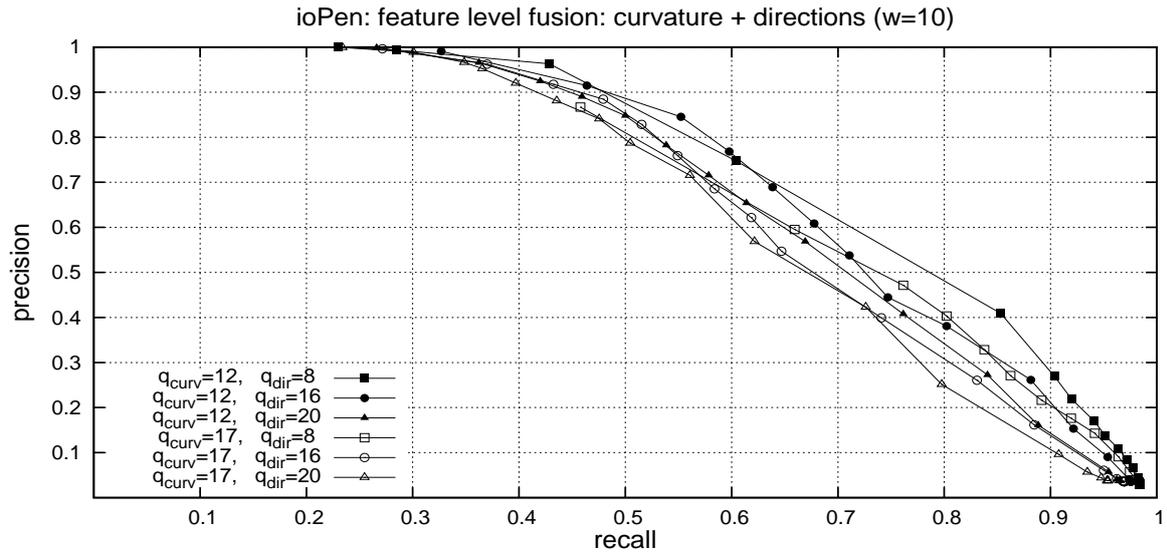
Lokale Schriftneigung

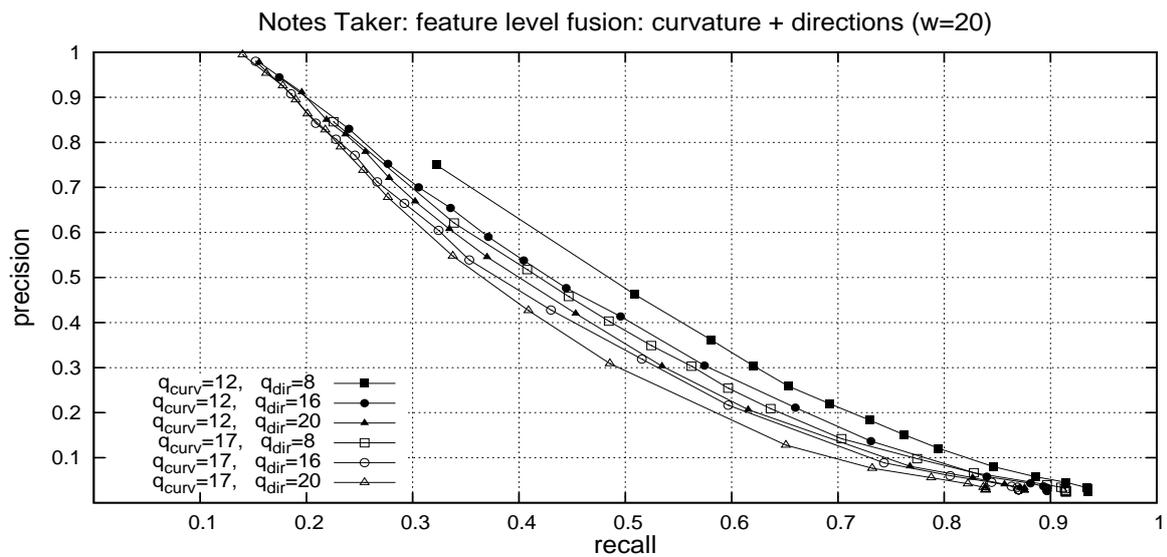
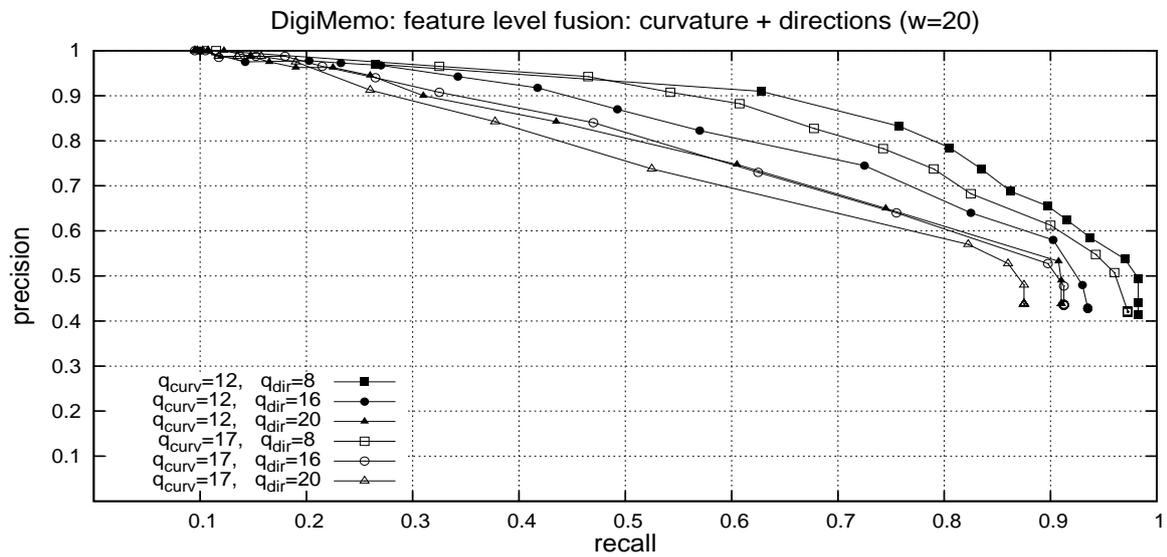
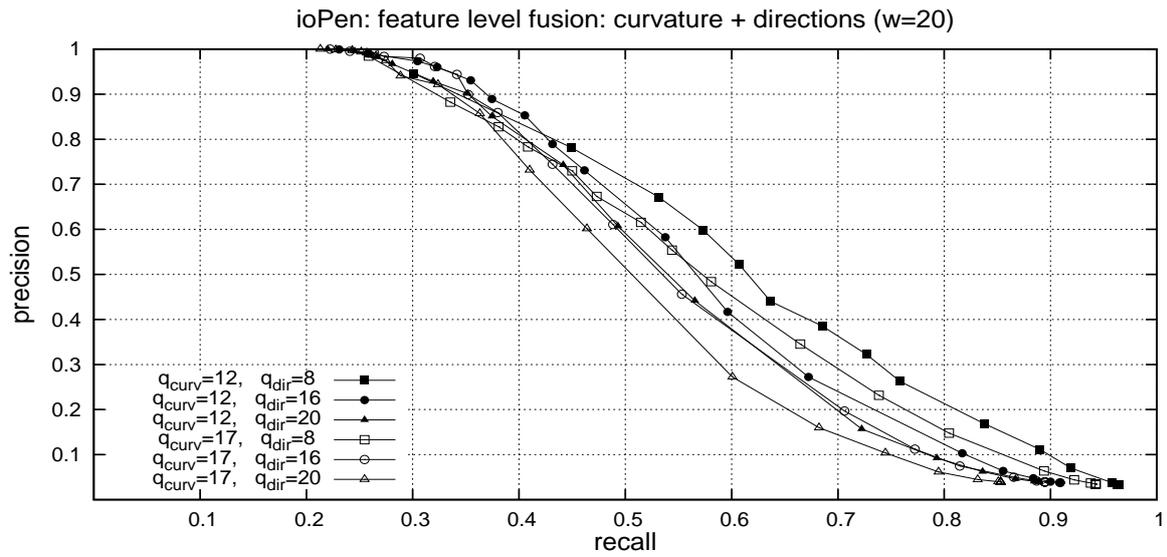


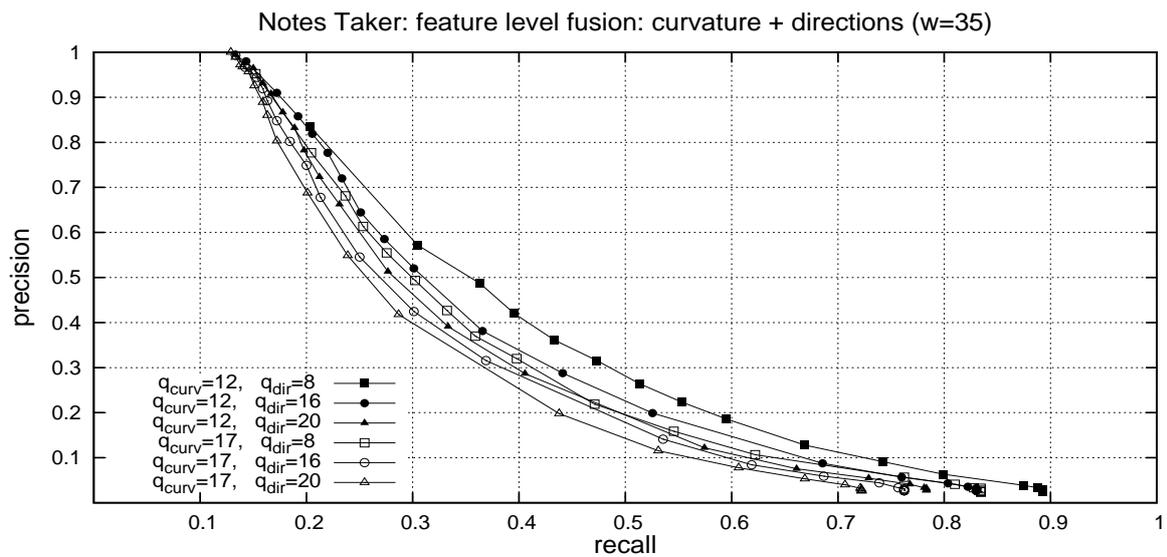
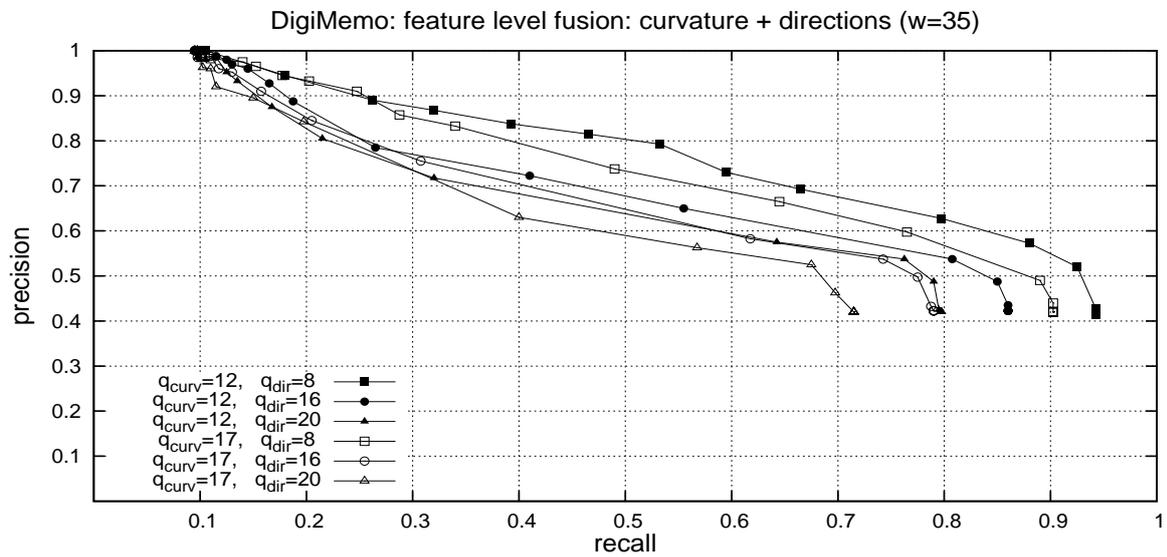
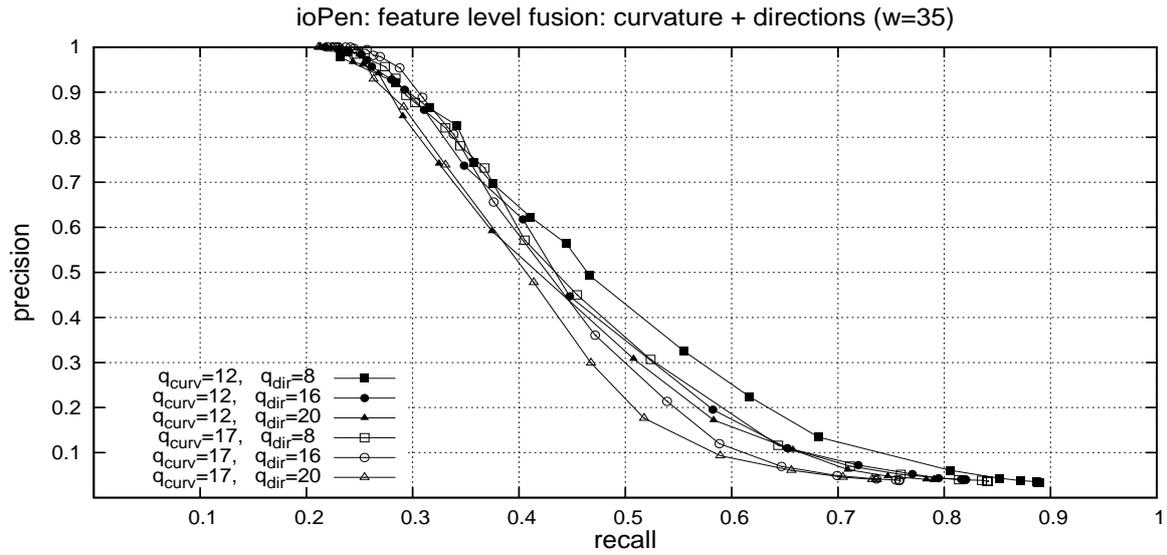
E.3 Multialgorithmische Fusion

E.3.1 Fusion auf Merkmalsebene

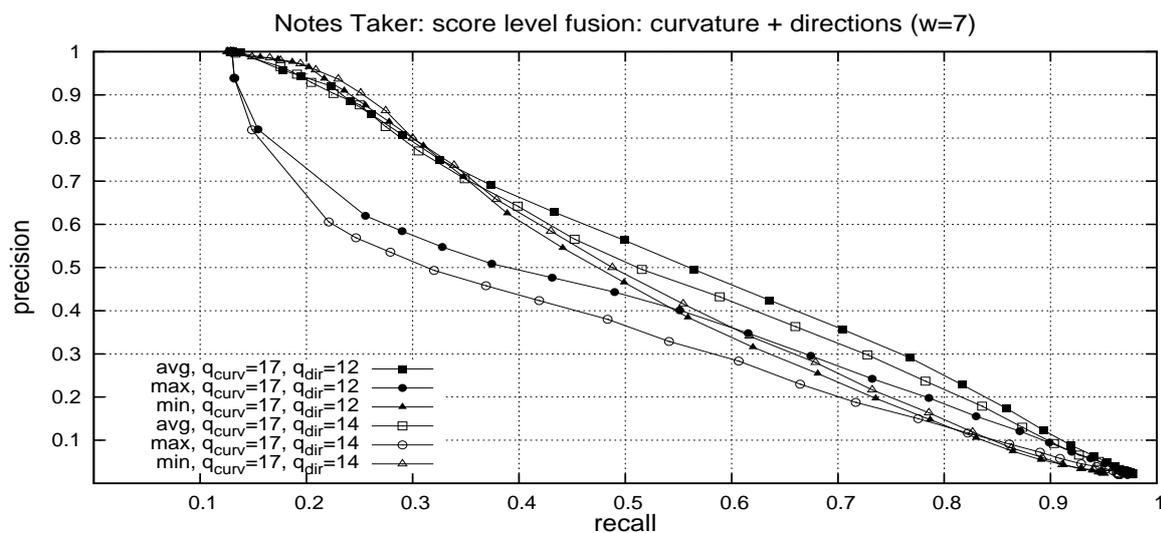
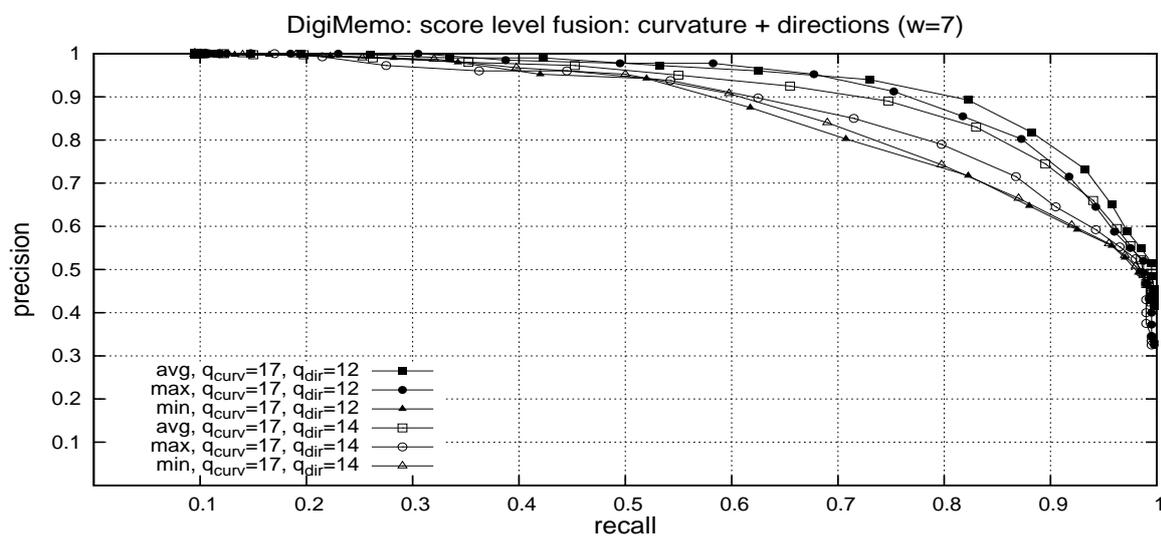
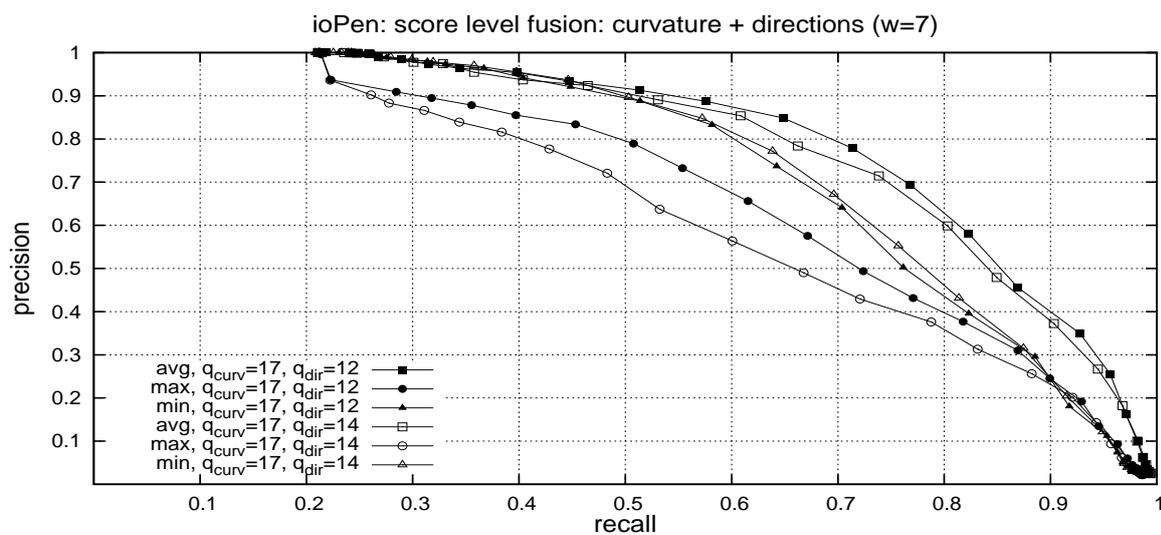


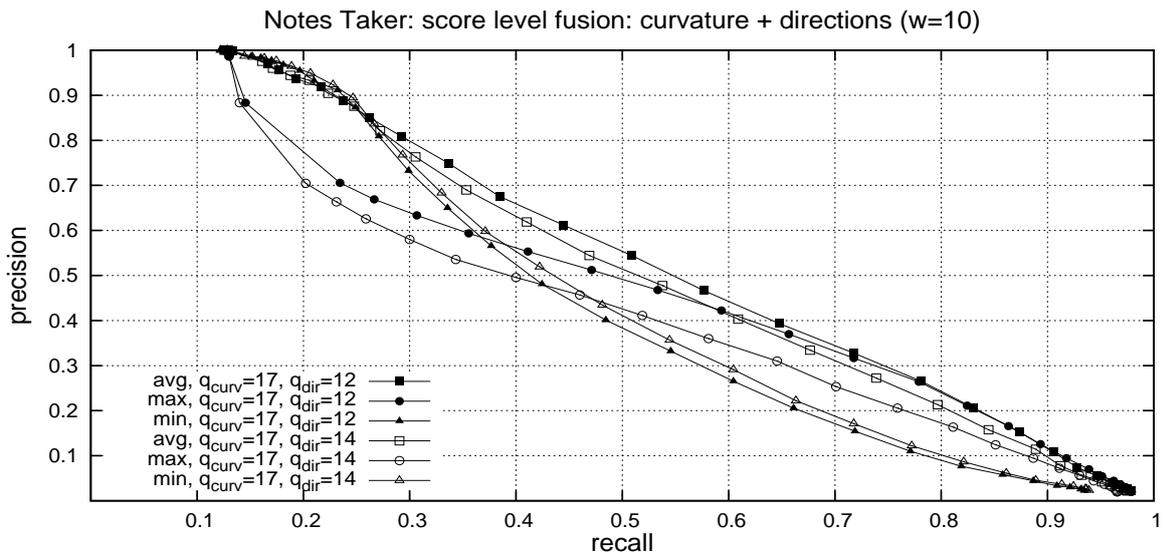
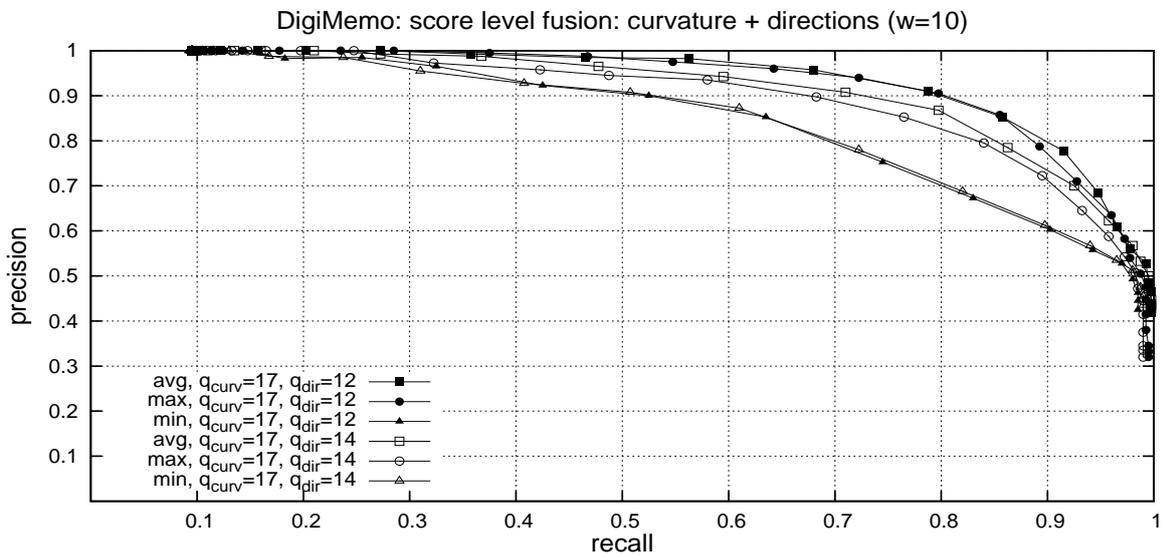
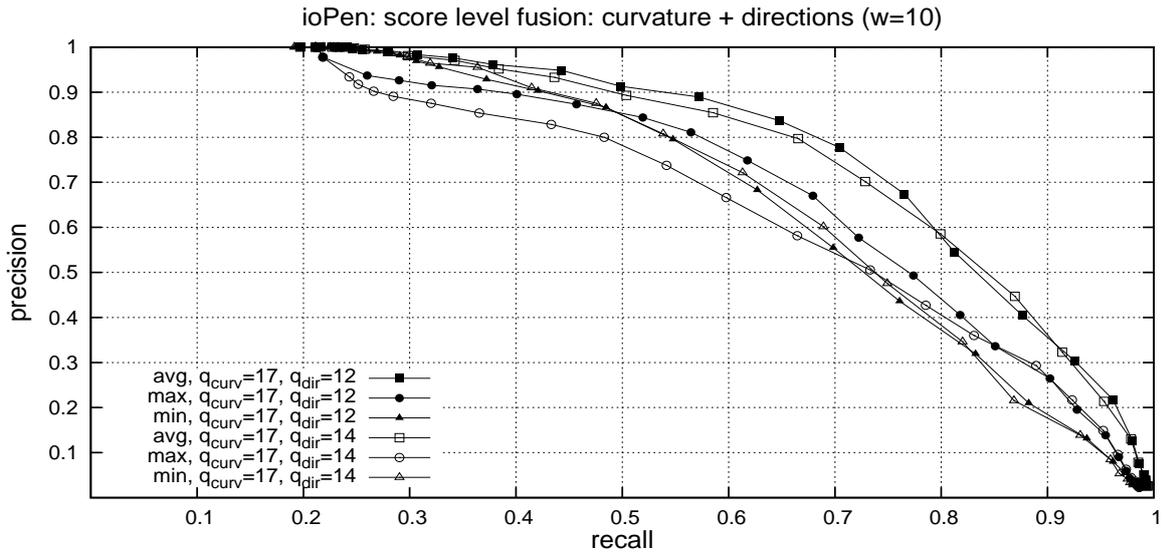


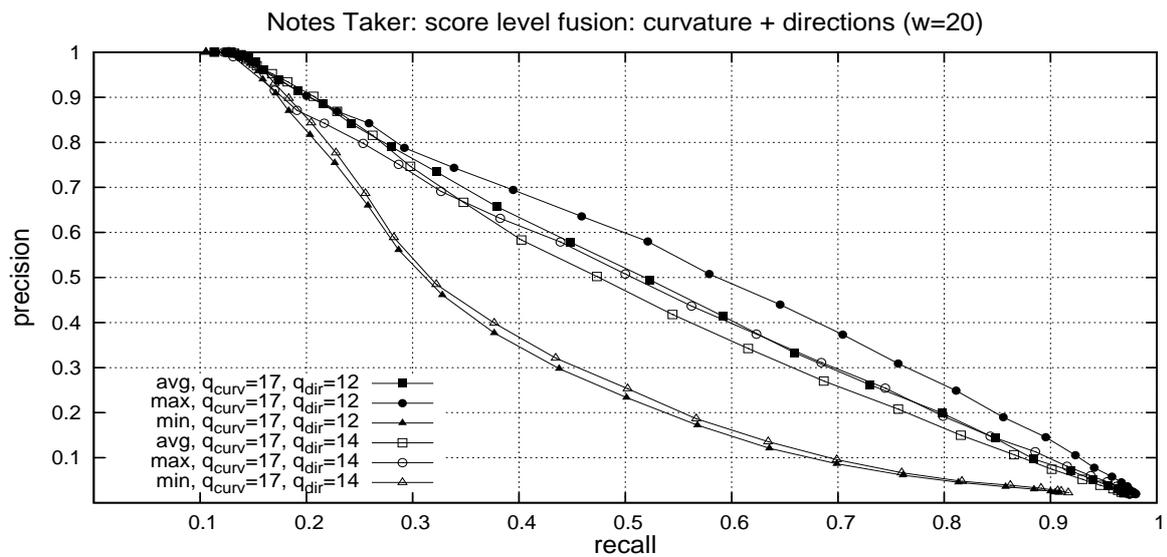
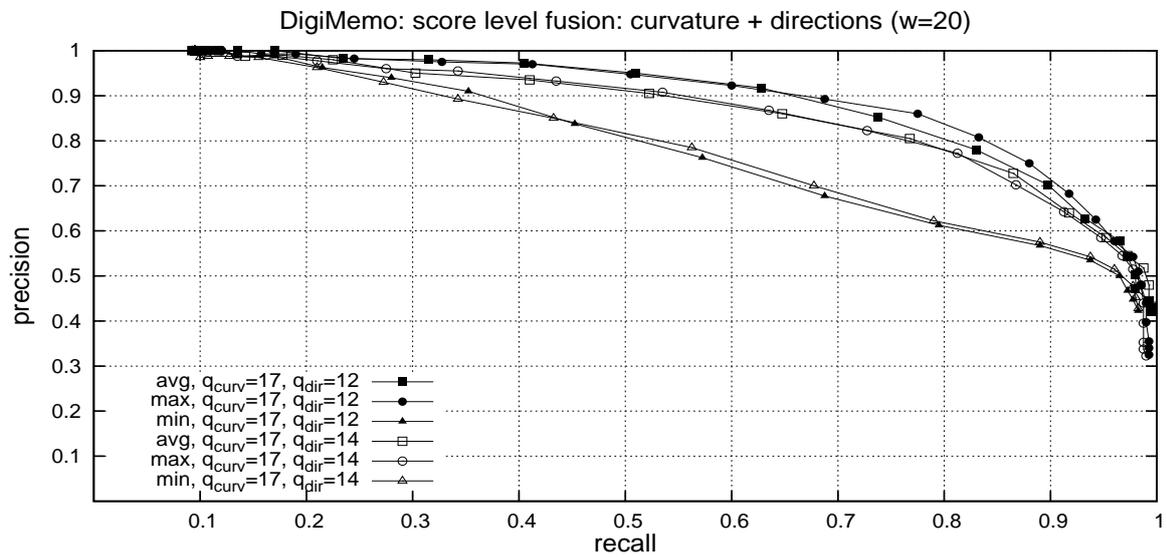
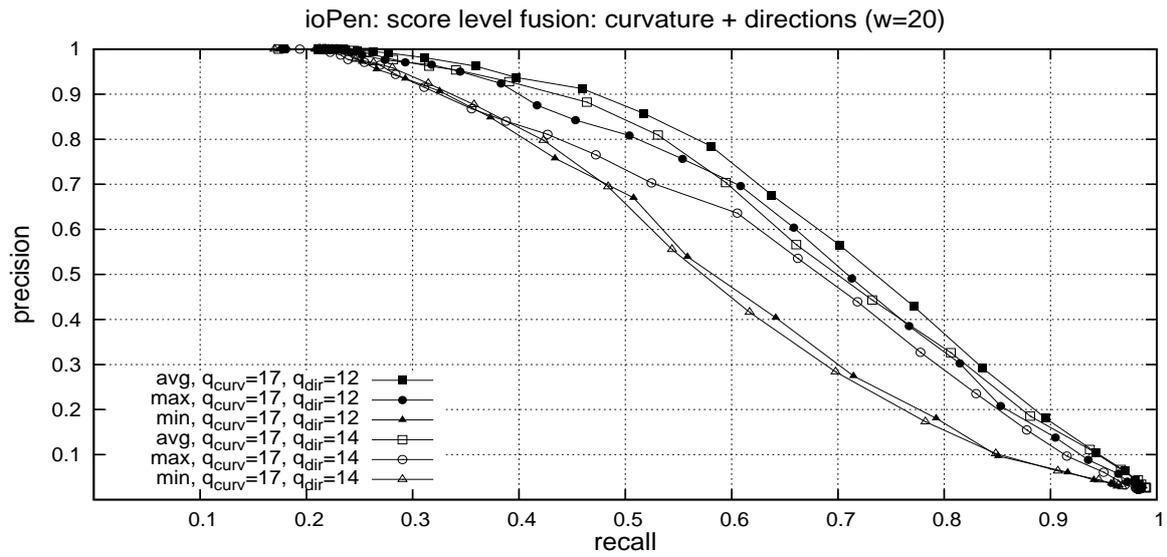


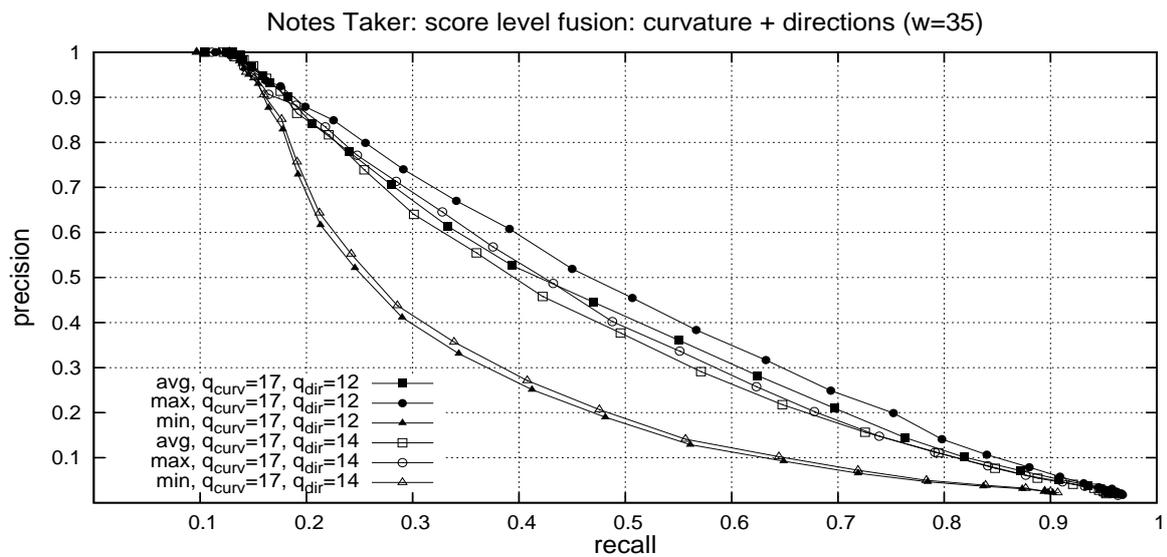
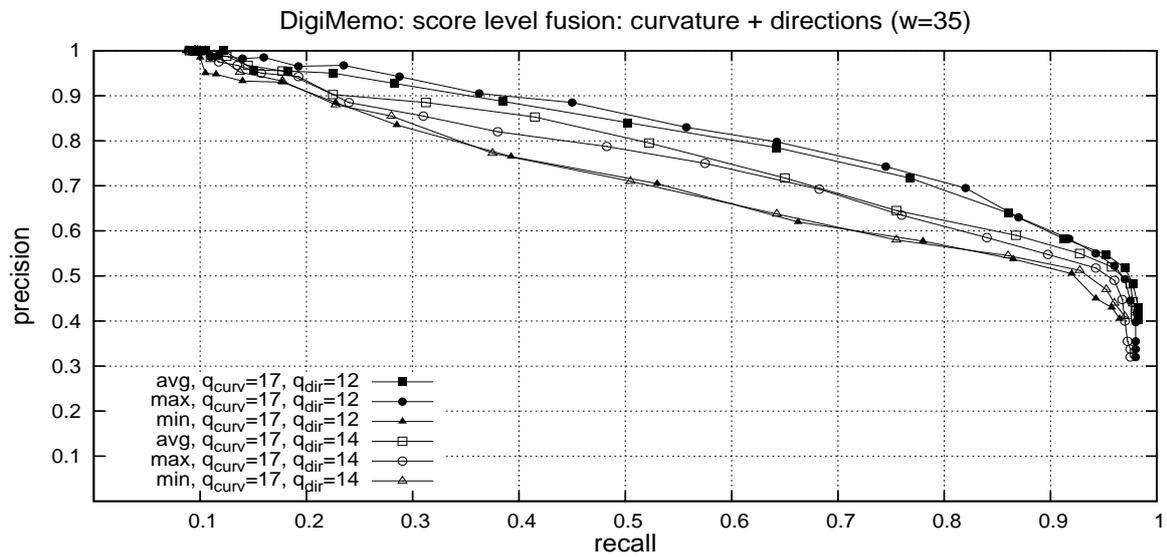
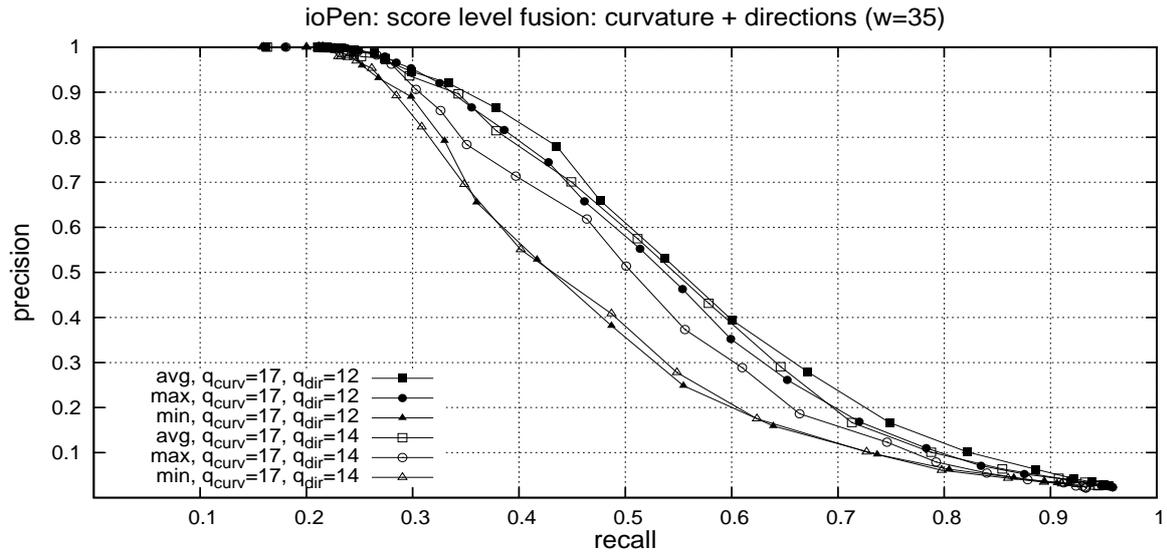


E.3.2 Fusion auf Vergleichsebene



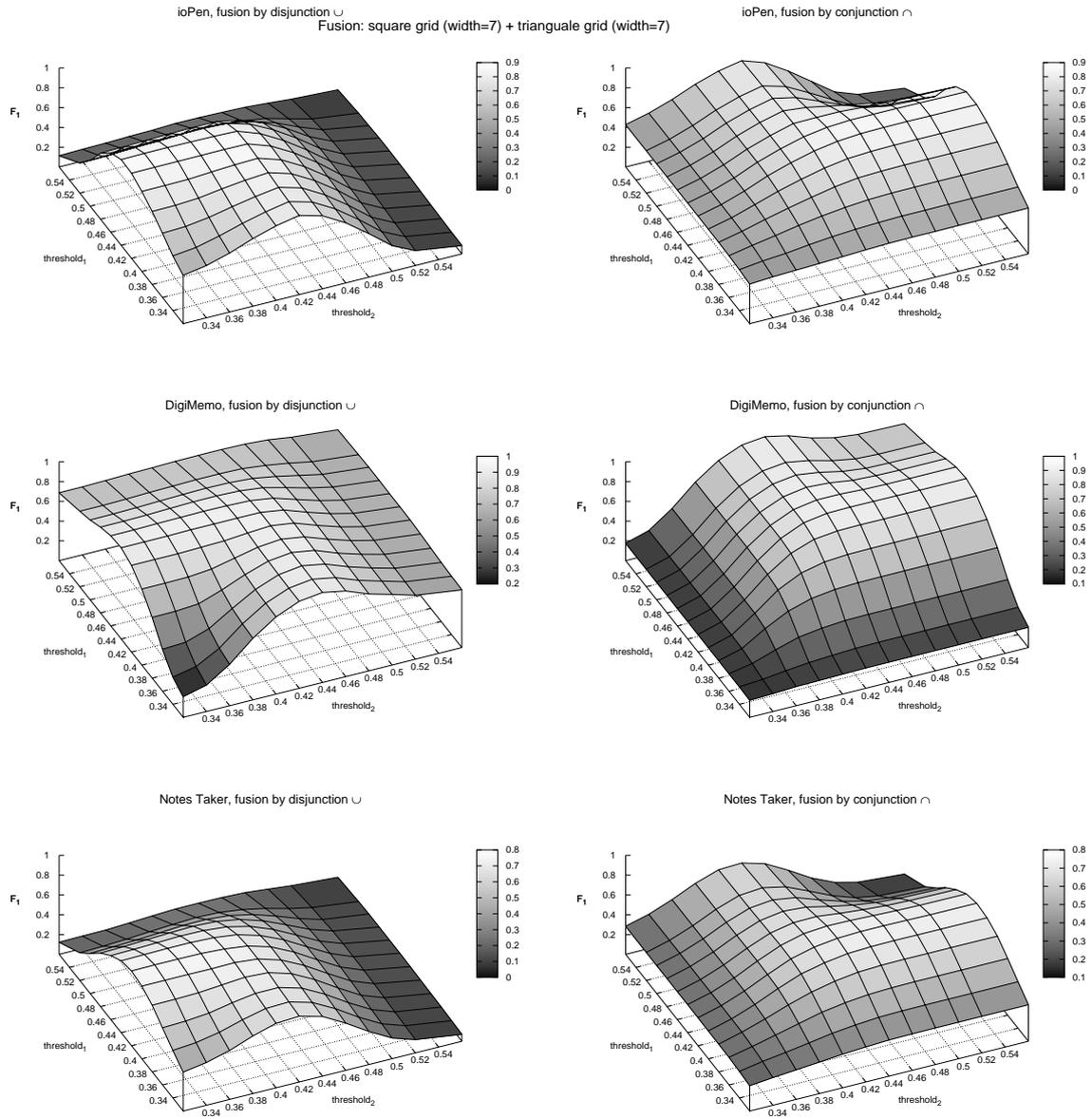






E.3.3 Fusion auf Entscheidungsebene

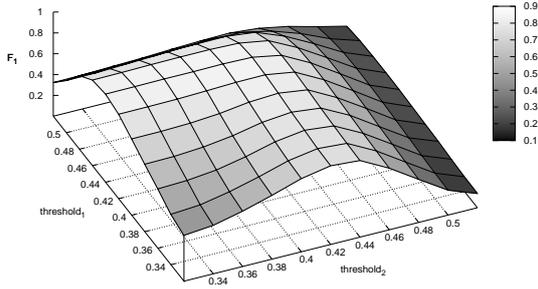
Quadratische Gitter + Dreiecksgitter



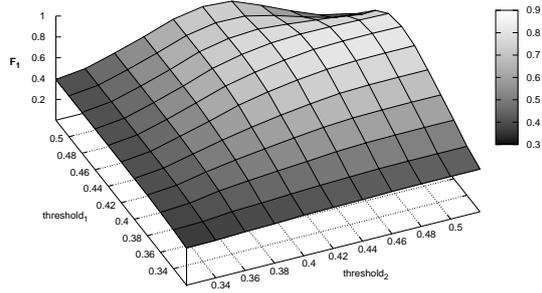
E.3 Multialgorithmische Fusion

Fusion: square grid (width=10) + triangulare grid (width=10)

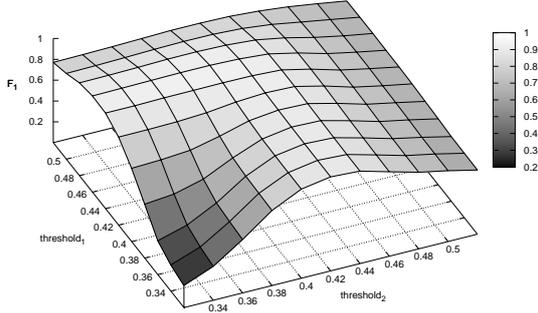
ioPen, fusion by disjunction \cup



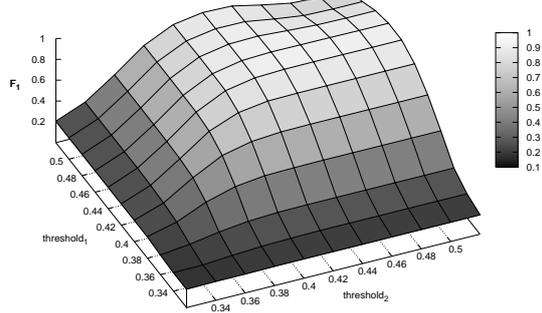
ioPen, fusion by conjunction \cap



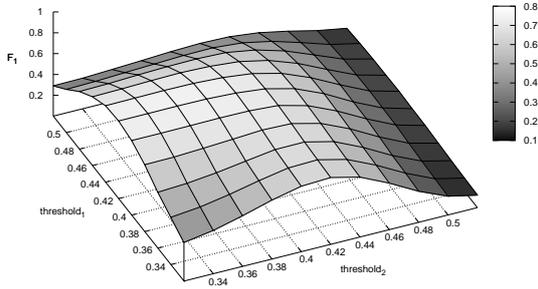
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



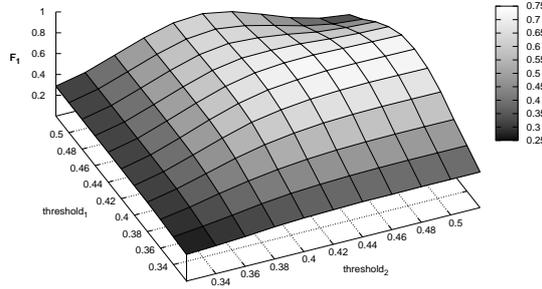
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



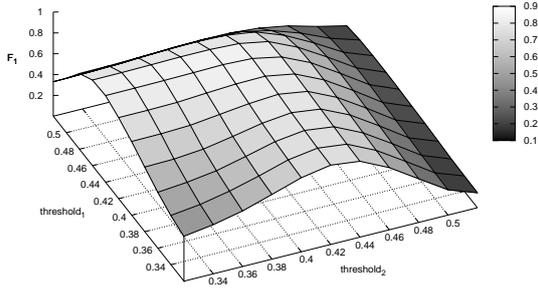
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



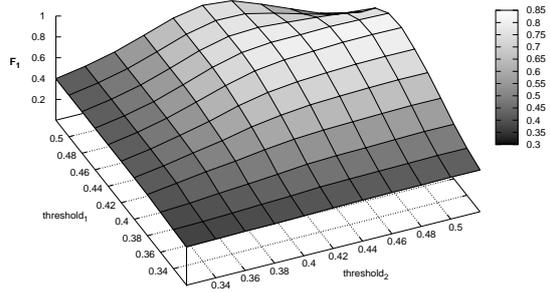
E Resultate – grafisch

Fusion: square grid (width=12) + triangulare grid (width=12)

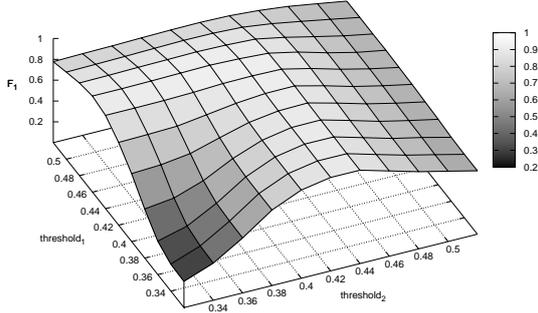
ioPen, fusion by disjunction \cup



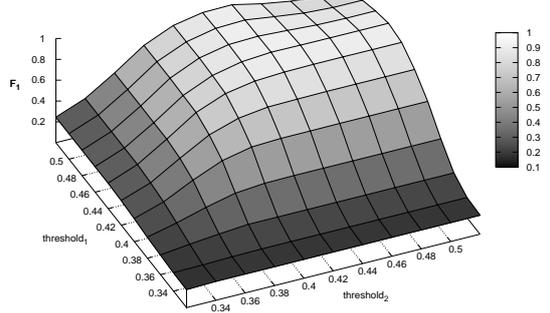
ioPen, fusion by conjunction \cap



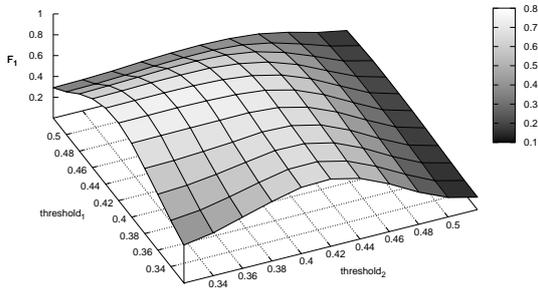
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



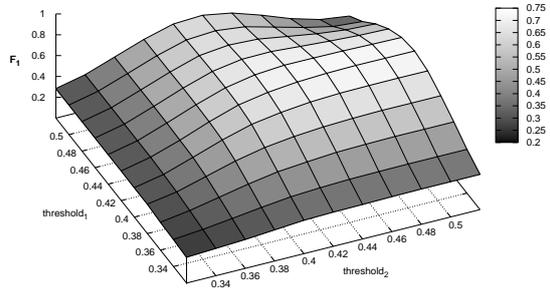
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



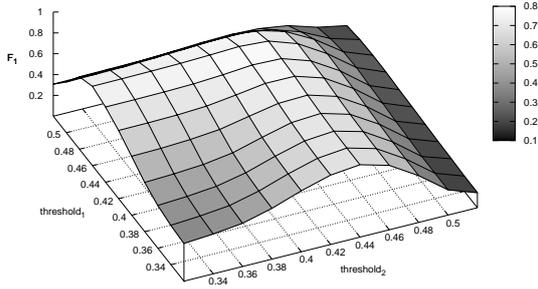
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



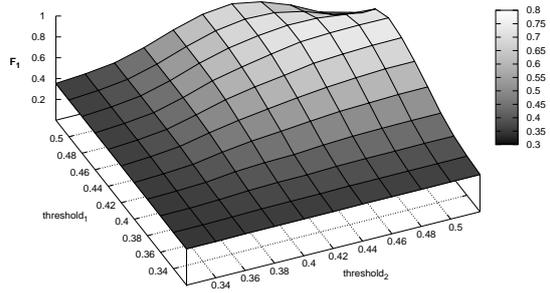
E.3 Multialgorithmische Fusion

Fusion: square grid (width=20) + triangule grid (width=20)

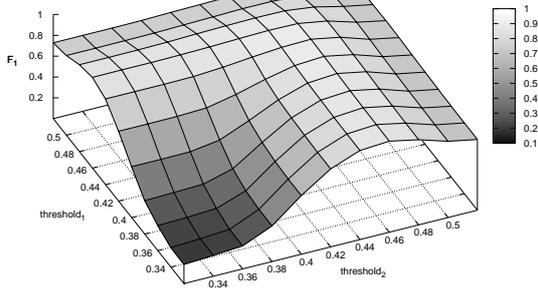
ioPen, fusion by disjunction \cup



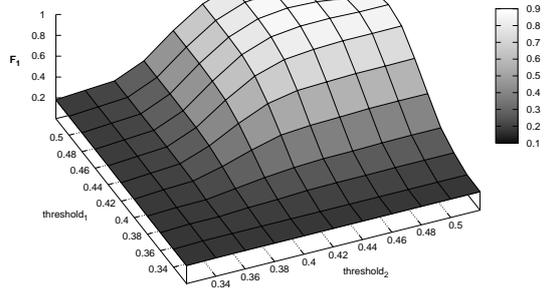
ioPen, fusion by conjunction \cap



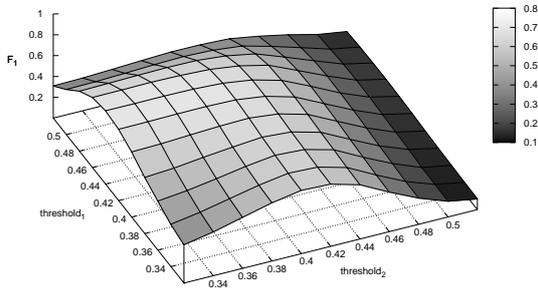
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



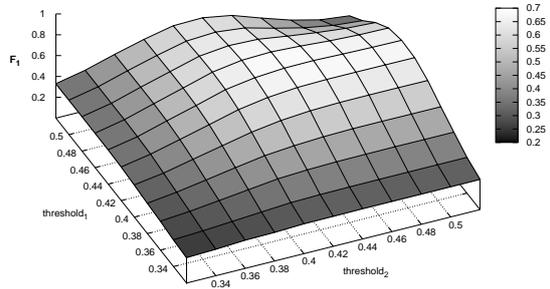
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



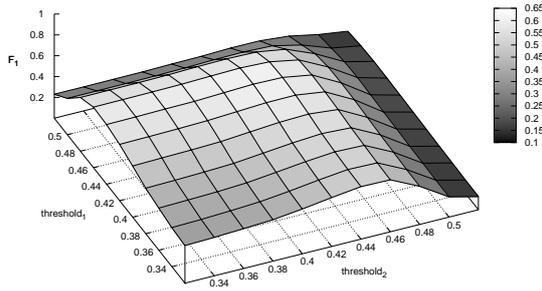
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



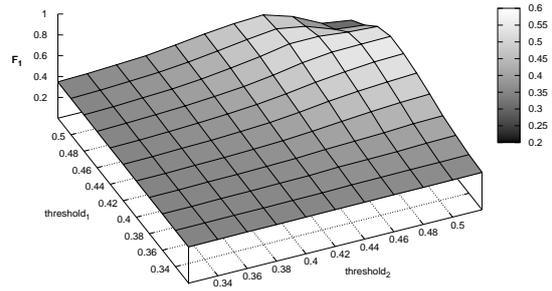
E Resultate – grafisch

Fusion: square grid (width=35) + triangule grid (width=10)

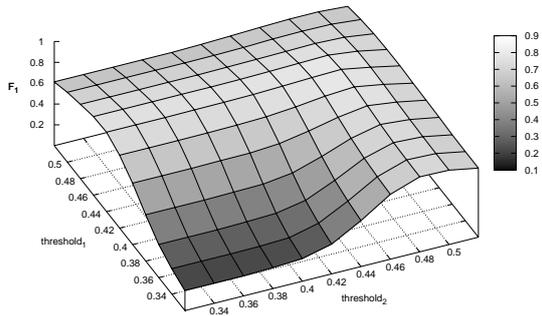
ioPen, fusion by disjunction \cup



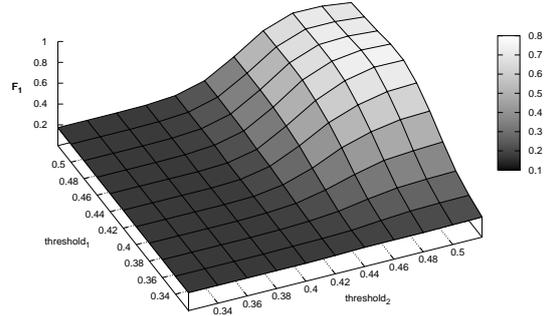
ioPen, fusion by conjunction \cap



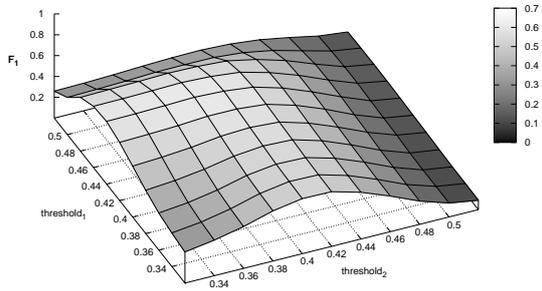
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



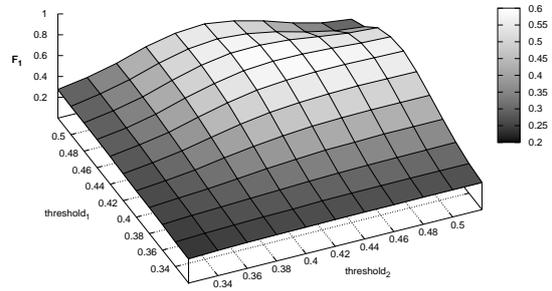
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



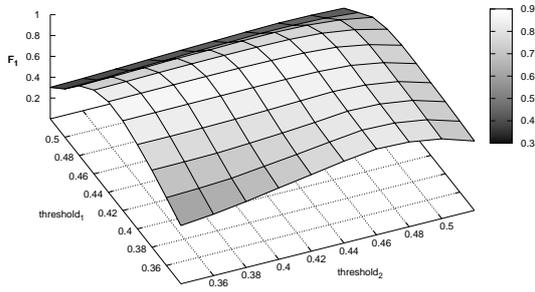
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



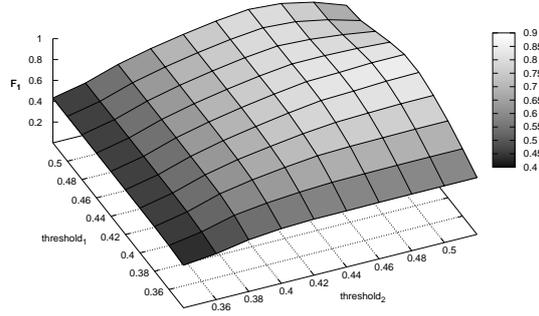
Quadratische Gitter + lokale Schriftrichtung

Fusion: square grid (width=7) + local direction (with=7, steps=12)

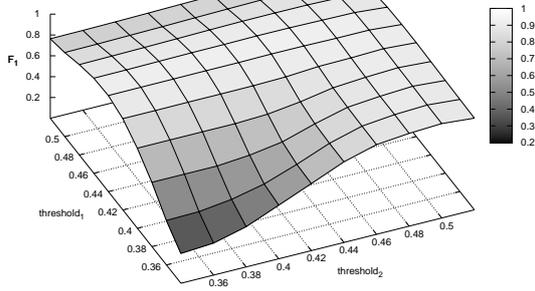
ioPen, fusion by disjunction \cup



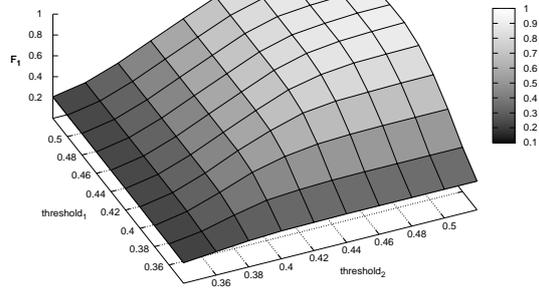
ioPen, fusion by conjunction \cap



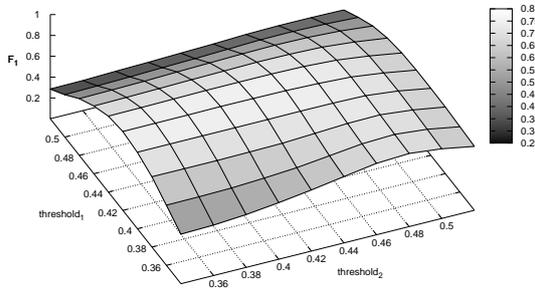
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



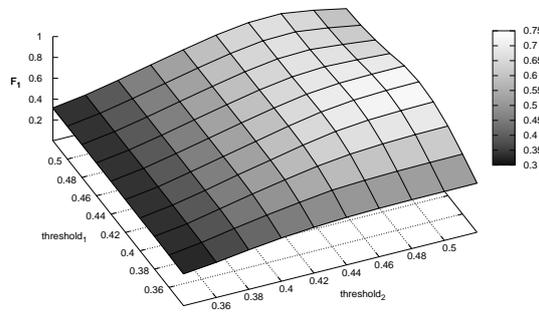
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



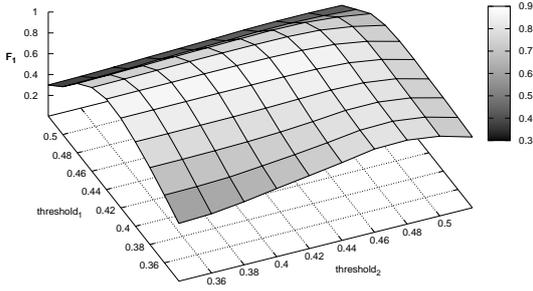
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



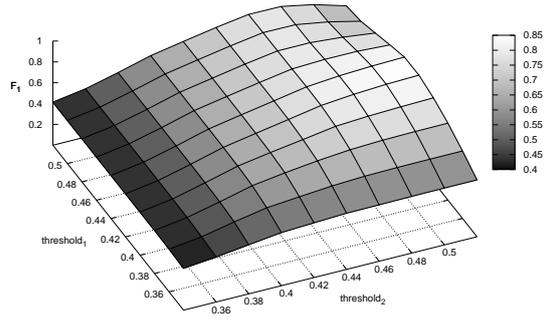
E Resultate – grafisch

Fusion: square grid (width=7) + local direction (with=10, steps=12)

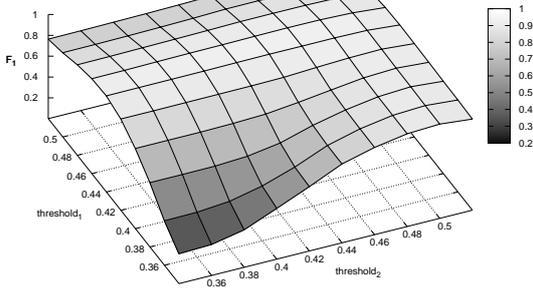
ioPen, fusion by disjunction \cup



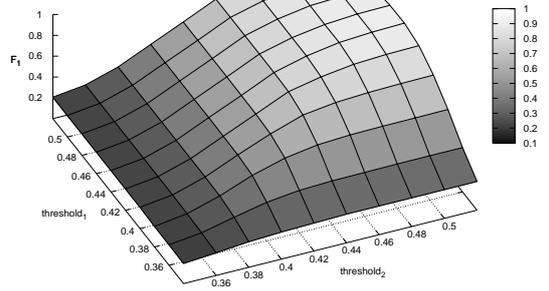
ioPen, fusion by conjunction \cap



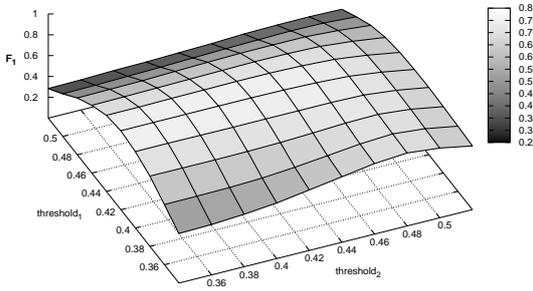
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



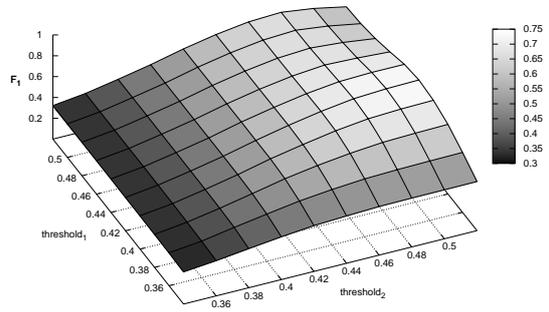
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



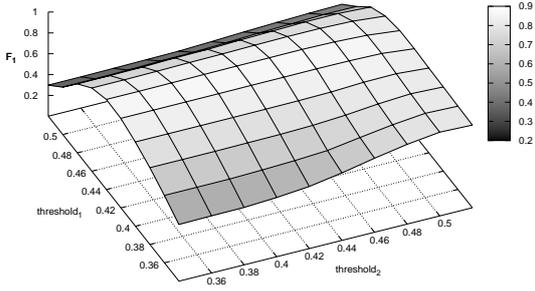
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



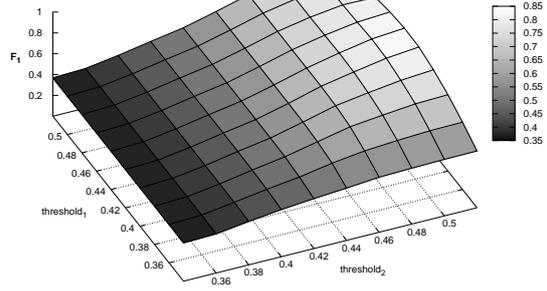
E.3 Multialgorithmische Fusion

Fusion: square grid (width=7) + local direction (with=10, steps=14)

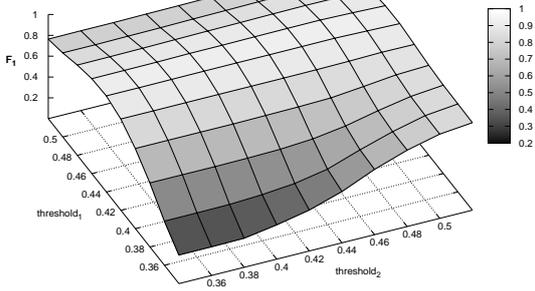
ioPen, fusion by disjunction \cup



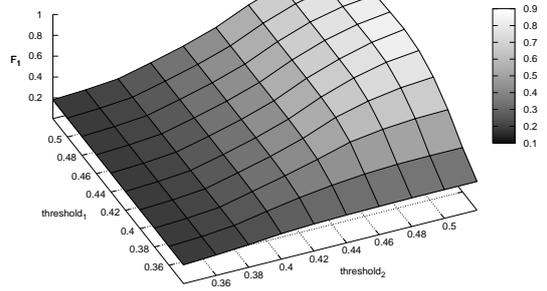
ioPen, fusion by conjunction \cap



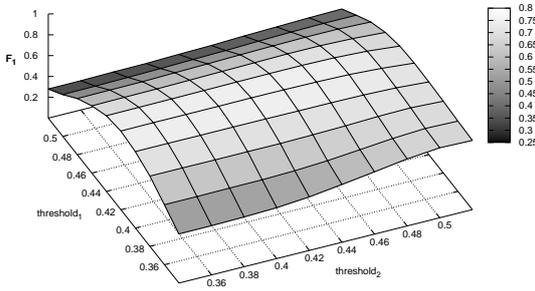
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



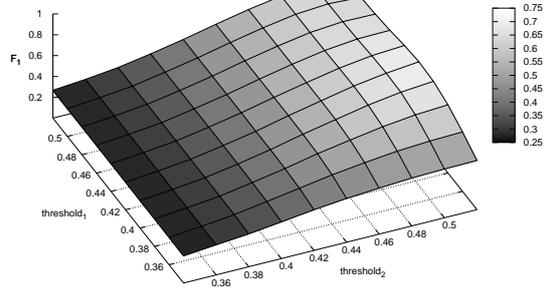
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



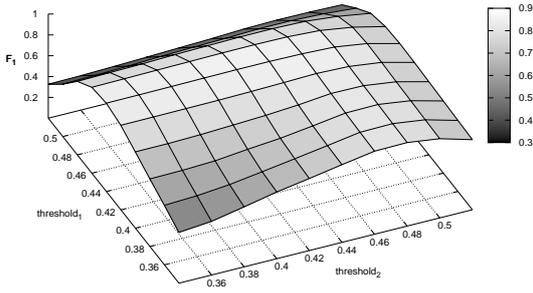
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



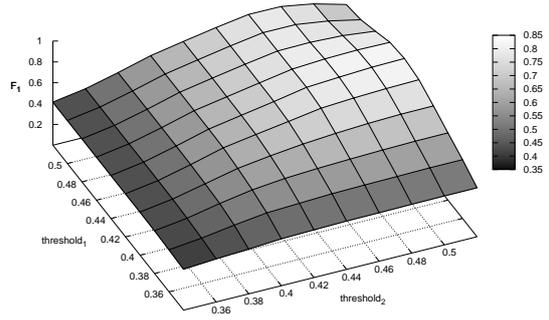
E Resultate – grafisch

Fusion: square grid (width=10) + local direction (with=10, steps=12)

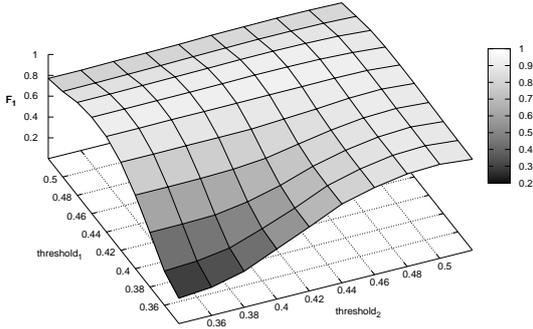
ioPen, fusion by disjunction \cup



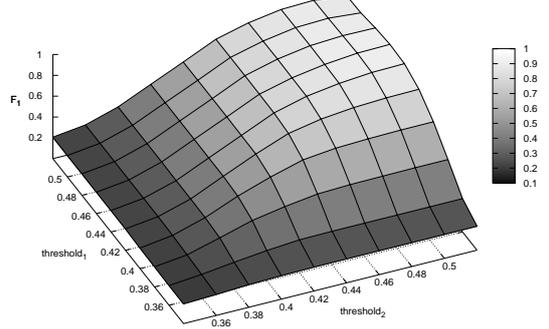
ioPen, fusion by conjunction \cap



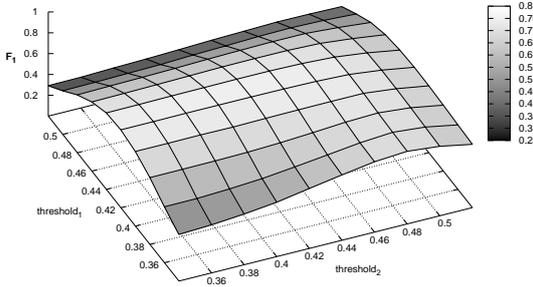
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



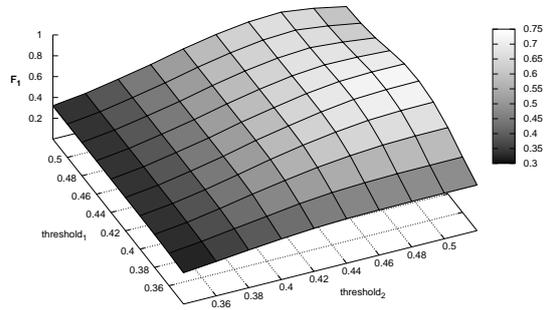
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



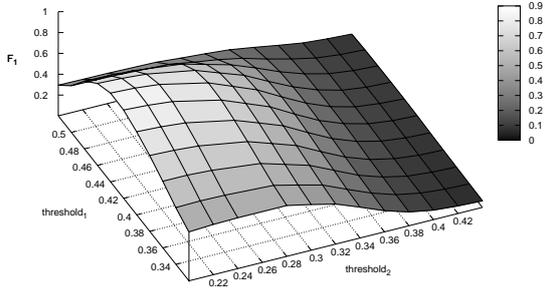
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



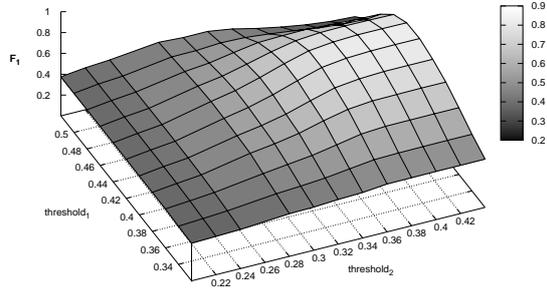
Quadratische Gitter + lokale Schriftkrümmung

Fusion: square grid (width=7) + local curvature (with=10, steps=10)

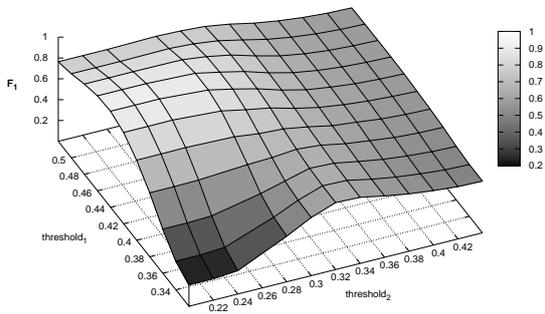
ioPen, fusion by disjunction \cup



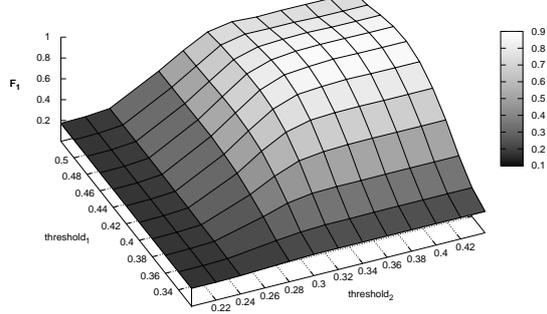
ioPen, fusion by conjunction \cap



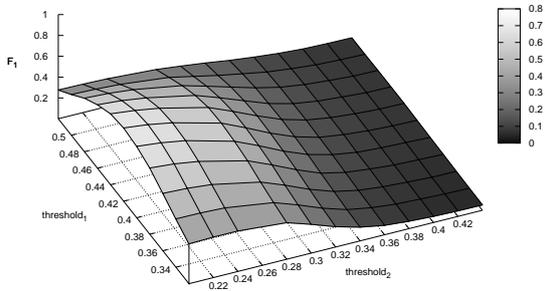
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



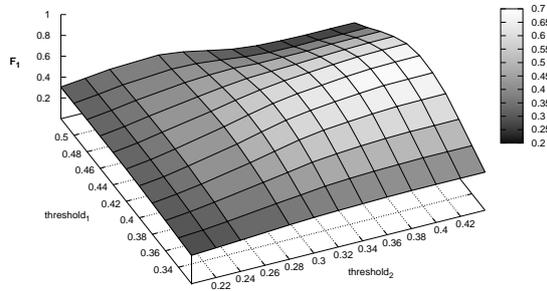
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



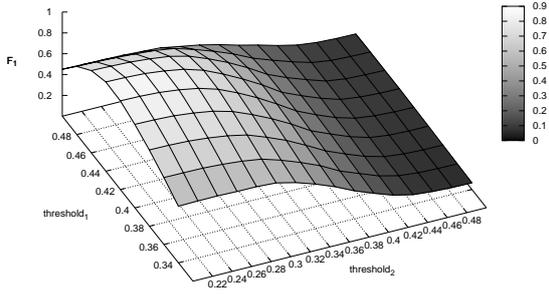
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



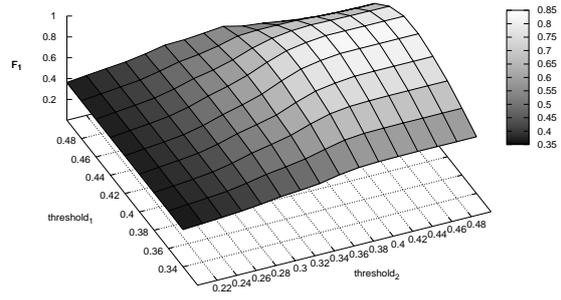
E Resultate – grafisch

Fusion: square grid (width=7) + local curvature (with=10, steps=12)

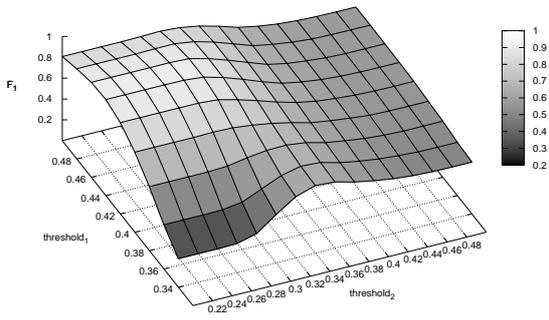
ioPen, fusion by disjunction \cup



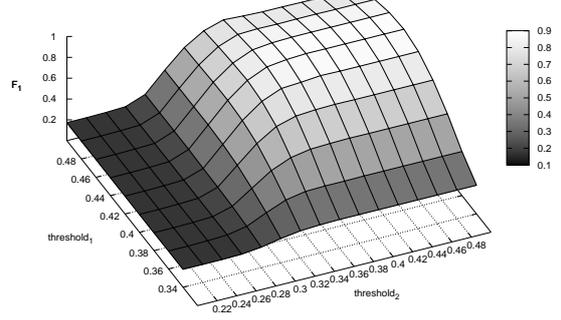
ioPen, fusion by conjunction \cap



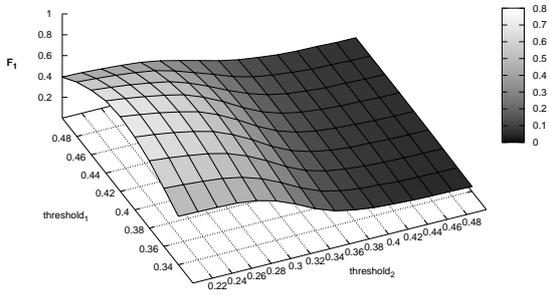
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



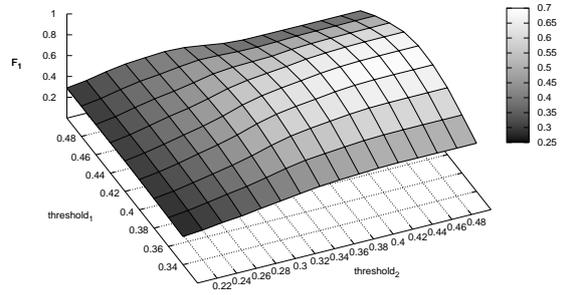
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



Notes Taker, fusion by disjunction \cup



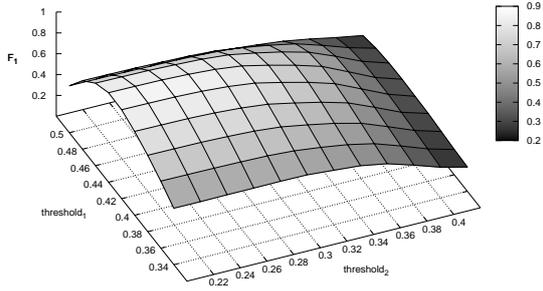
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



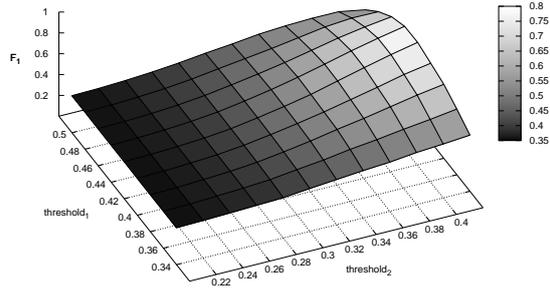
E.3 Multialgorithmische Fusion

Fusion: square grid (width=7) + local curvature (with=10, steps=14)

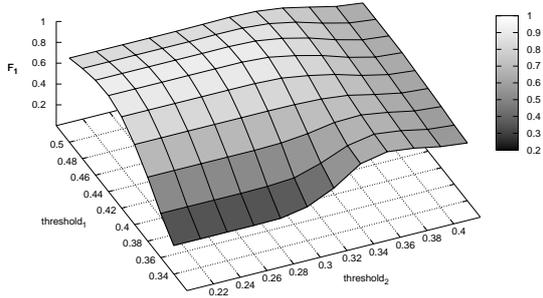
ioPen, fusion by disjunction \cup



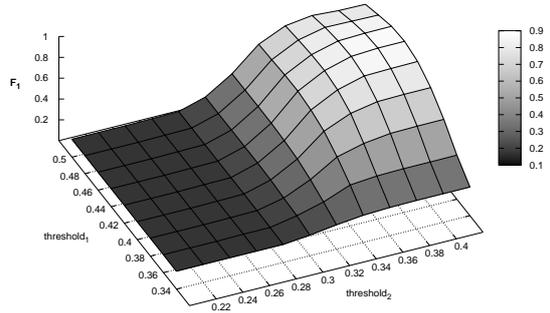
ioPen, fusion by conjunction \cap



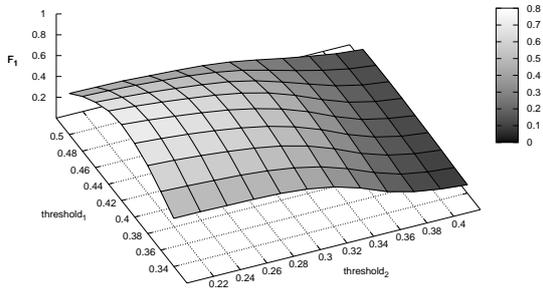
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



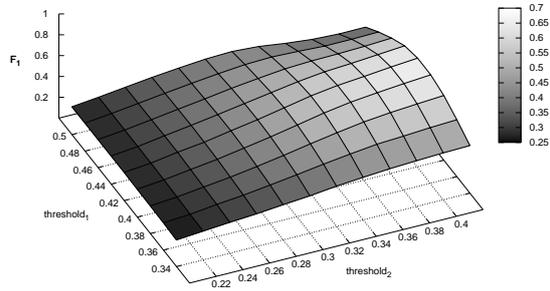
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



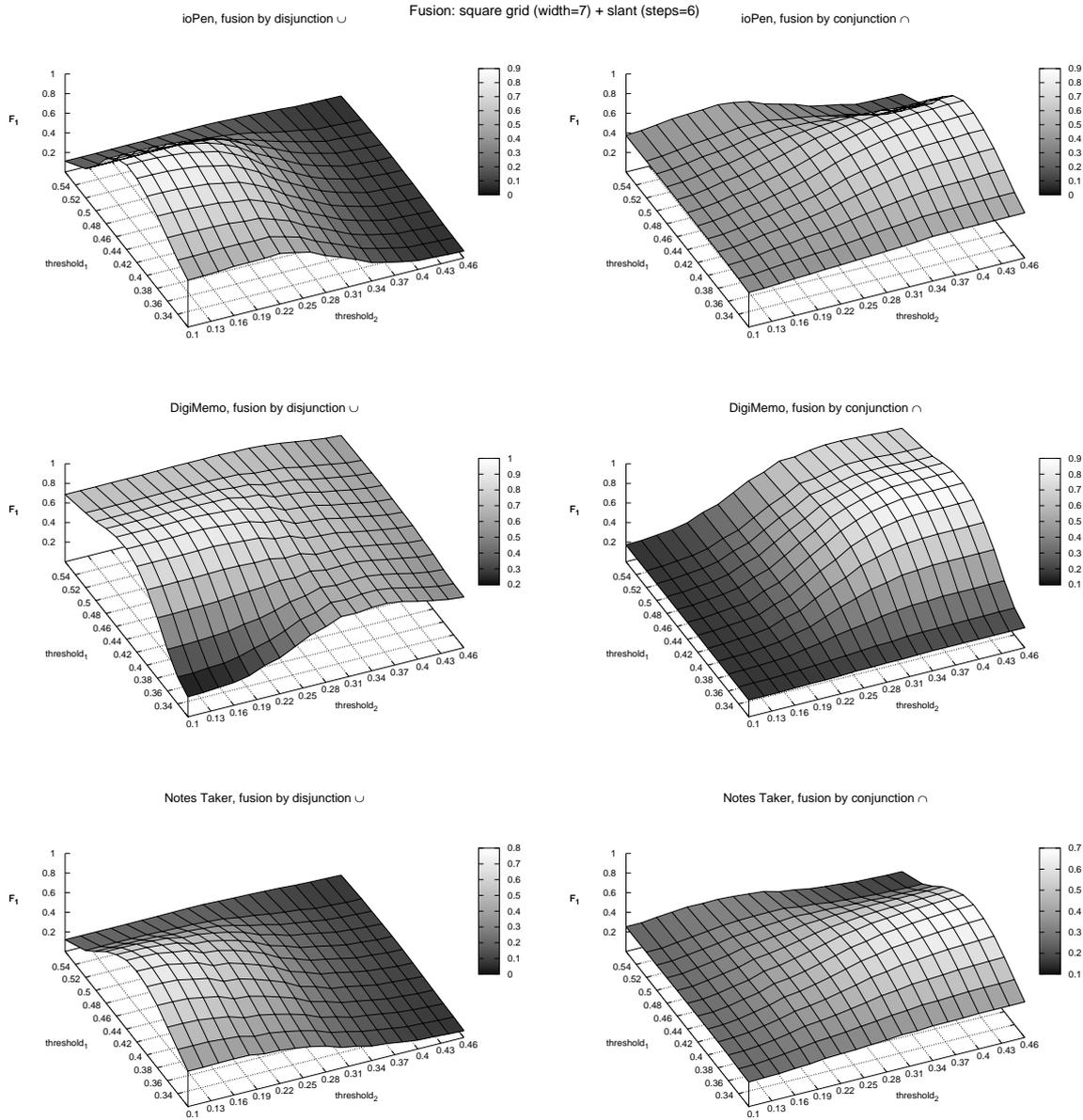
Notes Taker, fusion by disjunction \cup



Notes Taker, fusion by conjunction \cap



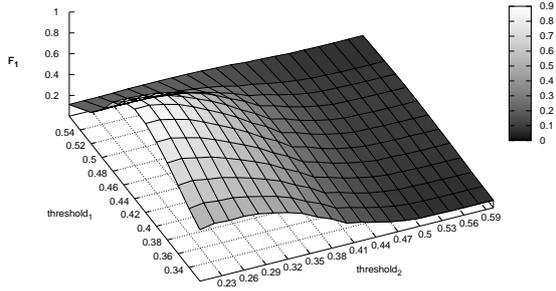
Quadratische Gitter + lokale Schriftneigung



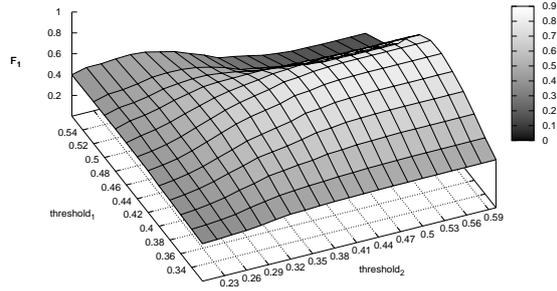
E.3 Multialgorithmische Fusion

Fusion: square grid (width=7) + slant (steps=8)

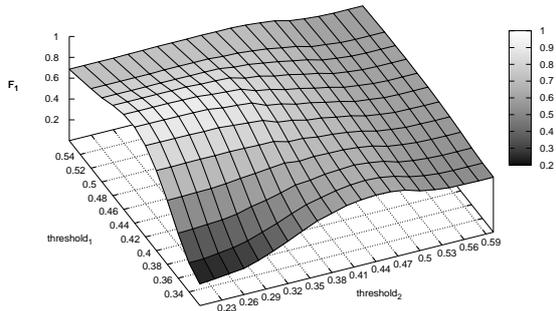
ioPen, fusion by disjunction \cup



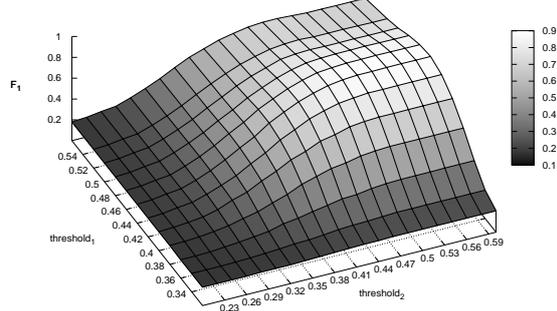
ioPen, fusion by conjunction \cap



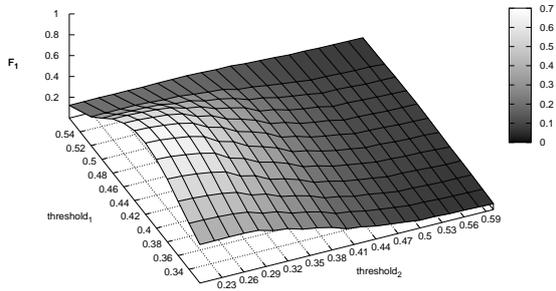
DigiMemo, fusion by disjunction \cup



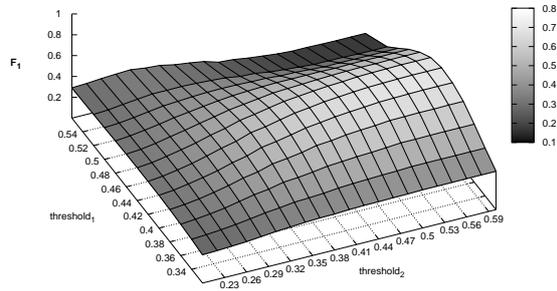
DigiMemo, fusion by conjunction \cap



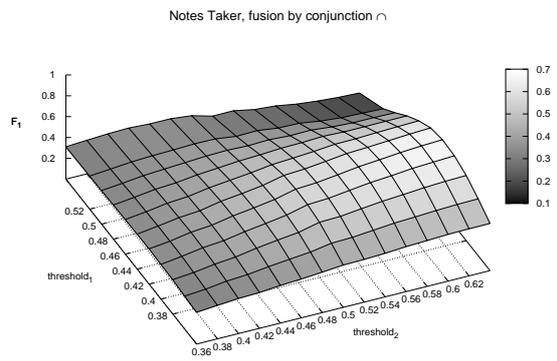
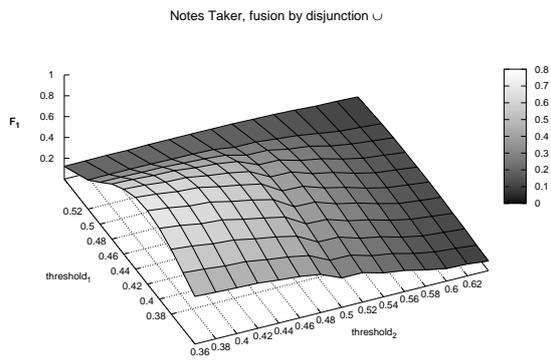
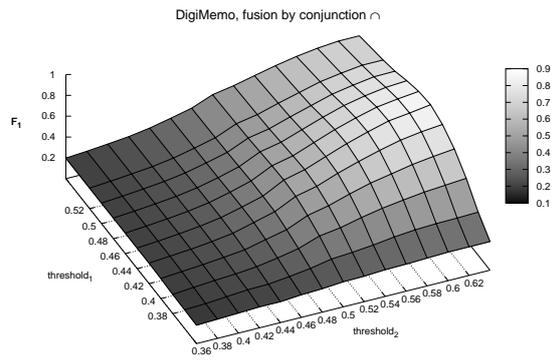
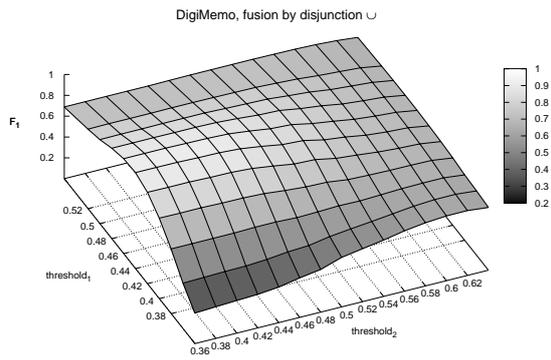
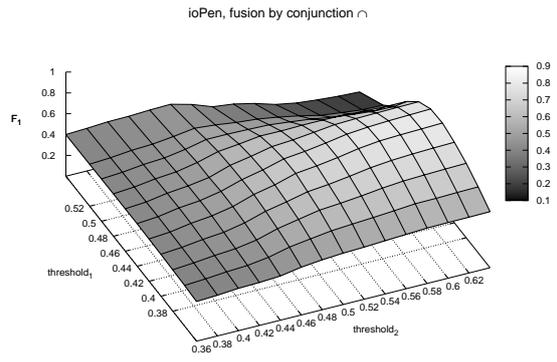
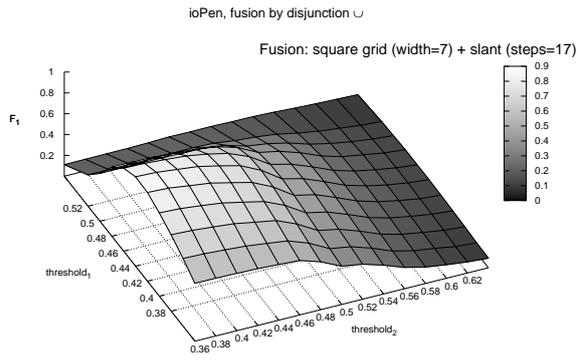
Notes Taker, fusion by disjunction \cup



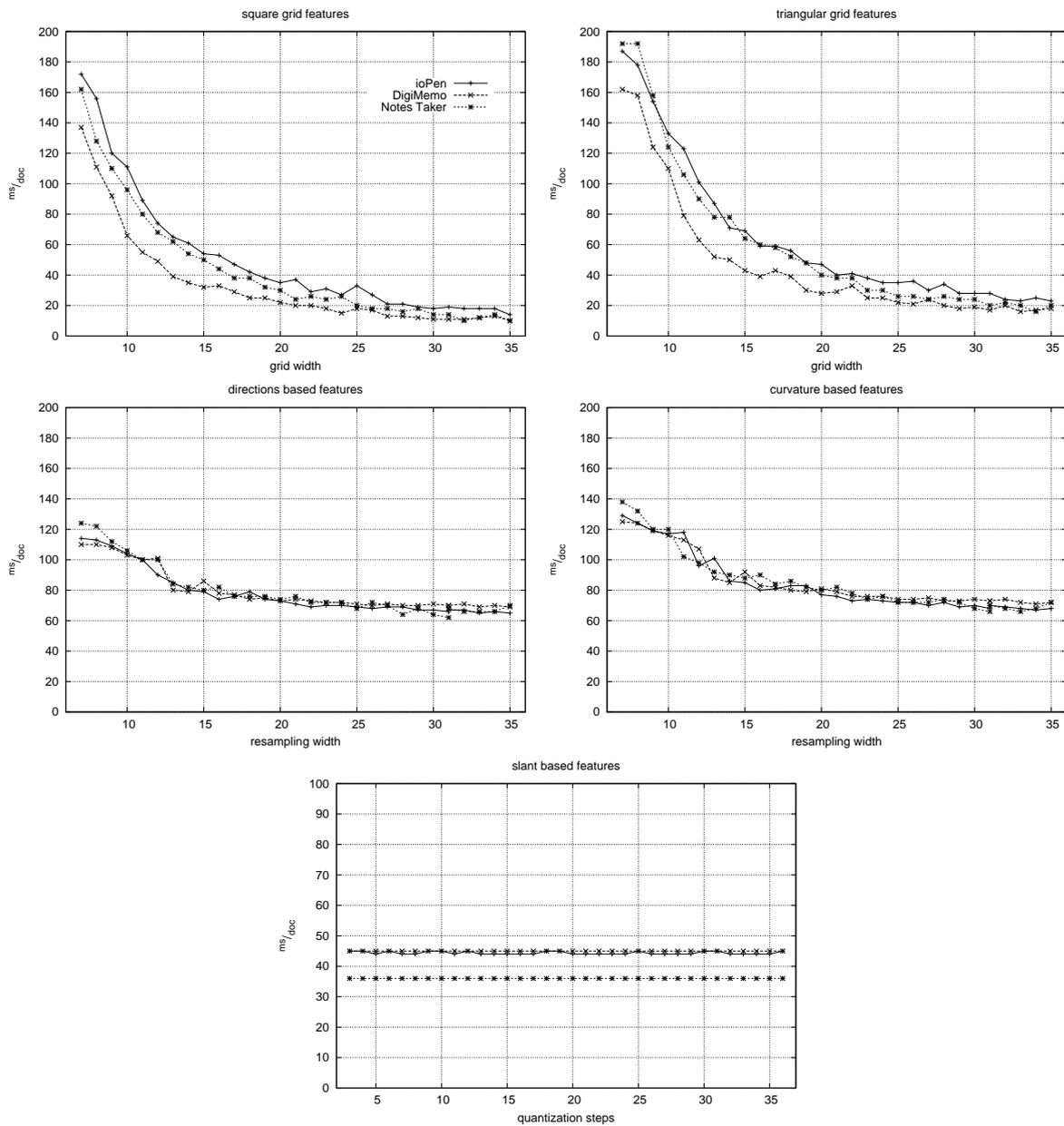
Notes Taker, fusion by conjunction \cap



E Resultate – grafisch

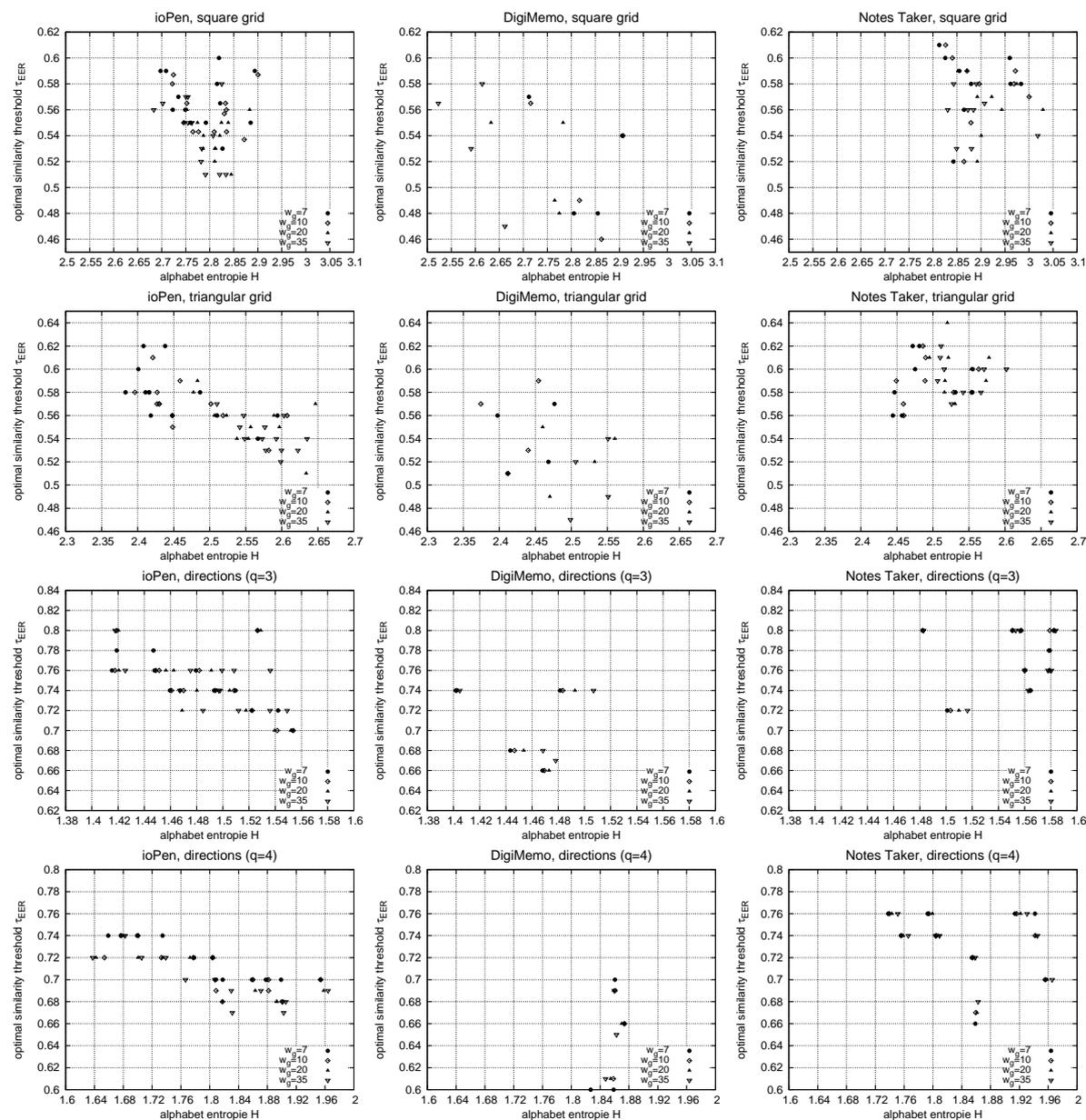


F Zeitaufwand der Merkmalsgewinnung

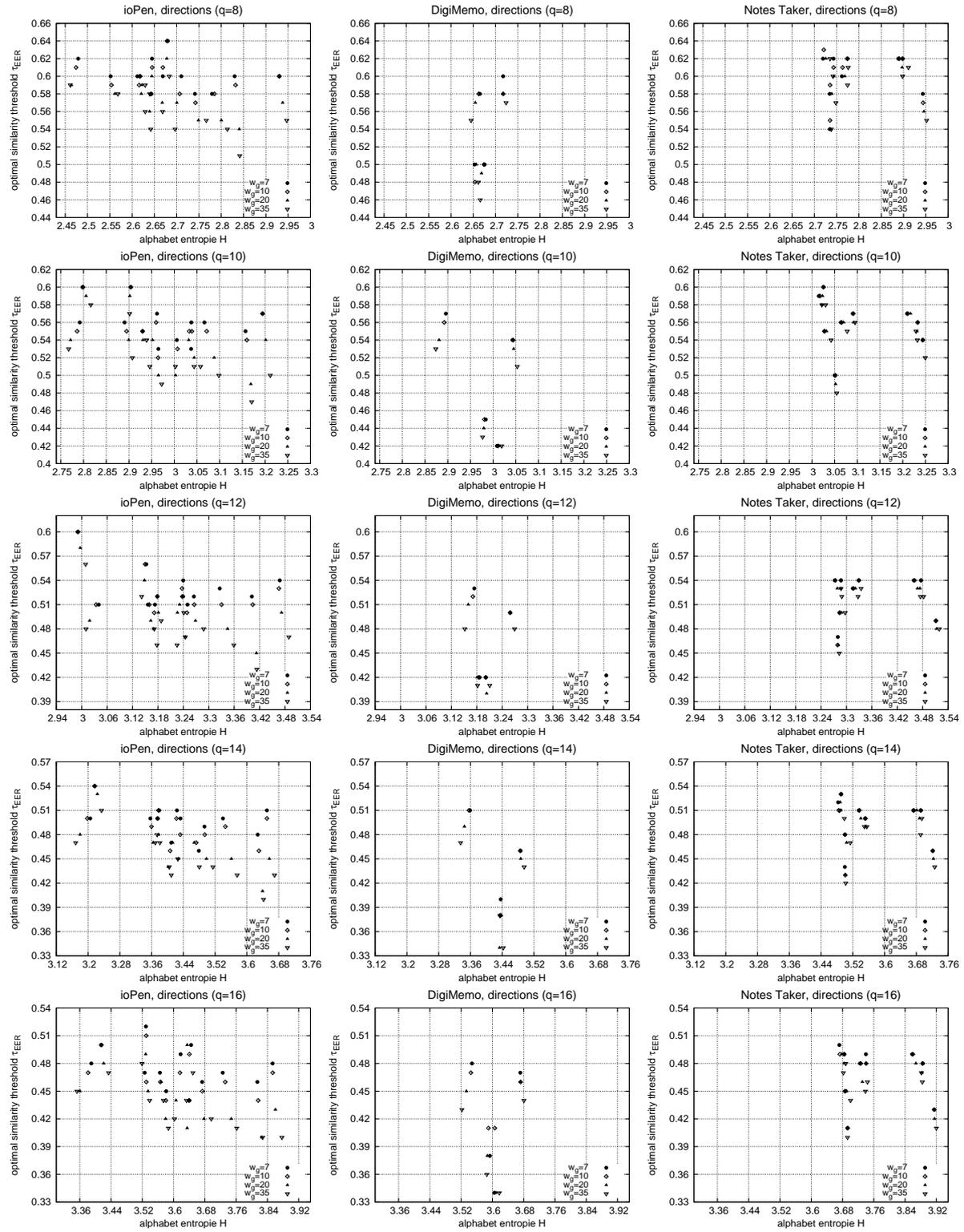


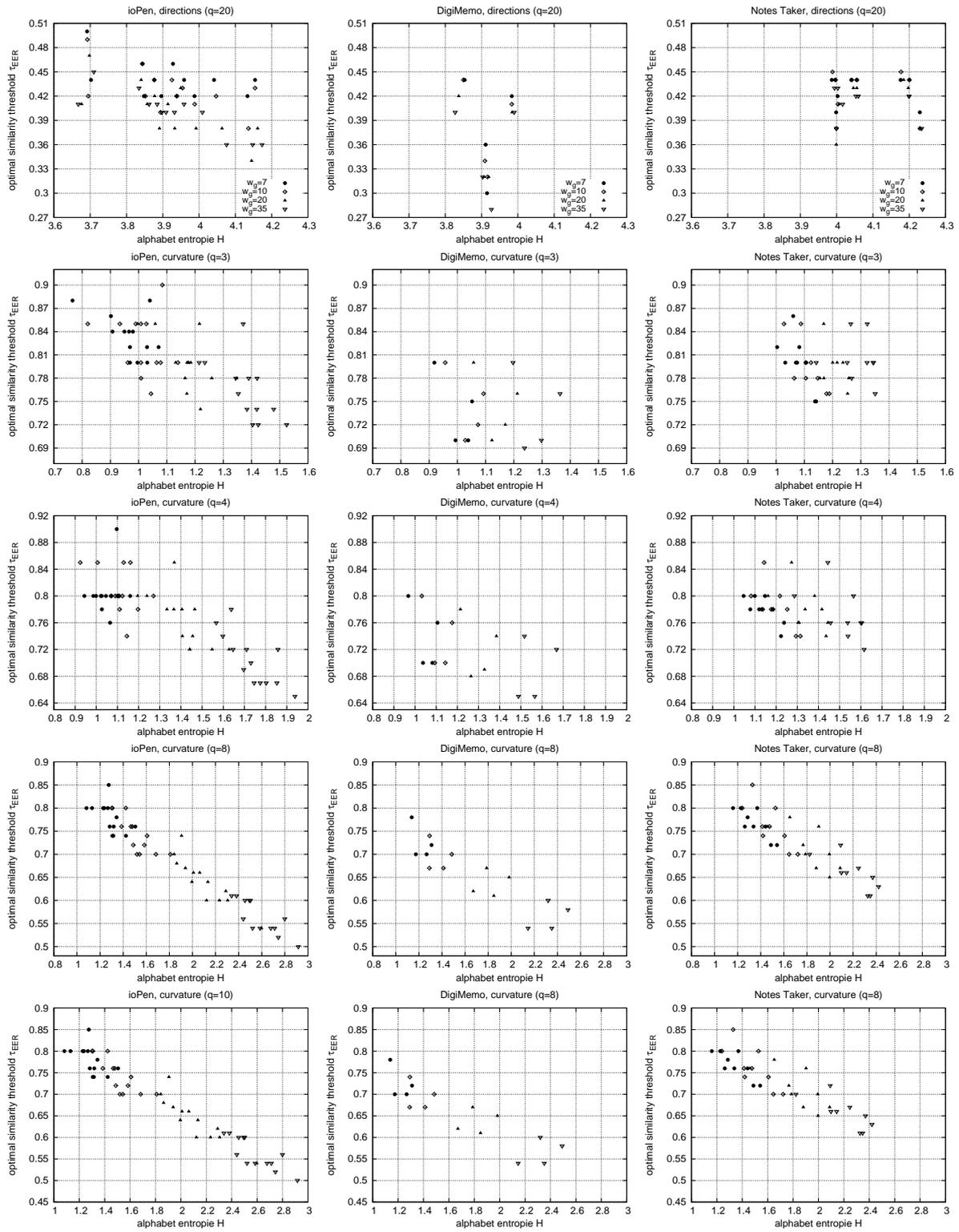
G Entropie- τ_{EER} -Diagramme

Die Diagramme in diesem Kapitel stellen für die Merkmalstypen *Quadrat-* und *Dreiecksgitter* sowie *richtungs-* und *krümmungsbasierte Merkmale* den Zusammenhang zwischen der Entropie H der Merkmalssequenzen und dem ermittelten optimalen Ähnlichkeitsschwellwert τ_{EER} dar.

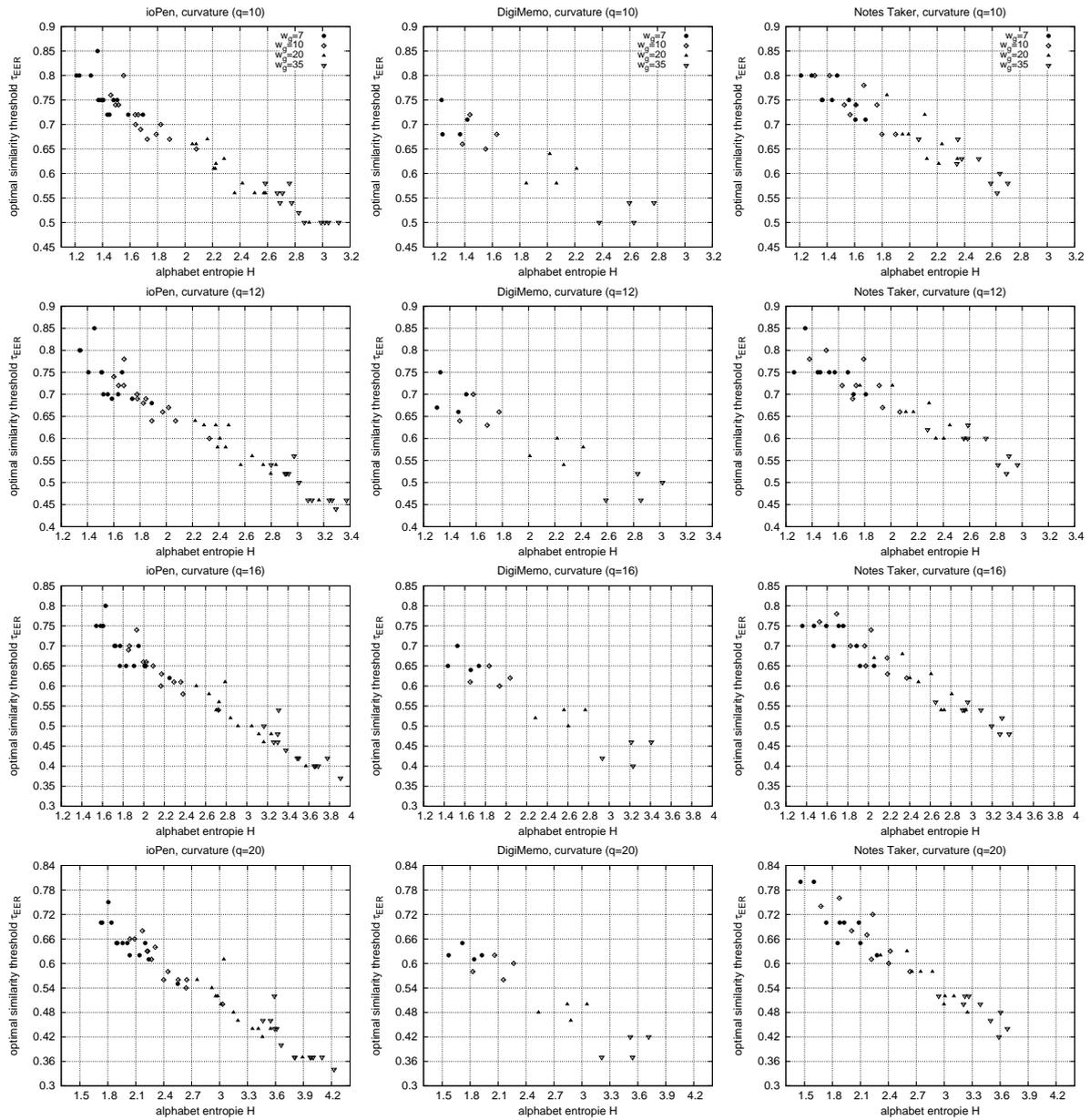


G Entropie- τ_{EER} -Diagramme





G Entropie- τ_{EER} -Diagramme



Literaturverzeichnis

- [AA96] ALIMOĞLU, F. & ALPAYDIN, E. Methods of Combining Multiple Classifiers Based on Different Representations for Pen-based Handwriting Recognition. In *Proceedings of the Fifth Turkish Artificial Intelligence and Artificial Neural Networks Symposium*. Istanbul, Türkei, Juni 1996.
- [AA01] ALIMOĞLU, F. & ALPAYDIN, E. Combining Multiple Representations for Pen-based Handwritten Digit Recognition. In *ELEKTRİK: Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 9(1): 1–12, 2001.
- [ABMV05] AGRAWAL, M., BALI, K., MADHVANATH, S. & VUURPIJL, L. UPX: A New XML Representation for Annotated Datasets of Online Handwriting Data. In *Proceedings of the Eight International Conference on Document Analysis and Recognition*, 1161–1165. IEEE Computer Society Press, 2005. ISBN 0-7695-2420-6.
- [ADD68] APPEL, A., DANKOWSKI, T. P. & DOUGHERTY, R. L. Interactive Graphics in Data Processing: Aspects of display technology. In *IBM Systems Journal*, 7(3/4): 176–187, 1968. ISSN 0018-8670.
- [Alb94] ALBRECHTS, B. Verfahren zur Erzeugung einer digitalen Signatur mit Hilfe eines biometrischen Merkmals. Offenlegungsschrift DE 4243908 A 1, Juni 1994.
- [AR99] ANDRÉ, J. & RICHY, H. Paper-Less Editing and Proofreading of Electronic Documents. In PARTOSCH, G. & WILHELMS, G. (eds.), *Proceedings of EuroTeX'99*. 1999. ISSN 1438-9959.
- [Aro67] ARON, J. D. Real-time Systems in Perspective. In *IBM Systems Journal*, 1(4): 49–66, 1967.
- [BAZ03] BRÖMME, A. & AL-ZUBI, S. Multifactor Biometric Sketch Authentication. In BRÖMME, A. & BUSCH, C. (eds.), *Proceedings of the first Conference on Biometrics and Electronic Signatures of the GI Working Group BIOSIG*. 2003. ISBN 978-3-88579-360-1.
- [BB70] BRENNER, A. E. & DE BRUYNE, P. SONIC PEN: A Digital Stylus System. In *IEEE Transactions on Computers*, 19(6): 546–548, 1970.
- [BC02] BARRIENTOS, F. A. & CANNY, J. F. Cursive: Controlling Expressive Avatar Gesture Using Pen Gesture. In *Proceedings of the 4th International Conference*

- on Collaborative Virtual Environments*, 113–119. ACM Press, New York, NY, USA, 2002. ISBN 1-58113-489-4.
- [Bei05] BEISS, W. Pilotstudie zum Digitalen Wahlstift. Dokumentation, Freie und Hansestadt Hamburg, Landeswahlleiter, Dezember 2005. http://fhh.hamburg.de/stadt/Aktuell/wahl/digitaler_20wahlstift/pilotstudie,property=source.pdf (last visited 2007-02-06).
- [BGP03] BERGADANO, F., GUNETTI, D. & PICARDI, C. Identity Verification Through Dynamic Keystroke Analysis. In *Intelligent Data Analysis*, 7: 469–496, 2003.
- [Bis03] BISCHOFF, A. N. *A New Approach to the Electronic Pen Idea*. Bachelor's thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, Juni 2003.
- [BKD⁺04] BAR YOSEF, I., KEDEM, K., DINSTEIN, I., BEIT-ARIE, M. & ENGEL, E. Classification of Hebrew Calligraphic Handwriting Styles: Preliminary Results. In *DIAL '04: Proceedings of the First International Workshop on Document Image Analysis for Libraries (DIAL'04)*, 299–305. IEEE Computer Society Press, Washington, DC, USA, 2004. ISBN 0-7695-2088-X.
- [BM04] BHASKARABHATLA, A. S. & MADHVNATH, S. An XML Representation for Annotated Handwriting Datasets for Online Handwriting Recognition. In *4th International Conference on Linguistic Resources and Evaluation*. Mai 2004.
- [BMO04] BELENKAIA, L., MOHAMED, K. A. & OTTMANN, T. Creation, Presentation, Capture, and Replay of Freehand Writings in e-Lecture Scenarios. In CANTONI, L. & MCLOUGHLIN, C. (eds.), *Proceedings of the AACE World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications (ED-MEDIA 2004)*, volume 1, 791–796. AACE press, Juni 2004.
- [Boi01] BOITSOV, L. Off-line Approximate Dictionary Matching: Theory and Experiment, 2001. http://itman.narod.ru/articles/ps_pdf_txt/dict_fuzzy.pdf (last visited 2007-07-05).
- [Boo78] DE BOOR, C. *A Practical Guide to Splines*. Springer Verlag, 1978. ISBN 0-387-90356-9.
- [Bou02] BOURGUET, M.-L. Outil de prototypage pour la conception et l'évaluation d'interfaces utilisateur multimodales. In *Proceedings of the 14th French-speaking conference on Human-computer interaction (Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine)*, volume 32, 239–242. ACM Press, 2002. ISBN 1-58113-615-3.
- [Bre65] BRESENHAM, J. E. Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter. In *IBM Systems Journal*, 4(1): 25–30, 1965.

- [Bru80] DE BRUYNE, P. Acoustic Radar Graphic Input Device. In *Computer Graphics*, 14(3): 25–31, Juli 1980.
- [BS73] BRONSTEIN, I. N. & SEMENDJAJEW, K. A. *Taschenbuch der Mathematik*. BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1973.
- [BSLM01] BAXTER, B., SCHEIB, V., LIN, M. C. & MANOCHA, D. DAB: interactive haptic painting with 3D virtual brushes. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001*, 461–468. ACM Press, 2001.
- [BSYS99] BUNKE, H., VON SIEBENTHAL, T., YAMASAKI, T. & SCHENKEL, M. Online Handwriting Data Acquisition using a Video Camera. In *Proceedings of the 5th International Conference on Document Analysis and Recognition*, 573–576. 1999.
- [BY92] BAEZA-YATES, R. A. String Searching Algorithms. In FRAKES, W. B. & BAEZA-YATES, R. (eds.), *Information Retrieval: Data Structures & Algorithms*, chapter 10, 219–240. Prentice Hall PTR, 1992. ISBN 0-13-463837-9.
- [Bér03] BÉRARD, F. The Magic Table: Computer-Vision Based Augmentation of a Whiteboard for Creative Meetings. In *CD-ROM proceedings of the IEEE International Conference in Computer Vision*. Oktober 2003.
- [Can83] CANTOR, G. *Grundlagen einer allgemeinen Mannigfaltigkeitslehre – Ein mathematisch-philosophischer Versuch in der Lehre des Unendlichen*. Commissions-Verlag von B. G. Teubner, 1883.
- [CB04] CUCERZAN, S. & BRILL, E. Spelling Correction as an Iterative Process that Exploits the Collective Knowledge of Web Users. In *Proceedings of EMNLP 2004*, 293–300. 2004.
- [CB05] ÇAKMAKCI, O. & BÉRARD, F. Back to Paper: A Technique for Browsing Multimedia Information by Pointing on Handwritten Notes. In *Proceedings of the Third International Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE'05)*. 2005.
- [CE07] CADUFF, D. & EGENHOFER, M. J. Geo-Mobile Query-by-Sketch. In *International Journal of Information Technology and Web Engineering*, 3: 157–175, Januar 2007. ISSN 1741-9212.
- [CFB05] CHEN, X., FLYNN, P. J. & BOWYER, K. W. IR and visible light face recognition. In *Computer Vision and Image Understanding*, 99(3): 332–358, 2005. ISSN 1077-3142.
- [CFF⁺06] CHEE, Y.-M., FRANKE, K., FROUMENTIN, M., MADHVANATH, S., MARGAÑA, J.-A., RUSSELL, G., SENI, G., TREMBLAY, C., WATT, S. M. & YAEGER, L. Ink Markup Language (InkML). Technical Report W3C Working Draft, W3C, Oktober 2006. <http://www.w3.org/TR/InkML/> (last visited 2007-08-31).

- [Che00] CHERY, Y. Bringing the Common Whiteboard into the Digital Age. In *IEEE MultiMedia*, 7(2): 90–92, April 2000. ISSN 1070-986X.
- [CHS91] COHEN, E., HULL, J. J. & SRIHARI, S. N. Understanding Handwritten Text in a Structured Environment. In *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 5: 221–264, 1991.
- [CKP02] CHEOK, A. D., KUMAR, K. G. & PRINCE, S. Micro-Accelerometer Based Hardware Interfaces for Wearable Computer Mixed Reality Applications. In *Sixth International Symposium on Wearable Computers (ISWC'02)*, 223–230. IEEE Computer Society Press, 2002. ISBN 0-7695-1816-8.
- [CKV02] CZYZ, J., KITTLER, J. & VANDENDORPE, L. Combining Face Verification Experts. In *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, volume 2, 28–31. August 2002.
- [CKV04] CZYZ, J., KITTLER, J. & VANDENDORPE, L. Multiple Classifier Combination for Face-Based Identity Verification. In *Pattern Recognition*, 37: 1459–1469, 2004.
- [CLM95] CHATTY, S., LECOANET, P. & MERTZ, C. Toward pen-based interaction with ATC tools. In *Air Traffic Control Quarterly*, 3(4): 205–228, 1995.
- [CMP05] CHUNG, R., MIRICA, P. & PLIMMER, B. InkKit: a generic design tool for the tablet PC. In *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI New Zealand chapter's international conference on Computer-human interaction*, 29–30. ACM Press, New York, NY, USA, 2005. ISBN 1-59593-036-1.
- [Col69] COLEMAN, M. L. Text editing on a graphic display device using hand-drawn proofreader's symbols. In FAIMAN, M. & NIEVERGELT, J. (eds.), *Proceedings of the 2nd University of Illinois Conference on Computer Graphics, Pertinent Concepts in Computer Graphics*, 282–290. 1969.
- [Coy07] COYETTE, A. *A Methodological Framework for Multi-Fidelity Sketching of User Interfaces*. Ph.d. thesis, Université catholique de Louvain, Oktober 2007.
- [CR03] CROCHEMORE, M. & RYTTER, W. *Jewels of Stringology – Text Algorithms*. World Scientific Publishing Company, 2003. ISBN 981-02-4897-0.
- [CSKV04] CZYZ, J., SADEGHI, M., KITTLER, J. & VANDENDORPE, L. Decision Fusion for Face Authentication. In ZHANG, D. & JAIN, A. K. (eds.), *First International Conference on Biometric Authentication*, volume 3072 of *Lecture Notes in Computer Science*, 686–693. Springer Verlag, Juli 2004. ISBN 3-540-22146-8.
- [CSVV07] COYETTE, A., SCHIMKE, S., VANDERDONCKT, J. & VIELHAUER, C. Trainable Sketch Recognizer for Graphical User Interface Design. In BARANAUSKAS, C., PALANQUE, P., ABASCAL, J. & BARBOSA, S. D. J. (eds.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2007*, volume 4662 of *Lecture Notes in*

- Computer Science*, 124–135. Springer Verlag, September 2007. ISBN 978-3-540-74794-9.
- [CTR⁺08] CATTELAN, R. G., TEIXEIRA, C., RIBAS, H., MUNSON, E. & PIMENTEL, M. Inkteractors: interacting with digital ink. In *Proceedings of 23rd Annual ACM Symposium on Applied Computing*, volume II, 1246–1251. März 2008. ISBN 1-59593-753-7.
- [Dam64] DAMERAU, F. J. A Technique for Computer Detection and Correction of Spelling Errors. In *Communications of the ACM*, 7(3): 171–176, März 1964.
- [Dau02] DAUGMAN, J. How Iris Recognition Works. In *Proceedings of International Conference on Image Processing*, volume 1, 33–36. 2002. ISBN 0-7803-7622-6.
- [Dav07] DAVIS, R. Magic Paper: Sketch-Understanding Research. In *Computer*, 34–41, September 2007. ISSN 0018-9162.
- [DC05] DENOUE, L. & CHIU, P. Ink Completion. In *Graphics Interface 2005 – Posters and Demos*. Victoria, British Columbia, Kanada, Mai 2005.
- [DE64] DAVIS, M. R. & ELLIS, T. O. The RAND Tablet: A Man-Machine Graphical Communication Device. Memorandum rm-4122-arpa, RAND Corporation, August 1964.
- [Der72] DERTOYZOS, M. L. Graphical Data Tablet. United States Patent 3705956, Dezember 1972.
- [DFG⁺97] DAS, G., FLEISCHER, R., GĄSIENIEC, L., GUNOPULOS, D. & KÄRKÄINEN, J. Episode Matching. In APOSTOLICO, A. & HEIN, J. (eds.), *Proceedings of the 8th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching*, 1264, 12–27. Springer Verlag, Aarhus, Dänemark, 1997. ISBN 3-540-63220-4.
- [Dim63] DIMOND, T. L. Machine Reading of Handwritten Characters. United States Patent 3108254, Oktober 1963.
- [DK04] DICKINSON, R. J. & KITNEY, R. I. Report on Modalities Fusion in Medical Applications. FP6-507609 Similar Report Deliverable 27, Imperial College London, November 2004.
- [DRS04] DODIS, Y., REYZIN, L. & SMITH, A. Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy Data. In CACHIN & CAMENISCH (eds.), *Advances in Cryptology – Eurocrypt 2004*, number 3027 in Lecture Notes in Computer Science, 523–540. Springer Verlag, 2004.
- [DTLH92] DOWNTON, A., TREGIDGO, R., LEEDHAM, G. & HENDRAWAN. *Recognition of Handwritten British Postal Addresses*, 129–144. In *From Pixels to Features III*. North Holland Press, 1992.

- [Ear62] EARNEST, L. D. Machine Recognition of Cursive Script Writing. In POPPLEWELL, C. M. (ed.), *Proceedings of IFIP Congress 62*, 462–466. North-Holland Publishing Co., 1962.
- [EBG⁺92] ELROD, S., BRUCE, R., GOLD, R., GOLDBERG, D., HALASZ, F., JANSSEN, W., LEE, D., MCCALL, K., PEDERSEN, E., PIER, K., TANG, J. & WELCH, B. Liveboard: A Large Interactive Display Supporting Group Meetings, Presentations, and Remote Collaboration. In *CHI '92: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 599–607. ACM Press, 1992. ISBN 0-89791-513-5.
- [Edw04] EDWARDS, A. W. F. *Cogwheels of the Mind: The Story of Venn Diagrams*. The Johns Hopkins University Press, 2004. ISBN 0-80-187434-3.
- [Fau80] FAULMANN, C. *Das Buch der Schrift, enthaltend die Schriftzeichen und Alphabete aller Zeiten und aller Völker des Erdkreises*. Kaiserlich-Königliche Hof- und Staatsdruckerei, Wien, Österreich, 1880.
- [Faw06] FAWCETT, T. An Introduction to ROC Analysis. In *Pattern Recognition Letters*, 27(8): 861–874, 2006.
- [FBRJ04] FONSECA, M., BARROSO, B., RIBEIRO, P. & JORGE, J. Sketch-based retrieval of ClipArt drawings. In *AVI '04: Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, 429–432. ACM Press, New York, NY, USA, 2004. ISBN 1-58113-867-9.
- [Fel06] FELDBACH, M. *Segmentierung und Strukturbasierte Adaptive Erkennung von Gebrauchsschrift in Historischen Dokumenten*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Deutschland, Februar 2006.
- [FFOG06] FAUNDEZ-ZANUY, M., FIERREZ-AGUILAR, J., ORTEGA-GARCIA, J. & GONZALEZ-RODRIGUEZ, J. Multimodal Biometric Databases: An Overview. In *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 21(8): 29–37, August 2006.
- [FGSV04] FRANKE, K., GUYON, I., SCHOMAKER, L. R. B. & VUURPIJL, L. G. WandaML – A markup language for digital document annotation. In *Proceedings of the 9th International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*. Tokyo, Japan, 2004.
- [FH96] FROHLICH, D. & HULL, R. The Usability of Scribble Matching. In *Proceedings of ACM CHI 96 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 189–190. ACM Press, 1996. ISBN 0-89791-832-0.
- [Fra92] FRAKES, W. B. Introduction to Information Storage and Retrieval Systems. In FRAKES, W. B. & BAEZA-YATES, R. (eds.), *Information Retrieval: Data Structures & Algorithms*, chapter 1, 1–12. Prentice Hall PTR, 1992. ISBN 0-13-463837-9.

- [Fre74] FREEMAN, H. Computer Processing of Line-Drawing Images. In *ACM Computing Surveys*, 6(1): 57–97, März 1974.
- [FSV⁺04] FRANKE, K., SCHOMAKER, L., VEENHUIS, C., VUURPIJL, L., VAN ERP, M. & GUYON, I. WANDA: A common ground for forensic handwriting examination and writer identification. In *ENFHEX news – Bulletin of the European Network of Forensic Handwriting Experts*, 1: 23–47, 2004. ISSN 1456-1469.
- [FT01] FELDBACH, M. & TÖNNIES, K. D. Line Detection and Segmentation in Historical Church Registers. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Document Analysis and Recognition*, 743–747. IEEE Computer Society Press, Seattle, USA, September 2001.
- [FW02] FENG, H. & WAH, C. C. Private Key Generation from On-line Handwritten Signatures. In *Information Management & Computer Security*, 10(4): 159–164, 2002.
- [GB43] GLASSMAN, L. H. & BURGER, C. W. Signature Writing Apparatus. United States Patent 2332511, Oktober 1943.
- [GHW03] GOODWIN, W. A., HANDLEY, J. E. & WINSTON, P. B. 3-D Selection and Manipulation with a Multiple Dimension Haptic Interface. United States Patent 3-D selection and manipulation with a multiple dimension haptic interface, Dezember 2003.
- [GMRÖ06] GRAN, A., MURA, G., ROGERS, S. & ÖBERG, F. How to use Anoto paper based palpafiers to edit video on mobile phones for rehabilitation of hand injured patients, 2006. <http://gran.nu/files/Palpafiers.pdf> (last visited 2008-03-19).
- [GP90] GALIL, Z. & PARK, K. An Improved Algorithm for Approximate String Matching. In *SIAM Journal on Computing*, 19(6): 989–999, 1990. ISSN 0097-5397.
- [GR93] GOLDBERG, D. & RICHARDSON, C. Touch-Typing with a Stylus. In *Proceedings of ACM INTERCHI'93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 80–87. ACM Press, 1993. ISBN 0-89791-575-5.
- [Gra88] GRAY, E. Art of Telegraphy. United States Patent 0,386,814, Juli 1888.
- [Gro66] GRONER, G. F. Real-Time Recognition of Handprinted Text. Memorandum RM-5016-ARPA, The Rand Corporation, Oktober 1966.
- [Gro95] GRONEK, G. Ähnlichkeiten gesucht. In *c't*, 5: 294–301, 1995.
- [GSP⁺94] GUYON, I., SCHOMAKER, L., PLAMONDON, R., LIBERMAN, M., & JANET, S. UNIPEN Project of On-line Data Exchange and Benchmarks. In *International Conference on Pattern Recognition*, 29–33. Jerusalem, Israel, 1994.

- [GSR⁺02] GAVIN, A. J., SCHEETZ, T. E., ROBERTS, C. A., O'LEARY, B., BRAUN, T. A., SHEFFIELD, V. C., SOARES, M. B., ROBINSON, J. P. & CASAVANT, T. L. Pooled Library Tissue Tags for EST-based Gene Discovery. In *Bioinformatics*, 18(9): 1162–1166, 2002.
- [GSS02a] GÖTZE, M., SCHLECHTWEG, S. & STROTHOTTE, T. The Intelligent Pen – Towards a Uniform Treatment of Electronic Documents. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Smart Graphics*, 129–135. ACM Press, 2002.
- [GSS02b] GÖTZE, M., SCHLECHTWEG, S. & STROTHOTTE, T. ViDio – Virtual Digital Annotations. In HERCZEG, M. & OBERQUELLE, H. (eds.), *Mensch & Computer 2002: Vom interaktiven Werkzeug zu kooperativen Arbeits- und Lernwelten*. B.G. Teubner Verlag, Hamburg, Deutschland, September 2002.
- [Gus97] GUSFIELD, D. *Algorithms on Strings, Trees and Sequences: Computer Science and Computational Biology*. Cambridge University Press, 1997. ISBN 0521585198.
- [GX04] GOVINDARAJU, V. & XUE, H. Fast Handwriting Recognition for Indexing Historical Documents. In *Proceedings of the First International Workshop on Document Image Analysis for Libraries*, 314–320. IEEE Computer Society Press, Washington, DC, USA, 2004. ISBN 0-7695-2088-X.
- [Göt06] GÖTZE, M. *Personalisierung digitaler Dokumente*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Deutschland, April 2006.
- [Ham50] HAMMING, R. W. Error-detecting and Error-correcting Codes. In *Bell System Technical Journal*, XXVI(2): 147–160, April 1950.
- [HB71] HUSTON, H. L. & BELCHER, D. K. Apparatus for Recording and Reproducing Handwriting. United States Patent 3582956, Juni 1971.
- [HBPB⁺97] HEUTTE, L., BARBOSA-PEREIRA, P., BOUGEOIS, O., MOREAU, J.-V., PLESSIS, B., COURTELLEMONT, P. & LECOURTIER, Y. Multi-Bank Check Recognition System: Consideration on The Numeral Amount Recognition Module. In *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 11(4): 595–618, 1997.
- [HDK68] HAYASHI, H., DUNCAN, S. & KUNO, S. Graphical Input/Output of Nonstandard Characters. In *Communications of the ACM*, 11(9): 613–618, September 1968.
- [HG07] HELFROUSH, S. & GHASSEMIAN, H. Nonminutiae-Based Decision-Level Fusion for Fingerprint Verification. In *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Article ID 60590, 11 Seiten, 2007.
- [Hil78] HILL, R. B. Apparatus and Method for Identifying Individuals through their Rtinal. United States Patent 4109237, August 1978.

- [Hir75] HIRSCHBERG, D. S. A Linear Space Algorithm for Computing Maximal Common Subsequences. In *Communications of the ACM*, 18(6): 341–343, 1975.
- [HKS03] HOOK, C., KEMPF, J. & SCHARFENBERG, G. New pen device for biometrical 3D pressure analysis of handwritten characters, words and signatures. In *WBMA '03: Proceedings of the 2003 ACM SIGMM workshop on Biometrics methods and applications*, 38–44. ACM Press, New York, NY, USA, 2003. ISBN 1-58113-779-6.
- [HKS04] HOOK, C., KEMPF, J. & SCHARFENBERG, G. A Novel Digitizing Pen for the Analysis of Pen Pressure and Inclination in Handwriting Biometrics. In MALTONI, D. & JAIN, A. K. (eds.), *Proceedings of the ECCV 2004 International Workshop on Biometric Authentication*, Lecture Notes in Computer Science, 283–294. Springer Verlag, Mai 2004. ISBN 3-540-22499-8.
- [HL06] HONG, J. I. & LANDAY, J. A. SATIN: a toolkit for informal ink-based applications. In *SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, 7. ACM Press, New York, NY, USA, 2006. ISBN 1-59593-364-6.
- [HMS01] HAND, D. J., MANNILA, H. & SMYTH, P. *Principles of Data Mining*. MIT Press, 2001. ISBN 0-262-08290-X.
- [Ho02] HO, T. K. Multiple Classifier Combination: Lessons and Next Steps. In A. KANDEL, H. B. (ed.), *Hybrid Methods in Pattern Recognition*, 171–198. World Scientific, 2002.
- [HR81] HORN, B. K. P. & RHUNCK, B. G. Determining Optical Flow. In *Artificial Intelligence*, 17: 185–203, 1981.
- [HRG94] HULL, R., REYNOLDS, D. & GUPTA, D. Scribble Matching. Technical Report HPL-94-61, HP Laboratories Bristol, Juli 1994.
- [Hsu02] HSU, R.-L. *Face Detection and Modeling for Recognition*. Ph.d. thesis, Michigan State University. Departement of Computer Science and Engineering, 2002.
- [HW05] HENNIGER, O. & WALDMANN, U. ISO/IEC 19794 – Austauschformate für biometrische Daten. In *Tagungsband des 15. SIT-Smartcard-Workshops*. 2005.
- [HWKK06] HÜLLERMEIER, E., WESKAMP, N., KLEBE, G. & KUHN, D. Wissensentdeckung in strukturbasierten Daten: Graph Alignment zur Analyse von Proteinstrukturen. In *Magdeburger Wissenschaftsjournal*, 1-2: 42–50, 2006.
- [HYH00] HANGAI, S., YAMANAKA, S. & HAMAMOTO, T. On-Line Signature Verification based on Altitude and Direction of Pen Movement. In *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 489–492. IEEE Computer Society Press, 2000. ISBN 0-7803-6536-4.

- [HYS05] HIRAKI, K., YONEKURA, T. & SHIBUSAWA, S. Web-Com: Interactive Browser for Web-Based Education. In *IEICE – Transactions on Information and Systems, E88-D(5)*: 912–918, 2005. ISSN 0916-8532.
- [Hyy01] HYYRÖ, H. Explaining and extending the bit-parallel algorithm of Myers. Technical Report A-2001-10, Department of Computer and Information Sciences, University of Tampere, 2001.
- [JCD03] JOGUET, C., CARITU, Y. & DAVID, D. Pen-Like natural graphic gesture capture disposal, based on a micro-system. In *Proceedings of SOC 2003 – Smart Objects Conference*. Mai 2003.
- [JKRS06] JESCHKE, S., KNIPPING, L., ROJAS, R. & SEILER, R. Intelligent Chalk-Systems for Modern Teaching: in Math, Science & Engineering Areas. In *Conference Proceedings of the 2006 ASEE Annual Conference*. 2006.
- [JN01] JAEGER, S. & NAKAGAWA, M. Two On-Line Japanese Character Databases in Unipen Format. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Document Analysis and Recognition*, 566–570. IEEE Computer Society Press, Washington, DC, USA, 2001. ISBN 0-7695-1263-1.
- [JN03] JAIN, A. K. & NAMBOODIRI, A. M. Indexing and Retrieval of On-line Handwritten Documents. In *Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition*, 655–659. IEEE Computer Society Press, 2003. ISBN 0-7695-1960-1.
- [JNLG78] JOHANSSON, S., N., G., LEECH & GOODLUCK, H. Manual of Information to accompany the Lancaster-Oslo/Bergen Corpus of British English, for use with digital Computers. Technical report, Department of English, University of Oslo, Norway, 1978.
- [Jon05] JONNALAGADDA, K. *Using Freeman Chain Coding and Levenshtein Distance for Online Sketch Recognition – Implementation for the Recognition of GUI Widget Recognition*. Master's thesis, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Deutschland, Oktober 2005.
- [JPR99] JAIN, A. K., PRABHAKAR, S. & ROSS, A. Fingerprint Matching: Data Acquisition and Performance Evaluation. MSU Technical Report MSU-CPS-99-14, Department of Computer Science, Michigan State University, East Lansing, Michigan, März 1999.
- [JR02] JAIN, A. & ROSS, A. Fingerprint Mosaicking. In *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. IEEE Computer Society Press, 2002.
- [JS02] JARRETT, R. & SU, P. *Building Tablet PC Applications*. Microsoft Press, Oktober 2002. ISBN 0-7356-1723-6.

- [JS06] JENSEN, K. & STEPHANOPOULOS, G. Bioinformatics and Handwriting/Speech Recognition: Unconventional Applications of Similarity Search Tools. In *Molecular Engineering of Biological and Chemical Systems*, Januar 2006.
- [JTU96] JOKINEN, P., TARHIO, J. & UKKONEN, E. A Comparison of Approximate String Matching Algorithms. In *Software – Practice and Experience*, 26(12): 1439–1458, 1996.
- [Jäg05] JÄGER, J. Verknüpfungsmittelwerte. Ausführliche Version des gleichnamigen Artikels in: *Mathematische Semesterberichte*, 52, 63–79 (2005), Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, 2005. <http://www.htw-saarland.de/fb-wi/personal/dozenten/jaeger/publikationen/verknuepfungsmittelwerte.pdf>.
- [Kam96] KAMEL, I. Fast Retrieval of Cursive Handwriting. In *Proceedings of CIKM*, 91–98. ACM Press, 1996.
- [KG97] KIM, G. & GOVINDARAJU, V. Bankcheck Recognition Using Cross Validation Between Legal and Courtesy Amounts. In *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 11(4): 657–674, 1997.
- [KHH02] KATO, Y., HAMAMOTO, T. & HANGAI, S. A proposal of Writer Verification of Hand Written Objects. In *Proceedings of International Conference on Multimedia and Expo*, volume 2, 585–588. 2002. ISBN 0-7803-7304-9.
- [KHP03] KOCH, G., HEUTTE, L. & PAQUET, T. Numerical Sequence Extraction in Handwritten Incoming Mail Documents. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition*, 369–373. IEEE Computer Society Press, Washington, DC, USA, 2003. ISBN 0-7695-1960-1.
- [KL98] KOERICH, A. L. & LEE, L. L. A Novel Approach for Automatic Extraction of the Userentered Data From Bankchecks. In *International Workshop on Document Analysis Systems*, 141–144. Nagano, Japan, Oktober 1998.
- [KMJS97] KITTLER, J., MATAS, G., JONSSON, K. & SÁNCHEZ, M. Combining Evidence in Personal Identity Verification Systems. In *Pattern Recognition Letters*, 18(9): 845–852, September 1997.
- [KMO03] KAMEYA, H., MORI, S. & OKA, R. Figure-Based Writer Verification by Matching between an Arbitrary Part of Registered Sequence and an Input Sequence Extracted from On-Line Handwritten Figures. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition*, 985–989. IEEE Computer Society Press, 2003. ISBN 0-7695-1960-1.
- [KP89] KUCKUCK, W. & PHILIPP, M. FISH – Das Forensische Informations-System Handschriften. In CONRAD, W. & STIER, B. (eds.), *Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der forensischen Schriftuntersuchung*, 159–187. Verlag Max Schmidt-Römschild, Lübeck, Deutschland, 1989. ISBN 3-7950-0097-1.

- [Kru99] KRUSKAL, J. B. An Overview of Sequence Comparison. In SANKOFF, D. & KRUSKAL, J. (eds.), *Time Warps, String Edits, and Macromolecules: The Theory and Practice of Sequence Comparison*, chapter 1, 1–44. CSLI Publications, 1999. ISBN 1-57586-217-4.
- [KSS05] KEMPF, J., SCHARFENBERG, G., SCHARRER, M. & SCHICKHUBER, G. Elektronik des biometrischen Schreibstiftes BiSP. In *Spektrum der Fachhochschule Regensburg*, 2: 85–89, 2005.
- [KT76] KOPLOWITZ, J. & TOUSSAINT, G. T. A unified theory of coding schemes for the efficient transmission of line drawings. In *Proceedings of the 1976 IEEE Conference on Communications and Power*, 205–208. Oktober 1976.
- [Lan99] LANDAY, J. A. Using Note-Taking Appliances for Student to Student Collaboration. In *29th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference*, volume 2, 15–20. IEEE Computer Society Press, San Juan, Puerto Rico, November 1999. ISBN 0-7803-5643-8.
- [LB05a] LIWICKI, M. & BUNKE, H. Handwriting Recognition of Whiteboard Notes. In *Proceedings of the 12th Conference of the International Graphonomics Society*, 118–122. 2005.
- [LB05b] LIWICKI, M. & BUNKE, H. IAM-OnDB – an On-Line English Sentence Database Acquired from Handwritten Text on a Whiteboard. In *Proceedings of the Eight International Conference on Document Analysis and Recognition*. IEEE Computer Society Press, 2005. ISBN 0-7695-2420-6.
- [LB06] LIWICKI, M. & BUNKE, H. HMM-Based On-Line Recognition of Handwritten Whiteboard Notes. In *Proc. 10th Int. Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*, 595–599. 2006.
- [LC03] LEUNG, W. H. & CHEN, T. Hierarchical Matching for Retrieval of Hand-Drawn Sketches. In *Proceedings of the International Conference of Multimedia and Expo 2003*, volume 2, II–29–II–32. IEEE Computer Society Press, 2003. ISBN 0-7803-7965-9.
- [LD99] LANDAY, J. A. & DAVIS, R. C. Making Sharing Pervasive: Ubiquitous Computing for Shared Note Taking. In *IBM Systems Journal*, 38(4): 531–550, 1999.
- [Lev65] LEVENSHTAIN, V. I. Binary Codes Capable of Correcting Spurious Insertions and Deletions of Ones (Original in Russian). In *Problemy Peredachi Informatsii*, 1: 12–25, 1965.
- [Lev66] LEVENSHTAIN, V. I. Binary Codes Capable of Correcting Deletions, Insertions and Reversals. In *Soviet Physics Doklady*, 10(8): 707–710, Februar 1966.

- [LGL06] LIAO, C., GUIMBRETIÈRE, F. & LOECKENHOFF, C. E. Pen-Top Feedback for Paper-based Interfaces. In WELLNER, P. & HINCKLEY, K. (eds.), *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 201–210. ACM Press, 2006. ISBN 1-59593-313-1.
- [Liu08] LIU, Y. Identifying Legal Concerns in the Biometric Context. In *Journal of International Commercial Law and Technology*, 3(1): 45–54, 2008. ISSN 1901-8401.
- [LM01] LANDAY, J. A. & MYERS, B. A. Sketching Interfaces: Toward More Human Interface Design. In *Computer*, 34(3): 56–64, 2001. ISSN 0018-9162.
- [LP94] LECLERC, F. & PLAMONDON, R. Automatic Signature Verification: The State of the Art – 1989-1993. In *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 8(3): 643–660, 1994.
- [LT93] LOPRESTI, D. P. & TOMKINS, A. Pictographic Naming. In *NTERACT '93 and CHI '93 conference companion on Human factors in computing systems*, 77–78. ACM Press, Amsterdam, The Netherlands, April 1993. ISBN 0-89791-574-7.
- [LT94] LOPRESTI, D. P. & TOMKINS, A. On the Searchability of Electronic Ink. In *Proceedings of International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*, 156–165. Dezember 1994.
- [LT03] LIN, F. & TANG, X. Dynamic Stroke Information Analysis for Video-Based Handwritten Chinese Character Recognition. In *Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE Computer Society Press, 2003. ISBN 0-7695-1950-4.
- [LW75] LOWRANCE, R. & WAGNER, R. A. An Extension of the String-to-String Correction Problem. In *Journal of ACM*, 22(2): 177–183, April 1975. ISSN 0004-5411.
- [Mac66] MACDONALD, J. S. Experimental Studies of Handwriting Signals. Technical Report 443, MIT Research Laboratory of Electronics, Cambridge, USA, März 1966.
- [Mah07] MAHMOOD, N. *Implementation and Evaluation of Document Retrieval for the PC Notes Taker Handwriting Device*. Master's thesis, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Deutschland, Juli 2007.
- [Mal06] MALIK, R. *CONAN: Text Mining in the Biomedical Domain*. Doctoral thesis, Utrecht University, 2006.
- [Mau01] MAUS, E. Verwendbarkeit des Handschriftenerkennungssystems HESY für Zwecke der Schriftvergleichung. Expertise, April 2001. [Http://www.hesy.de/expertise_hesy.pdf](http://www.hesy.de/expertise_hesy.pdf) (last visited 2007-01-08).

- [MB99] MARTI, U. V. & BUNKE, H. A full English Sentence Database for off-line handwriting recognition. In *Proceedings of the 5th International Conference on Document Analysis and Recognition*, 705–708. 1999.
- [MC97] MARTENS, R. & CLAESEN, L. An Evaluation of Different Handwriting Observation Techniques from a signature Verification Point of View. In MURCHED, N. A. & BORTOLOZZI, F. (eds.), *Advances in Document Image Analysis: first Brazilian Symposium*, volume 1339, 273–282. Springer Verlag, Curitiba, Brasilien, November 1997. ISBN 3-540-63791-5.
- [McE04] MCEWAN, T. E. Radiolocation System Having Writing Pen Application. United States Patent 6747599, Juni 2004.
- [MD06] MATTA, F. & DUGELAY, J.-L. Person recognition using human head motion information. In *AMDO 2006, Articulated Motion and Deformable Objects: 4th International Conference*. Juli 2006.
- [Mey95] MEYER, A. Pen Computing: A Technology Overview and a Vision. In *The SIGCHI Bulletin*, 27(3): 46–90, Juli 1995.
- [MGR⁺95] MADHVANATH, S., GOVINDARAJU, V., RAMANAPRASAD, V., LEE, D. & SRIHARI, S. Reading handwritten US census forms. In *Proceedings of the Third International Conference on Document Analysis and Recognition, 01*: 82–85, 1995.
- [MK06] MIURA, M. & KUNIFUJI, S. Hybrid Approach of Augmented Classroom Environment with Digital Pens and Personal Handhelds. In GABRYS, B., HOWLETT, R. J. & JAIN, L. C. (eds.), *Proceedings of 10th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, volume 4252, 1019–1026. Springer Verlag, 2006. ISBN 3-540-46537-5.
- [MKST04] MIURA, M., KUNIFUJI, S., SHIZUKI, B. & TANAKA, J. Augmented Classroom: A Paper-Centric Approach for Collaborative Learning System. In MURAKAMI, H., NAKASHIMA, H., TOKUDA, H. & YASUMURA, M. (eds.), *Proceedings of 2nd International Symposium on Ubiquitous Computing Systems*, volume 3598, 104–116. Springer Verlag, November 2004. ISBN 3-540-27893-1.
- [MKS99] MAKHOUL, J., KUBALA, F., SCHWARTZ, R. & WEISCHEDEL, R. Performance Measures for Information Extraction. In *Proceedings of DARPA Broadcast News Workshop*, 249–252. Februar 1999.
- [MMJP03] MALTONI, D., MAIO, D., JAIN, A. K. & PRABHAKAR, S. *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer Verlag, 2003. ISBN 0-387-95431-7.
- [Mor70] MORGAN, H. L. Spelling Correction in Systems Programs. In *Communications of the ACM*, 13(2): 90–94, Februar 1970. ISSN 0001-0782.

- [Mor05] MORRISON, G. D. A Camera-Based Input Device for Large Interactive Displays. In *IEEE Computer Graphics and Applications*, 52–57, 2005.
- [MP98] MUNICH, M. E. & PERONA, P. Camera-Based ID Verification by Signature Tracking. In BURKHARDT, H. & NEUMANN, B. (eds.), *Computer Vision - EC-CV'98, 5th European Conference on Computer Vision*, volume 1406 of *Lecture Notes in Computer Science*, 782–796. Springer Verlag, Freiburg, Germany, Juni 1998. ISBN 3-540-64569-1.
- [MP99] MUNICH, M. E. & PERONA, P. Visual Signature Verification Using Affine Arc-Length. In *Proceedings of the IEEE Computer Science Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2180–2186. IEEE Computer Society Press, Juni 1999. ISBN 0-7695-0149-4.
- [MP02] MUNICH, M. E. & PERONE, P. Visual Input for Pen-Based Computers. In *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 24(3): 313–328, März 2002.
- [MPGS99] MARSHALL, C. C., PRICE, M. N., GOLOVCHINSKY, G. & SCHILIT, B. N. Introducing a digital library reading appliance into a reading group. In *Proceedings of ACM Digital Libraries*, 77–84. ACM Press, 1999. ISBN 1-58113-145-3.
- [MPGS01] MARSHALL, C. C., PRICE, M. N., GOLOVCHINSKY, G. & SCHILIT, B. N. Designing e-Books for Legal Research. In *JCDL '01: Proceedings of the 1st ACM/IEEE-CS joint conference on Digital libraries*, 41–48. ACM Press, 2001. ISBN 1-58113-345-6.
- [MRMK02] MAUTNER, P., ROHLÍK, O., MATOUŠEK, V. & KEMPF, J. Fast Signature Verification without a Special Tablet. In *Proceedings of the International Conference IWSSIP'02*. Manchester, UK, November 2002.
- [MS94] MASSIE, T. H. & SALISBURY, J. K. The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects. In *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. 1994.
- [Mun00] MUNICH, M. E. *A Gaussian Mixture Modeling Approach to Text-Independent Speaker Identification*. Ph.d. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, USA, Januar 2000.
- [MVB⁺06] MADHVANATH, S., VUURPIJL, L., BALI, K., AGRAWAL, M., JAGANNADAN, V., VIJAYASENAN, D., WILLEMS, D. & SCHOMAKER, L. UPX Schema Version 0.9.5. Technical report, International Foundation and HP Labs India, Oktober 2006. <http://unipen.nici.kun.nl/upx/docs/UPXSchemaVersion0.9.5.doc> (last visited 2007-03-05).

- [MW03] MERKL, R. & WAACK, S. *Bioinformatik Interaktiv – Algorithmen und Praxis*. Wiley-VCH Verlag, 2003. ISBN 3-527-30662-5.
- [Mye96] MYERS, B. A. A Brief History of Human Computer Interaction Technology. Technical Report CMU-CS-96-163 and CMU-HCII-96-103, Carnegie Mellon University, School of Computer Science, Human Computer Interaction Institute, Dezember 1996.
- [Nav01] NAVARRO, G. A Guided Tour to Approximate String Matching. In *ACM Computing Surveys*, 33(1): 31–88, 2001.
- [NJ04] NAMBOODIRI, A. M. & JAIN, A. K. Online Handwritten Script Recognition. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(1): 124–130, 2004.
- [NLHL03] NEWMAN, M. W., LIN, J., HONG, J. I. & LANDAY, J. A. DENIM: An Informal Web Site Design Tool Inspired by Observations of Practice. In *Human-Computer-Interaction*, 18(3): 259–324, 2003.
- [NR77] NAGEL, R. & ROSENFELD, A. Computer Detection of Freehand Forgeries. In *IEEE Transactions on Computers*, 26(9): 895–905, 1977. ISSN 0018-9340.
- [NS86] NEWMAN, W. M. & SPROULL, R. F. *Grundzüge der interaktiven Computergrafik*. McGraw-Hill Book Company, 1986. ISBN 3-89028-015-3.
- [NYAT95] NABESHIMA, S., YAMAMOTO, S., AGUSA, K. & TAGUCHI, T. MEMO-PEN: A New Input Device. In *Proceedings of ACM CHI 95 Conference on Human Factors in Computing Systems*, volume 2 of *Short Papers: Pens and Touchpads*, 256–257. ACM Press, Denver, USA, 1995.
- [OAS⁺06] OROZCO TRUJILLO, M., ASFAW, Y., SHIRMOHAMMADI, S., ADLER, A. & EL-SADDIK, A. Haptic-Based Biometrics: A Feasibility Study. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'06)*, 38–44. IEEE Computer Society Press, 2006.
- [OFS⁺03] ORTEGA-GARCIA, J., FIERREZ-AGUILAR, J., SIMON, D., JOAQUIN GONZALEZ, M. F., ESPINOSA, V., SATUE, A., HERNAEZ, I., IGARZA, J. J., VIVARACHO, C., ESCUDERO, D. & MORO, Q. I. MCYT Baseline Corpus: A Bimodal Biometric Database. In *Proceedings Vision, Image and Signal Processing, Special Issue on Biometrics on the Internet*, 150(6): 395–401, Dezember 2003.
- [OGSS06] OROZCO, M., GRAYDON, M., SHIRMOHAMMADI, S. & SADDIK, A. E. Using Haptic Interfaces for User Verification in Virtual Environments. In *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems*, 25–30. 2006. ISBN 1-4244-0243-3.

- [OKON04] ODA, H., KITADAI, A., ONUMA, M. & NAKAGAWA, M. A Search Method for On-Line Handwritten Text Employing Writing-Box-Free Handwriting Recognition. In *Proceedings of the Ninth International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*, 545–550. IEEE Computer Society Press, Washington, USA, 2004. ISBN 0-7695-2187-8.
- [ON05] ODA, H. & NAKAGAWA, M. User Interface for accumulated ink search. In *Proceedings of HCI International 2005*, volume 4. Lawrence Erlbaum Associates, Nevada, USA, 2005. ISBN 0-8058-5807-5.
- [PF07] PLIMMER, B. & FREEMAN, I. A Toolkit Approach to Sketched Diagram Recognition. In BALL, L. J., SASSE, M. A., SAS, C., ORMEROD, T. C., DIX, A., BAGNALL, P. & MCEWAN, T. (eds.), *People and Computers XXI - HCI... but not as we know it: Proceedings of HCI 2007*. British Computer Society, 2007.
- [Pfa54] PFANNE, H. *Die Schriftexpertise und ihre Bedeutung für die Rechtsprechung*. Greifenverlag zu Rudolstadt, 1954.
- [PGBB⁺07] PALLUEL-GERMAIN, R., BARA, F., DE BOISFERON, A. H., HENNION, B., GOUAGOUT, P. & GENTAZ, E. A Visuo-Haptic Device - Telemaque - Increases Kindergarten Children's Handwriting Acquisition. In *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 72–77. IEEE Computer Society Press, 2007. ISBN 0-7695-2738-8.
- [PJ02] PRABHAKAR, S. & JAIN, A. K. Decision-Level Fusion in Fingerprint Verification. In *Pattern Recognition*, 35(4): 861–874, April 2002.
- [Pla95] PLAMONDON, R. A Renaissance for Handwriting. In *Machine Vision and Applications*, 8(4): 195–196, 1995.
- [PMMH93] PEDERSEN, E. R., MCCALL, K., MORAN, T. P. & HALASZ, F. G. Tivoli: An Electronic Whiteboard for Informal Workgroup Meetings. In *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 391–398. ACM Press, 1993. ISBN 0-89791-575-5.
- [PRZ02] PERRONE, M. P., RUSSELL, G. F. & ZIQ, A. Machine Learning in a Multimedia Document Retrieval Framework. In *IBM Systems Journal*, 41(3): 494–503, 2002.
- [PS00] PLAMONDON, R. & SRIHARI, S. N. On-Line and Off-Line Handwriting Recognition: A Comprehensive Survey. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(1): 63–84, 2000.
- [PTW98] POUPLYREV, I., TOMOKAZU, N. & WEGHORST, S. Virtual Notepad: Handwriting in Immersive VR. In *VRAIS '98: Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium*. IEEE Computer Society Press, März 1998. ISBN 0-8186-8362-7.

- [PW07] PRAY, J. & WEAVER, A. Tablet PC Technology: The Next Generation. In *Computer*, 32–33, September 2007.
- [PWC95] POON, A., WEBER, K. & CASS, T. A. Scribbler: A Tool for Searching Digital Ink. In *CHI 95 Conference Companion*, 252–253. ACM Press, 1995.
- [RB03] RATHA, N. & BOLLE, R. (eds.). *Automatic Fingerprint Recognition Systems*. Springer Verlag, 2003. ISBN 0-387-95593-3.
- [Ren04] RENNIE, J. D. M. Derivation of the F-Measure, Februar 2004.
- [Ren07] RENDERS, K. *Sketch-Based User Interface Design*. Master's thesis, Expertise centre for Digital Media, Hasselt University, Belgium, 2007.
- [Rey92] REYNOLDS, D. A. *A Gaussian Mixture Modeling Approach to Text-Independent Speaker Identification*. Ph.d. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, August 1992.
- [Rij79] VAN RIJSBERGEN, C. J. *Information Retrieval*. Department of Computer Science, University of Glasgow, 1979.
- [RJ98] ROBERTSON, C. & J, R. The VideoWriter: Towards Active Paper for a Natural User Interface. In *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, volume 1, 409–412. IEEE Computer Society Press, Mai 1998.
- [RJ03] ROSS, A. & JAIN, A. Information Fusion in Biometrics. In *Pattern Recognition Letters*, 24(13): 2115–2125, 2003. ISSN 0167-8655.
- [RK03] RAMACHANDRAN, S. & KASHI, R. S. An Architecture for Ink Annotations on Web Documents. In *Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition*, 256–260. IEEE Computer Society Press, 2003. ISBN 0-7695-1960-1.
- [RKH04] ROBLES-KELLY, A. & HANCOCK, E. R. String Edit Distance, Random Walks and Graph Matching. In *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 18(3): 315–327, 2004.
- [RKL⁺02] RATH, T. M., KANE, S., LEHMAN, A., PARTRIDGE, E. & MANMATHA, R. Indexing for a digital library of George Washington's manuscripts: A study of word matching techniques. Technical Report mm'36, Center for Intelligent Information Retrieval, University of Massachusetts, 2002.
- [RM03] RATH, T. M. & MANMATHA, R. Features for Word Spotting in Historical Manuscripts. In *Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition*, 218–222. IEEE Computer Society Press, 2003. ISBN 0-7695-1960-1.

- [RMMK01] ROHLÍK, O., MATOUŠEK, V., MAUTNER, P. & KEMPF, J. A New Approach to Signature Verification ? Digital Data Acquisition Pen. In *Neural Network World – International Journal on Non-Standard Computing and Artificial Intelligence*, 11(5): 493–501, 2001.
- [RMMK03] ROHLÍK, P. O., MAUTNER, P., MATOUŠEK, V. & KEMPF, J. The New Text and Graphical Input Device: Compact Biometrical Data Acquisition Pen. In RAUTERBERG, M., MENOZZI, M. & WESSON, J. (eds.), *Proceedings of IFIP INTERACT'03: Human-Computer Interaction*, 4: Short papers, 872. IOS Press, 2003. ISBN 1-58603-363-8.
- [RNJ06] ROSS, A. A., NANDAKUMAR, K. & JAIN, A. K. *Handbook of Multibiometrics*, volume 6 of *International Series on Biometrics*. Springer Verlag, 2006. ISBN 978-0-387-22296-7.
- [RNJ07] ROSS, A., NANDAKUMAR, K. & JAIN, A. K. Introduction to Multibiometrics. In JAIN, A. K., FLYNN, P. & ROSS, A. A. (eds.), *Handbook of Biometrics*. Springer Verlag, 2007. ISBN 0-387-71040-X.
- [Rob63] ROBERTS, L. G. Machine Perception Of Three-Dimensional Solids. Technical Report 315, Lincoln Laboratory, Mai 1963.
- [Rob66] ROBERTS, L. G. The Lincoln Wand. In *AFIPS Conference Proceedings, 1966 Fall Joint Computer Conference*, 223–227. 1966.
- [Rob95] ROBINSON, P. Virtual Offices. In *Proceedings of Royal Society discussion meeting on Virtual reality in society, science and engineering*. Juli 1995.
- [Roc00] ROCH, A. Fire-Control and Human-Computer Interaction. In LOZANO-HEMMER, R. (ed.), *Vectorial Elevation Relational Architecture*, 115–128. Conaculta, 2000. ISBN 9701855531.
- [Roh03] ROHLÍK, O. *Handwritten Text Analysis*. Master's thesis, University of West Bohemia in Pilsen, Faculty of Applied Science, März 2003.
- [Roo67] ROOMER, P. D. Selected Graphics Applications on TX2. In *Technical Digest of the 8th Annual IEEE Symposium on Human Factors in Electronics*, 20. IEEE Computer Society Press, Mai 1967.
- [Ros88] ROSS, D. T. A Personal View of the Personal Work Station – Some Firsts in the Fifties. In GOLDBERG, A. (ed.), *A History of Personal Workstations*, ACM Press history series. ACM Press, Addison-Wesley Publishing Company, 1988. ISBN 0-201-11259-0.
- [RP07] RUSER, H. & PUENTE LEÓN, F. Informationsfusion – Eine Übersicht. In *Technisches Messen*, 74(3): 93–102, 2007.

- [RPCZ02] RUSSELL, G., PERRONE, M. P., CHEE, Y. M. & ZIQ, A. Handwritten Document Retrieval. In *Frontiers in Handwriting Recognition*, 233–238. 2002.
- [RR02] REGNAULT, J.-J. & REGNAULT, J.-P. Machine for Reproducing Writing. United States Patent 6425185, Juli 2002.
- [RSW⁺97] ROBINSON, P., SHEPPARD, D., WATTS, R., HARDING, R. & LAY, S. A Framework for Interacting with Paper. In *Proceedings of EUROGRAPHICS '97*, volume 16, 3. The Eurographics Association, 1997.
- [Rub91a] RUBINE, D. Specifying Gestures by Example. In *Proceedings of the 18th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 329–337. ACM Press, Juli 1991. ISSN 0097-8930.
- [Rub91b] RUBINE, D. H. *The Automatic Recognition of Gestures*. Ph.D. thesis, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, Dezember 1991.
- [Run01] RUNGE, C. D. T. Über empirische Funktionen und die Interpolation zwischen äquidistanten Ordinaten. In *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, 46: 224?–243, 1901.
- [SAS01] STIFELMAN, L. J., ARONS, B. & SCHMANDT, C. The Audio Notebook: Paper and Pen Interaction with Structured Speech. In *Proceedings of ACM CHI 2001 Conference on Human Factors in Computing Systems*, Sensable Navigation Search, 182–189. ACM Press, 2001.
- [Sch04] SCHMIDT, I. *Multimedia-Datenbanken – Retrieval, Suchalgorithmen und Anfragebearbeitung*. Habilitationsschrift, Otto-von-Guericke-Universität, November 2004.
- [Sek98] SEKENDUR, O. F. Absolute Optical Position Determination. United States Patent 5852434, Dezember 1998.
- [Sel80] SELLERS, P. H. The Theory and Computation of Evolutionary Distances: Pattern Recognition. In *Journal of Algorithms*, 1(4): 359–373, Dezember 1980.
- [SF96] STAFFORD-FRASER, J. Q. *Video Augmented Environments*. Ph.d. thesis, Gonville & Caius College, University of Cambridge, USA, Februar 1996.
- [SGK07] SRIMATHVEERAVALLI, G., GOURISHANKAR, V. & KESAVADAS, T. Comparative Study: Virtual Fixtures and Shared Control for Rehabilitation of Fine Motor Skills. In *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 304–309. IEEE Computer Society Press, 2007. ISBN 0-7695-2738-8.

- [SH04] SMITH, M. & HANS, M. Sensor-Enhanced Authentication Token for Dynamic IdentityManagement. Technical Report HPL-2004-226, Mobile and Media Systems Laboratory, HP Laboratories Palo Alto, Dezember 2004.
- [Sha48] SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. In *The Bell System Technical Journal*, 27: 379–423, 623–656, 1948.
- [SHS05] SRIHARI, S., HUANH, C. & SRINIVASAN, H. A Search Engine for Handwritten Documents. In SMITH, E. H. B. & TAGHVA, K. (eds.), *Document Recognition and Retrieval XII*, volume 5676, 66–75. SPIE-IS&T, San Jose, USA, Januar 2005.
- [SHSS07] SRIHARI, S. N., HUANG, C., SRINIVASAN, H. & SHAH, V. Discriminability of the Handwriting of Twins. Technical Report TR-04-07, University at Buffalo, Center of Excellence for Document Analysis and Recognition (CEDAR), University at Buffalo, Center of Excellence for Document Analysis and Recognition, Juni 2007.
- [Sim02] SIMON, K. *Vorverarbeitung und Merkmalsextraktion in der Online-Handschrifterkennung*. Student's thesis, Albert-Ludwigs-Universität, Institut für Informatik, Freiburg, Deutschland, 2002.
- [Sim03] SIMON, K. *Erkennung von Handgeschriebenen Wörtern mit CSDTW*. Diplomarbeit, Freiburg, Deutschland, Mai 2003.
- [Sjö02] SJÖSTRÖM, C. *Non-Visual Haptic Interaction Design*. Doctoral dissertation, Department of Design Sciences, Division of Rehabilitation Engineering Research, Lund Institute of Technology, Lund, Schweden, September 2002.
- [SK99] SANKOFF, D. & KRUSKAL, J. *Time Warps, String Edits and Macromolecules – The Theory and Practice of Sequence Comparison*. The David Hume Series. CSLI Publications, 1999. ISBN 1-57586-217-4.
- [SKT05] SAGA, S., KAWAKAMI, N. & TACHI, S. Haptic Teaching Haptic Teaching using Opposite Force Presentation (Poster). In *WorldHaptics'2005*. Pisa, Italien, März 2005.
- [SKVK05] SCHIMKE, S., KILTZ, S., VIELHAUER, C. & KALKER, T. Security Analysis for Biometric Data in ID Document. In DELP, E. J. & WONG, P. W. (eds.), *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VII*, volume 5681, 474–485. SPIE-IS&T, Januar 2005. ISBN 978-0819457257.
- [Sla93] SLATE CORPORATION. JOT: A Specification for an Ink Storage and Interchange Format. Technical report, 1993. <http://unipen.nici.kun.nl/jot.html> (last visited: 2007-08-30).

- [SNC⁺95] SCHOMAKER, L., NIJTMANS, J., CAMURRI, A., LAVAGETTO, F., MORASSO, P., BENOÎT, C., GUIARD-MARIGNY, T., LE GOFF, B., ROBERT-RIBES, J., ADJODANI, A., DEFÉE, I., MÜNCH, S., HARTUNG, K. & BLAUERT, J. A Taxonomy of Multimodal Interaction in the Human Information Processing System. Project report, Esprit Project 8579 MIAMI, Februar 1995.
- [SOA⁺07] SADDIK, A. E., OROZCO, M., ASFAW, Y., SHIRMOHAMMADI, S. & ADLER, A. A Novel Biometric System for Identification and Verification of Haptic Users. In *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(3): 895–906, Juni 2007.
- [SPC⁺05] STYLIANOU, Y., PANTAZIS, Y., CALDERERO, F., LARROY, P., SEVERIN, F., SCHIMKE, S., BONAL, R., MATTA, F. & VALSAMAKIS, A. GMM-Based Multimodal Biometrics Verification. In DUTOIT, T. (ed.), *Proceedings of Summer Workshop on Multimodal Interfaces – eINTERFACE'05*, 44–51. Presses universitaires de Louvain, Mons, Belgien, September 2005. ISBN 2-87463-003-9.
- [SRSC05] SHAH, S., ROSS, A., SHAH, J. & CRIHALMEANU, S. Fingerprint Mosaicking Using Thin Plate Splines. In *Proceedings of the Biometrics Consortium Conference*. 2005.
- [SS99] SCHOMAKER, L. & SEGERS, E. Finding Features used in the Human Reading of Cursive Handwriting. In *International Journal on Document Analysis and Recognition*, 2: 13–18, Juli 1999. ISSN 1433-2833.
- [SSY03] SHAH, J. K., SMOLENSKI, B. Y. & YANTORNO, R. E. Decision Level Fusion of Usable Speech Measures Using Consensus Theory. In *Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 245–250. IEEE Computer Society Press, 2003.
- [ST90] SCHOMAKER, L. & TEULINGS, H. A Handwriting Recognition System Based on the Properties and Architectures of the Human Motor System. In *Proceedings of the International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*, 195–211. 1990.
- [ST05] SRIMATHVEERAVALLI, G. & THENKURUSSI, K. Motor Skill Training Assistance Using Haptic Attributes. In *WHC '05: Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 452–457. IEEE Computer Society Press, 2005. ISBN 0-7695-2310-2.
- [Sta06] STADT MAINZ. Test des Digitalen Stifts – Landtagswahl 2006. Dokumentation, Amt für Stadtentwicklung, Statistik und Wahlen, Abteilung Wahlen, Juni 2006. <http://www.mainz.de/WGAPublisher/online/html/default/hthn-6madhw.de.html>.

- [Sti96] STIFELMAN, L. J. Augmenting Real-World Objects: A Paper-Based Audio Notebook. In *Proceedings of ACM CHI 96 Conference on Human Factors in Computing Systems*, volume 2 of *SHORT PAPERS: Scribbling, Sketching, Drawing, and Writing*, 199–200. ACM Press, 1996.
- [Sti97] STIFELMAN, L. J. *The Audio Notebook – Paper and Pen Interaction with Structured Speech*. Ph.d. thesis, School of Architecture and Planning, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, September 1997.
- [Sub00] SUBRAHMONIA, J. Similarity Measures for Writer Clustering. In SCHOMAKER, L. R. B. & VUURPIJL, L. G. (eds.), *Proceedings of Seventh International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition, 2000*, 541–546. September 2000. ISBN 90-76942-01-3.
- [Sut63] SUTHERLAND, I. E. *Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Lab, Cambridge, USA, 1963. Also published as technical report UCAM-CL-TR-574 of the University of Cambridge, UK, Computer Laboratory.
- [SV06a] SCHIMKE, S. & VIELHAUER, C. Document Retrieval in Pen-Based Media Data. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Automated Production of Cross Media Content for Multi-channel Distribution*. IEEE Computer Society Press, Leeds, Vereinigtes Königreich, Dezember 2006. ISBN 0-7695-2625-X.
- [SV06b] SCHIMKE, S. & VIELHAUER, C. Pen-Based Retrieval in Handwritten Documents. In *6th Industrial Conference on Data Mining ICDM 2006 – IBAI CD-Report*. Leipzig, Deutschland, Juli 2006. ISSN 1617-2671.
- [SV06c] SCHIMKE, S. & VIELHAUER, C. Stiftbasierte Suche in digitalen handschriftlichen Dokumenten. In HORSTER, P. (ed.), *D-A-CH Mobility 2006*. syssec, München, Deutschland, Oktober 2006. ISBN 3-00-019635-8.
- [SV07] SCHIMKE, S. & VIELHAUER, C. Similarity Searching for On-line Handwritten Documents. In *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2(1): 49–54, 2007. ISSN 1783-7677.
- [SVD04] SCHIMKE, S., VIELHAUER, C. & DITTMANN, J. Using Adapted Levenshtein Distance for On-Line Signature Authentication. In *International Conference on Pattern Recognition*, volume 2, 931–934. IEEE Computer Society Press, Cambridge, Vereinigtes Königreich, August 2004. ISBN 0-7695-2128-2.
- [SVD05] SCHEIDAT, T., VIELHAUER, C. & DITTMANN, J. Distance-Level Fusion Strategies for Online Signature Verification. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. 2005.

- [SVD07a] SCHEIDAT, T., VIELHAUER, C. & DITTMANN, J. Handwriting verification – Comparison of a multi-algorithmic and a multi-semantic approach. In *Image and Vision Computing*, 2007.
- [SVD07b] SCHEIDAT, T., VIELHAUER, C. & DITTMANN, J. Single-Semantic Multi-Instance Fusion of Handwriting Based Biometric Authentication Systems. In *Proceedings IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE Computer Society Press, San Antonio, Texas, USA, September 2007.
- [SVO07] SCHEIDAT, T., VIELHAUER, C. & OERMANN, A. Kombination von Sensoren zur biometrischen Handschriftenerkennung. In *Proceedings D-A-CH Security 2007*. Klagenfurt, Österreich, Juni 2007.
- [SVVD04] SCHIMKE, S., VOGEL, T., VIELHAUER, C. & DITTMANN, J. Integration and Fusion Aspects of Speech and Handwriting Media. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Speech and Computer*, 42–46. Publishing house Anatolya, St. Petersburg, Russland, September 2004. ISBN 5-7452-0110-x.
- [SVVS05] SCHIMKE, S., VALSAMAKIS, A., VIELHAUER, C. & STYLIANOU, Y. Biometrics: Different Approaches for Using Gaussian Mixture Models in Handwriting. In *Communications and Multimedia Security*, 261–263. Springer Verlag, Salzburg, Österreich, Januar 2005. ISBN 3-540-28791-4.
- [SWV06] SCHEIDAT, T., WOLF, F. & VIELHAUER, C. Analyzing Handwriting Biometrics in Metadata Context. In DELP, E. J. & WONG, P. W. (eds.), *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VIII*, volume 6072 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, 182–193. SPIE-IS&T, 2006.
- [TBBB02] TOURAINÉ, D., BOURDOT, P., BELLIK, Y. & BOLOT, L. A Framework to Manage Multimodal Fusion of Events for Advanced Interactions within Virtual Environments. In *EGVE '02: Proceedings of the workshop on Virtual environments 2002*, 159–168. Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2002. ISBN 1-58113-535-1.
- [TP91] TURK, M. & ALEX PENTLAND. Eigenfaces for Recognition. In *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3(1): 71–86, 1991.
- [TR03] TEULINGS, H.-L. & ROMERO, D. H. Submovement Analysis in Learning Curative Handwriting of Block Print. In TEULINGS, H. L. & VAN GEMMERT, A. W. A. (eds.), *Proceedings of the 11th Conference of the International Graphonomics Society*. 2003.
- [TRV⁺07] TAO, Q., VAN ROOTSELER, R., VELDHUIS, R., GEHLEN, S. & WEBER, F. Optimal Decision Fusion and Its Application on 3D Face Recognition. In BROMME, A., BUSCH, C. & HUHNEIN, D. (eds.), *Proceedings of the Special*

- Interest Group on Biometrics and Electronic Signatures*, GI-Edition, 15–24. Juli 2007. ISBN 978-3-88579-202-4.
- [Tsi86] TSIEN, T.-H. Paper and Printing. In NEEDHAM, J. (ed.), *Science and Civilization in China*, volume 5. Cambridge University Press, 1986. ISBN 0521086906.
- [TSW90] TAPPERT, C. C., SUEN, C. Y. & WAKAHARA, T. The State of the Art in On-Line Handwriting Recognition. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(8), August 1990.
- [UHW⁺06] ULERY, B., HICKLIN, A., WATSON, C., FELLNER, W. & HALLINAN, P. Studies of Biometric Fusion. Technical Report NISTIR 7346, National Institute of Standards and Technology, Juli 2006.
- [UW93] UKKONEN, E. & WOOD, D. Approximate String Matching with Suffix Automata. In *Algorithmica*, 10: 353–364, 1993.
- [UW99] UCHIHASHI, S. & WILCOX, L. Automatic Index Creation for Handwritten Notes. In *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, volume 6, 3453–3456. März 1999.
- [Ven05] VENKATASALAM, S. *Adapting Stroke Direction Coding and Edit Distance Methods for Online Handwriting Recognition*. Master's thesis, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Deutschland, Oktober 2005.
- [VGLBK99] VIARD-GAUDIN, C., LALLICAN, P. M., BINTER, P. & KNERR, S. The IRESTE On/Off (IRONOFF) Dual Handwriting Database. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Document Analysis and Recognition*, 455. IEEE Computer Society Press, Washington, DC, USA, 1999. ISBN 0-7695-0318-7.
- [VHD05] VIELHAUER, C., HELMHOLZ, C. & DITTMANN, J. Multifaktorielle Benutzerauthentifizierung durch PAM und Fingerabdruck für Linux Infrastrukturen. In *Sicherheit 2005: Sicherheit - Schutz und Zuverlässigkeit, Beiträge der 2. Jahrestagung des Fachbereichs Sicherheit der Gesellschaft für Informatik e.v.*, volume LNI 62, 309–312. 2005.
- [Vie04] VIELHAUER, C. *Handwriting Biometrics for User Authentication*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Juni 2004.
- [Vie05] VIELHAUER, C. A Behavioural Biometric. In *Public Service Review: EUROPEAN UNION*, 9: 113–115, 2005.
- [Vie06] VIELHAUER, C. *Biometric User Authentication for IT Security*. Advances in Security. Springer Verlag, 2006. ISBN 0-387-26194-X.
- [Vin68] VINTSYUK, T. K. Speech Discrimination by Dynamic Programming. In *Cybernetics and Systems Analysis*, 4(1): 52–57, 1968.

- [VS05] VIELHAUER, C. & SCHEIDAT, T. Multimodal Biometrics for Voice and Handwriting. In *Communications and Multimedia Security (CMS 2005)*, 191–199. Springer Verlag, Salzburg, Österreich, Januar 2005. ISBN 3-540-28791-4.
- [VSVS05] VIELHAUER, C., SCHIMKE, S., VALSAMAKIS, A. & STYLIANOU, Y. Fusion Strategies for Speech and Handwriting Modalities in HCI. In CREUTZBURG, R. & TAKALA, J. H. (eds.), *Multimedia on Mobile Devices*, volume 5684, 63–71. SPIE-IS&T, San Jose, USA, Januar 2005. ISBN 0-8194-5657-8.
- [VV07] VOLKAMER, M. & VOGT, R. Digitales Wahlstift-System – Common Criteria Schutzprofil. Protection profile, bsi-pp-0031, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) GmbH, Prüfstelle für IT-Sicherheit & Behörde für Inneres, Freie und Hansestadt Hamburg, 2007.
- [Wat07] WATT, S. New Aspects of InkML for Pen-Based Computing. In *Proceedings of Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, volume 1, 457–460. IEEE Computer Society Press, 2007. ISSN 1520-5363.
- [Way99] WAYMAN, J. L. Technical Testing and Evaluation of Biometric Identification Devices. In JAIN, A. K., BOLLE, R. & PANKANTI, S. (eds.), *Biometrics: Personal Identification in Networked Society*, 67–89. Kluwer Academic Publishers, 1999. ISBN 0792383451.
- [WCM05] WU, Z., CAI, L. & MENG, H. Multi-level Fusion of Audio and Visual Features for Speaker Identification. In ZHANG, D. & JIAN, A. K. (eds.), *Advances in Biometrics*, LNCS 3832, 493–499. Springer Verlag, 2005.
- [Wel93] WELLNER, P. Interacting with Paper on the DigitalDesk. In *Communications of the ACM*, 36(7): 87–96, Juli 1993.
- [WF74] WAGNER, R. & FISCHER, M. The String-to-String Correction Problem. In *Journal of the ACM*, 21(1): 168–173, 1974. ISSN 0004-5411.
- [WHKK07] WESKAMP, N., HULLERMEIER, E., KUHN, D. & KLEBE, G. Multiple Graph Alignment for the Structural Analysis of Protein Active Sites. In *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 4(2): 310–320, 2007. ISSN 1545-5963.
- [WHY07] WANG, F., HAN, J. & YAO, X. Iris Recognition Based on Multialgorithmic Fusion. In *WSEAS Transactions on Information Science & Applications*, 4(12): 1415–1421, 2007. ISSN 1790-0832.
- [Wie03] WIENECKE, M. *Videobasierte Handschrifterkennung*. Dissertation, Universität Bielefeld, Technische Fakultät, 2003.
- [WM92] WU, S. & MANBER, U. Fast Text Searching Allowing Errors. In *Communications of the ACM*, 35(10): 83–91, Oktober 1992.

- [Wob06] WOBROCK, J. O. *EdgeWrite: A Versatile Design for Text Entry and Control*. Ph.d. thesis, Human-Computer Interaction Institute, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Juli 2006.
- [WP94] WEBER, K. & POON, A. Marquee: A Tool for Real-time Video Logging. In ADELSON, B., DUMAIS, S. T. & OLSON, J. S. (eds.), *Conference on Human Factors in Computing Systems*, 58–64. ACM Press, April 1994. ISBN 0-89791-650-6.
- [WSS97] WILCOX, L. D., SCHILIT, B. N. & SAWHNEY, N. Dynamite: A Dynamically Organized Ink and Audio Notebook. In *CHI '97: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 186–193. ACM Press, 1997. ISBN 0-89791-802-9.
- [Wu04] WU, X. *Achieving Interoperability of Pen Computing with Heterogeneous Devices and Digital Ink Formats*. Master's thesis, Faculty of Graduate Studies, University of Western Ontario, Dezember 2004.
- [YA95] YAMAMOTO, S. & AGUSA, K. MemoPen – A Media Connecting Man, Paper and Computer. In *Bit*, 27(9): 13–21, 1995. <http://www.agusa.nuie.nagoya-u.ac.jp/research/media/MemoPen/MemoPen.html> (last visited 2007-07-05).
- [YCX⁺04] YEUNG, D.-Y., CHANG, H., XIONG, Y., GEORGE, S., KASHI, R., MATSUMOTO, T. & RIGOLL, G. SVC2004: First International Signature Verification Competition. In *Proceedings of the International Conference on Biometric Authentication (ICBA)*, 16–22. Springer Verlag, Hong Kong, China, Juli 2004.
- [YL99] YANG, Y. & LIU, X. A Re-examination of Text Categorization Methods. In HEARST, M. A., GEY, F. & TONG, R. (eds.), *Proceedings of SIGIR-99, 22nd ACM International Conference on Research and Development in Information Retrieval*, 42–49. ACM Press, Berkeley, USA, Dezember 1999.
- [YNC04] YAM, C., NIXON, M. S. & CARTER, J. S. Automated Person Recognition by Walking and Running via Model-based Approaches. In *Pattern Recognition*, 37(5), 2004.
- [ZB00] ZIMMERMANN, M. & BUNKE, H. Automatic Segmentation of the IAM Offline Database for Handwritten English Text. In *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition*, volume 4, 35–39. 2000.
- [ZTP05] ZAFEIRIOU, S., TEFAS, A. & PITAS, I. Elastic Graph Matching versus Linear Subspace Methods for Frontal Face Verification. In *Proceedings of IEEE International Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*. 2005.
- [ZV03] ZÖBISCH, F. & VIELHAUER, C. A Test Tool to Support Brute-force Online and Offline Signature Forgery Tests on Mobile Devices. In *Proceedings of the 2003 International Conference on Multimedia and Expo*, volume 3, 225–228. IEEE Computer Society Press, Washington, USA, 2003. ISBN 0-7803-7965-9.

Sonstige Quellen

- [ACE07] ACE CAD ENTERPRISE CO., LTD. DigiMemo Digital Notepad, 2007. <http://www.acecad.com.tw/> (last visite 2007-02-26).
- [Ade07] ADESSO, INC. Adesso CyberPad – 8.5” x 11” Digital Notepad, 2007. <http://www.adesso.com/> (last visite 2007-03-30).
- [Ano06a] ANOTO AB. Development Guide for Services Enabled by Anoto Functionality, 2006. <http://partner.anoto.com/obj/docpart/43e8affd88e68.pdf> (last visited 2007-02-06).
- [Ano06b] ANOTO AB. Pens’ Clock, 2006. Doc. no 410 089, <http://partner.anoto.com/obj/docpart/44ffd33b9aab1.pdf> (last visited 2007-02-08).
- [Ano07a] ANOTO AB. Anoto Digital Pen and Paper, 2007. <http://www.anoto.com/> (last visited 2007-02-08).
- [Ano07b] ANOTO AB. Digital Pen and Paper Put New Drivers on the Road, Quickly and Safely, Februar 2007. <http://partner.anoto.com/obj/docpart/45d214d8dd9f3.pdf>.
- [Aus98] AUSTEN, I. Unleashing the Power of the Pen, 1. Oktober 1998. New York Times.
- [Bro07] BROMBA, M. U. A. Bioidentifikation – Fragen und Antworten (Biometrie-FAQ), 2007. <http://www.bromba.com/faq/biofaqd.htm> (last visited 2007-05-25).
- [Car03] CARLSON, W. A Critical History of Computer Graphics and Animation, 2003. <http://accad.osu.edu/waynec/history/lessons.html> (last visited 2007-03-21).
- [Cot71] COTTON, I. W. Network Graphic Attention Handling, Juni 1971. RFC 178, <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc178.txt>.
- [Dan05] DAN’S DATA. Review: Virtual Ink Mimio digital whiteboard conversion kit, November 2005. <http://www.dansdata.com/mimio.htm> (last visited 2007-02-08).
- [Elo07] ELO TOUCHSYSTEMS. Acoustic Pulse Recognition. Whitepaper, Elo Touch-Systems, 2007. http://media.elotouch.com/pdfs/marcom/apr_wp.pdf (last visited 2007-07-09).
- [Fin07] FINGERSYSTEMS INC. i-pen – Frequently Asked Questions, 2007. http://www.fingersystemusa.com/support/faq/i-pen_mouse.php (last visited 2007-02-08).

Sonstige Quellen

- [Fuj02] FUJITSU PC CORPORATION. Pen Computer Technology. White paper, Fujitsu PC Corporation, 2002. http://www.fujitsupc.com/www/content/aboutus/whitepapers/pen_computer_technology.pdf (last visited 2007-07-09).
- [Guy94] GUYON, I. UNIPEN 1.0 Format Definition. Technical report, AT&T Bell Laboratories, 1994. <http://unipen.nici.ru.nl/unipen.def> (last visited 2007-08-31).
- [Guy03] GUYON, I. WandaML Document Type Definition (DTD), Juni 2003. <http://unipen.nici.kun.nl/wandaML/WANDA/> (last visited 2008-04-16).
- [Hei05] HEISE. Computex: Zeichenblock mit USB, 01. Juni 2005. <http://www.heise.de/newsticker/meldung/60135> (last visited 2007-02-08).
- [Hit07] HITACHI MAXELL. magicomm G303 Digital Pen, 2007. <http://www.magicomm.co.uk/> (last visited 2007-02-23).
- [Hoo07] HOOK, C. F&E-Projekt – Analyse biometrischer Signaturdaten, 2007. http://homepages.fh-regensburg.de/~hoc39055/BiSP/BiSP_Page_hook_8.html (last visited 2007-02-23).
- [iRe07] IREX TECHNOLOGIES. The iLiad, 2007. <http://www.irextechnologies.com/> (last visited 2007-04-11).
- [Kul07] KULKE, U. Geheime Botschaft aus dem Mittelalter. In *Welt-Online*, 9. März 2007. http://www.welt.de/wissenschaft/article753270/Geheime_Botschaft_aus_dem_Mittelalter.html (last visited 2008-04-09).
- [Lea07] LEAPFROG ENTERPRISES, INC. FLY Pentop Computer, 2007. <http://www.leapfrog.com> (last visited 2007-02-23).
- [Liv07] LIVESCRIBE, INC. Smartpen, 2007. <http://www.livescribe.com/> (last visited 2007-11-06).
- [Log07] LOGITECH, INC. io Personal Digital Pen, 2007. <http://www.logitech.com/> (last visited 2007-02-23).
- [Lui07] LUIDIA, INC. eBeam Whiteboard, 2007. <http://www.e-beam.com/> (last visited 2007-04-18).
- [Mic07] MICROCOMPUTER SYSTEMS LABORATORY, FH REGENSBURG. Sensor principles used in the BiSP project, 2007. http://homepages.fh-regensburg.de/~scg39398/mc_lab/pdf/playground/ (last visited 2007-10-29).
- [Nok07] NOKIA CORPORATION. Nokia Digital Pen, 2007. <http://www.nokia.com/> (last visited 2007-02-08).
- [Owe05] OWENS, R. L. Optical Mouse technology, 2005. <http://www.mstarmetro.net/~rflowns/OpticalMouse/> (last visited 2007-10-29).

- [Peg06] PEGASUS TECHNOLOGIES LTD. NoteTaker SDK 2.0 – Pen Input Guide, 2006.
- [Peg07] PEGASUS TECHNOLOGIES LTD. PC Notes Taker, 2007. <http://www.pegatech.com/> (last visited 2007-02-26).
- [Pog05] POGUE, D. The Pen Gets a Whole Lot Mightier, 17. November 2005. New York Times.
- [Pop06] POPAT, B. Inches to Pixel alignment issues, 2006. Diskussionsbeitrag vom 17. November 2006 in der Mailingliste papertoolkit@googlegroups.com, <http://groups.google.com/group/papertoolkit/msg/d02314b3fe3d1d9e> (last visited 2007-03-23).
- [Sch01] SCHMID, K. Das Rätsel der Handschrift. In *Telepolis*, Juli 2001. <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/9/9051/1.html> (last visited 2007-07-03).
- [Sie06] SIETMANN, R. Der Stift-Kompromiss – Das Hamburger Landeswahlamt propagiert fürs e-Voting den digitalen Wahlstift. In *c't Magazin*, 90, Juni 2006. <http://www.heise.de/ct/06/06/090/> (last visited 2007-02-08).
- [Sil01] SILBERMAN, S. The Hot New Medium: Paper. In *Wired Magazine*, April 2001.
- [Son07] SONY ERICSSON MOBILE COMMUNICATIONS AB. Chatpen, 2007. <http://www.sonyericsson.com/> (last visited 2007-07-26).
- [Wac07] WACOM CO. LTD., 2007. <http://www.wacom.com/> (last visited 2007-03-30).
- [Wei99] WEISSTEIN, E. W. Curvature, 1999. MathWorld – A Wolfram Web Resource, <http://mathworld.wolfram.com/Curvature.html>.

Sonstige Quellen

Eigene Veröffentlichungen

- [CSVV07] COYETTE, A., SCHIMKE, S., VANDERDONCKT, J. & VIELHAUER, C. Trainable Sketch Recognizer for Graphical User Interface Design. In *Human-Computer Interaction – INTERACT 2007*, volume 4662 of *Lecture Notes in Computer Science*, 124–135. Springer Verlag, September 2007. ISBN 978-3-540-74794-9.
- [SKVK05] SCHIMKE, S., KILTZ, S., VIELHAUER, C. & KALKER, T. Security Analysis for Biometric Data in ID Document. In DELP, E. J. & WONG, P. W. (eds.), *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VII*, volume 5681, 474–485. SPIE-IS&T, Januar 2005.
- [SPC⁺05] STYLIANOU, Y., PANTAZIS, Y., CALDERERO, F., LARROY, P., SEVERIN, F., SCHIMKE, S., BONAL, R., MATTA, F. & VALSAMAKIS, A. GMM-Based Multimodal Biometrics Verification. In DUTOIT, T. (ed.), *Proceedings of Summer Workshop on Multimodal Interfaces – eINTERFACE’05*, 44–51. Presses universitaires de Louvain, Mons, Belgien, September 2005. ISBN 2-87463-003-9.
- [SV06a] SCHIMKE, S. & VIELHAUER, C. Document Retrieval in Pen-Based Media Data. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Automated Production of Cross Media Content for Multi-channel Distribution*. IEEE Computer Society Press, Leeds, Vereinigtes Königreich, Dezember 2006. ISBN 0-7695-2625-X.
- [SV06b] SCHIMKE, S. & VIELHAUER, C. Pen-Based Retrieval in Handwritten Documents. In *6th Industrial Conference on Data Mining ICDM’2006 – IBAI CD-Report*. Leipzig, Deutschland, Juli 2006. ISSN 1617-2671.
- [SV06c] SCHIMKE, S. & VIELHAUER, C. Stiftbasierte Suche in digitalen handschriftlichen Dokumenten. In HORSTER, P. (ed.), *D-A-CH Mobility 2006*. syssec, München, Deutschland, Oktober 2006. ISBN 3-00-019635-8.
- [SV07] SCHIMKE, S. & VIELHAUER, C. Similarity Searching for On-line Handwritten Documents. In *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2(1): 49–54, 2007. ISSN 1783-7677.
- [SVD04] SCHIMKE, S., VIELHAUER, C. & DITTMANN, J. Using Adapted Levenshtein Distance for On-Line Signature Authentication. In *International Conference on Pattern Recognition*, 931–934. IEEE Computer Society Press, Cambridge, Vereinigtes Königreich, August 2004. ISBN 0-7695-2128-2.

Eigene Veröffentlichungen

- [SVVD04] SCHIMKE, S., VOGEL, T., VIELHAUER, C. & DITTMANN, J. Integration and Fusion Aspects of Speech and Handwriting Media. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Speech and Computer*, 42–46. Publishing house Anatolya, St. Petersburg, Russland, September 2004. ISBN 5-7452-0110-x.
- [SVVS05] SCHIMKE, S., VALSAMAKIS, A., VIELHAUER, C. & STYLIANOU, Y. Biometrics: Different Approaches for Using Gaussian Mixture Models in Handwriting. In *Communications and Multimedia Security*, 261–263. Springer Verlag, Salzburg, Österreich, Januar 2005. ISBN 3-540-28791-4.
- [VSVS05] VIELHAUER, C., SCHIMKE, S., VALSAMAKIS, A. & STYLIANOU, Y. Fusion Strategies for Speech and Handwriting Modalities in HCI. In CREUTZBURG, R. & TAKALA, J. H. (eds.), *Multimedia on Mobile Devices*, volume 5684, 63–71. SPIE-IS&T, San Jose, USA, Januar 2005. ISBN 0-8194-5657-8.

Index

- A**
Abtastung 21f, 25, 27, **50**, 52f, 81
Ähnlichkeit 72–79, 81
Anoto-Technologie 17, 24–26
Audio Notebook 17f
Audio-Notebook 139
- B**
Biometrie 3, 5, 7, 83f, 87, 90, 94
- C**
CrossPad 29
- D**
Digitalisiertablett 1, 17, 27–29
- E**
Editierabstand 11, 72–78, 81, 92, 96
elektromagnetisches Feld 28
- F**
Fusion . . . 6, **83–97**, 109–112, 125–132, 136
 biometrische 83–91, 94
- G**
Gestenerkennung 3f, 9–11, 40
Gittermerkmale 56–64
 Dreiecksgitter 63f
 Quadratgitter 56–62
Grafacon *siehe* RAND Tablet
Graffiti 3f
- H**
hwDataset 40
- I**
InkML 40f
ITU-T T.150 42
- J**
Jot 38–40
- K**
Keilschrift 2
Krümmung 54, 67f
- L**
Levenshtein-Abstand . *siehe* Editierabstand
Lichtgriffel 2, 22f
Lincoln WAND 30
Liveboard 18
- N**
Neuabtastung 12f, 53–55
- P**
PDA 1f, 4f, 11, 18, 33, 43, 45
Polynominterpolation 55
Positionsbestimmung
 akustische 30f
 elektromagnetische 27–29
 elektromechanische 34–38
 kapazitive 27
 optische 22–27
 widerstandsbasierte 32f
- Q**
Quantisierung 50, 56, 59, 66, 68f
 Circular 61
 Grid-Intersect 58f
 Square-Box 58, 61
- R**
RAND Tablet 2f, **27f**
Resampling *siehe* Neuabtastung
Rubines Algorithmus 9–11, 15

Index

S

Segmentierung 11, 13–16, 51, 53
Sketchpad 2, 22f
Splineinterpolation 53–55
Stroke 9, 11–13, 51–53

T

TabletPC 1f, 27–29, 44, 46, 137

U

Ultraschall 30
Unipen 39–41, 105
Unistroke 3f
UPX 40

V

Vorverarbeitung 50–56

W

WandaML 41

Lebenslauf

Name	Sascha Schimke (geb. Dittmar)
Geburtsdatum, -ort	31. Juli 1978, Magdeburg
Schulausbildung	
1985 bis 1987	Olga-Benario-Prestes-Oberschule, Magdeburg
1987 bis 1991	Nikolai-Ostrowski-Oberschule (mit erweitertem Russischunterricht)
1991 bis 1997	Johann-Gottfried-Herder-Gymnasium
Juli 1997	allgemeine Hochschulreife (Hauptfächer: Mathematik, Physik)
Universität	
ab Oktober 1998	Studium der Informatik (Diplom) an der Fakultät für Informatik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Nebenfach: Philosophie
April 2001	Vordiplom in Informatik
Oktober 2001 bis April 2002	Praktikum bei 8hertz technologies GmbH, Berlin
Januar 2004	Abschluss des Studiums als Diplominformatiker (Note: 1,5) Diplomthema: »Adaption des Levenshtein-Abstandes für Online-Handschriftauthentifikation«
ab Februar 2004	Promotionsvorhaben in Bereich Pen-Computing
März 2005	Einmonatiger Forschungsaufenthalt an der <i>University of Crete</i>
August bis September 2005	Einmonatiger Forschungsaufenthalt an der <i>Université catholique de Louvain</i>
Beruflicher Werdegang	
August 1997 bis August 1998	Zivildienst in der Notaufnahme des Walter-Friedrich-Krankenhauses Magdeburg
September 2000 bis August 2001	Softwareentwickler bei SKYRIX Software AG, Magdeburg
April 2002 bis Mai 2004	Softwareentwickler bei 8hertz technologies GmbH, Berlin
Februar 2004 bis Juli 2008	Doktorand am Lehrstuhl Multimedia and Security (Stipendiat unter anderem im Europäischen Forschungsprojekt SIMILAR; FP6-IST-2002-507609)