

Anwendung von intelligenten Technologien in der online- Qualitätskontrolle von Druckprodukten

Steven Flemming

Anwendung von intelligenten Technologien in der online- Qualitätskontrolle von Druckprodukten

Der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. (FH) Steven Flemming
geb. am 27. November 1973 in Berlin

Tag der Einreichung: 05. Juli 2005
Tag der Verteidigung: 20. Juni 2006
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil Horst Goldhahn
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Herzau-Gerhardt
Dr.-Ing. Peter Hofmann

Prof. Dr.-Ing. habil R. Stelzer
(Vorsitzender der Promotionskommission)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Wesentlichen zwischen 2001 und 2005 parallel zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschung und Entwicklung im Sächsischen Institut für die Druckindustrie GmbH.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Goldhahn, der mir an der Professur für Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik der Technischen Universität Dresden diese Arbeit ermöglichte, für die wohlwollende aber auch kritische Begleitung und Förderung der Arbeit und die Übernahme des Erstgutachtens.

Ebenso bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Peter Hofmann, Geschäftsführer des Sächsischen Instituts für die Druckindustrie, für seine außergewöhnliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit, für die Inspirationen zu diesem Thema, den mir gebotenen Freiraum und für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Danken möchte ich auch Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Herzau-Gerhardt, Prodekanin des Fachbereichs Polygrafische Technik der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur in Leipzig, für die „Infizierung“ mit dem Interesse für die Polygrafie, die Unterstützung für diese Arbeit und für die Übernahme des Zweitgutachtens.

An dieser Stelle möchte ich den Personen danken, die zum Gelingen der Arbeit in besonderer Weise beigetragen haben, meinem langjährigen Kollegen und Weggefährten während der Erstellung dieser Arbeit Gerald Loh, Barbara Flemming und Dr. Bert Flemming für Anregungen sowie Kritik und Petra Häßler für die große Mithilfe, Geduld und viel, viel Verständnis, ohne das es diese Arbeit nicht gegeben hätte.

Radebeul, im Juli 2005

Steven Flemming

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Wissensstand und Abgrenzung der Arbeit	3
1.3	Ziel und Aufbau der Arbeit	4
2	Techniken zur Bewertung der Qualität von bedruckten Produkten.....	6
2.1	Allgemeines zu Druckverfahren.....	7
2.2	Druckqualität und ihre Messbarkeit	8
2.3	Visuelle Methoden der Qualitätsbewertung	10
2.4	Messbare optische Eigenschaften von Druckprodukten.....	14
2.5	Schlussfolgerungen.....	17
3	Kontrolle von bedruckten Produkten.....	20
3.1	Herstellung von bedruckten Produkten	20
3.2	Möglichkeiten der Druckbildkontrolle	22
3.3	Beschreibung des Grundmesssystems	28
3.4	Beschreibung der Messsoftware.....	30
4	Anwendung von intelligenten Technologien	36
4.1	Klassische Lösungsansätze zur Positionsbestimmung.....	38
4.2	Modell zur Lagebestimmung von Druckbildern	42
4.3	Wissensbasis modelliert mit unscharfen Mengen	44
4.4	Neuronales Netz zur Optimierung der Regelbasis	49
4.5	Anwendung Genetischer Algorithmen.....	55
4.6	Versuche und Ergebnisse	57
5	Zusammenfassung	66
5.1	Schlussfolgerungen.....	66
5.2	Ausblick.....	68
	Literaturverzeichnis	70
	Anhang.....	79

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Anwendung von intelligenten Technologien in der online-Kontrolle von Druckprodukten. Ausgehend von der Qualität der Druckprodukte und den Möglichkeiten der Kontrolle von Druckqualität direkt im Herstellungsprozess werden Lösungen der Druckbildkontrolle diskutiert. Den Kern der Arbeit bildet die Anwendung intelligenter Technologien, wie Fuzzy Logic oder Neuronale Netze, in der Kontrolle von Druckbildern. Aufgrund der Generalisierungsmöglichkeiten und der Modularität der untersuchten Algorithmen eignen sich die beschriebenen Ansätze zur Implementierung in ein Druckkontrollsystem oder in andere zeitkritische Bildverarbeitungssysteme.

Die meisten Gegenstände oder Artikel, die konsumiert werden, sind durch aufgedruckte Texte oder Bilder gekennzeichnet, um Informationen über Inhalt, Herkunft, Beschaffenheit, Zweck und Dauer der Nutzbarkeit zu geben. Täglich werden millionenfach Etiketten, bedruckte Faltschachteln und andere bedruckte oder gekennzeichnete Produkte hergestellt. Dabei ist bei einer so großen Menge von Druckprodukten nicht auszuschließen, dass beim Druckprozess oder dem Weiterverarbeitungsprozess Fehler auftreten. Diese können unterschiedliche Quellen haben und sehr vielfältig sein. Durch die steigende Produktvielfalt und einen zunehmenden Anteil veredelter Druckprodukte sind gerade in den letzten Jahren die Anforderungen im Bereich der Qualitätssicherung gestiegen. Zur automatischen Kontrolle und Überwachung von Druckprozessen werden zunehmend bildverarbeitende Kontrollsysteme herangezogen (Burkart 2003).

Zur online-Kontrolle der Qualität von bedruckten Produkten, der automatisierten Kontrolle im Herstellungsprozess, eignen sich Bildverarbeitungssysteme, da die Druckqualität in erster Linie eine optische Eigenschaft der Druckprodukte ist. Texte, Bilder und Farben als gedruckte Elemente sind auf das Sinnesorgan Auge des Menschen ausgerichtet. Andere druckbare Elemente wie maschinenlesbare Codes, haptisch erfassbare Farbschichten, gedruckter Geruch, gedruckte Schaltungen sind dagegen nicht primär visuell erfassbar bzw. beurteilbar. In dieser Arbeit soll auf optische Eigenschaften von Druckprodukten und deren Möglichkeit der Kontrolle durch ein Werkzeug, ein Bildverarbeitungssystem, eingegangen werden. Bildverarbeitungssysteme haben als Entscheidungsträger in der Gut-Schlecht-Beurteilung von Druckprodukten den unschätzbaren Vorteil der Objektivität gegenüber dem Menschen in seiner Entscheidungsfindung. Ihre Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit wird nicht durch Ermüdungserscheinungen auf Grund

gleichförmiger Prozesse eingeschränkt. Diesem unbestreitbaren Vorteil steht jedoch ein Nachteil gegenüber. Die Zuverlässigkeit der Entscheidungen und die Geschwindigkeit der Entscheidungsfindung hängen von den Verfahren der Bildverarbeitung, der Bildauswertung und dem Entscheidungsvorgang selbst ab.

An die online-Kontrolle der Qualität von bedruckten Produkten werden spezielle Anforderungen gestellt:

1. Die Bewertung steht unter einem starken Zeitdruck. Eine kurze Auswertungszeit bestimmt die Quantität von kontrollierbaren Merkmalen bzw. Produkten je Zeiteinheit.
2. Die Funktionalität und die Intelligenz der Kontrolle müssen eine automatische Anpassung an die jeweilige Kontrollaufgabe, eine mögliche Parametrierung und eine selbständige Optimierung ermöglichen.
3. Vorhandene Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Druckqualität (verschiedene Definitionen, unterschiedlichste Messverfahren, differierende Anforderungen an das Druckprodukt), unscharfes Expertenwissen und unterschiedlichste Empfindungen beim Nutzer des Druckproduktes (die keine eindeutige Bestimmung der Druckqualität zulassen) müssen berücksichtigt werden.
4. Findet die Kontrolle außerhalb einer Druckmaschine statt, ist mit Lageverschiebungen des Druckbildes zu rechnen. Innerhalb der zulässigen Toleranzen für eine Lageverschiebung muss eine Kontrolle des Druckbildes möglich sein.

Bei der Anwendung von intelligenten Technologien zur online-Qualitätskontrolle von Druckprodukten geht es zunächst grundsätzlich darum, Ansätze, Modelle, Methoden und Verfahren zu untersuchen, anzuwenden und so anzupassen, dass das Werkzeug Computer mit Fähigkeiten ausgestattet werden kann, denen das Attribut intelligent zuzuordnen ist. Dabei wird ein Weg beschrieben, der sich nicht nur auf die artverwandten Gebiete der Informationsverarbeitung oder klassische Ansätze stützt, sondern auch die Gebiete der Evolutionären Algorithmen, der Fuzzy-Technologie sowie der Neuronalen Netze darstellt und untersucht. Darüber hinaus zeigt die Realisierung in einem Kontrollsystem und die Simulation die erfolgreiche Konzipierung und Eignung der Technologien.

Exemplarisch für die generelle Aufgabenstellung der online-Qualitätskontrolle von Druckprodukten mittels intelligenten Technologien eignet sich die Druckbogenkontrolle in Bogenstanzen zur Herstellung von Faltschachteln. Durch die Ähnlichkeit der Anforderungen dieser Aufgabe mit anderen Kontrollaufgaben in der grafischen Industrie wird im Rahmen dieser Arbeit auf diese Situation eingegangen. Es soll eine Übertragbarkeit und Anwendung der Ergebnisse möglich werden.

1.2 Wissensstand und Abgrenzung der Arbeit

Das Druckprodukt nimmt in dieser Arbeit eine zentrale Rolle ein. Die Bestimmung und die Kontrolle der optischen Eigenschaften des gedruckten Bildes direkt im Herstellungsprozess stellen große Herausforderungen an eine technische Umsetzung. Die steigenden Ansprüche an die Qualität und die Verarbeitungsgeschwindigkeiten unterliegen dabei einem Entwicklungsprozess, der noch nicht abgeschlossen ist (Spiegel 1999 und Meyer 2000). Nach wie vor steht bei der Bestimmung der Qualität des Druckes der Mensch im Mittelpunkt. Der Mensch ist der Konsument der Druckprodukte, deren Eigenschaften auf die Sinneswahrnehmungen des Menschen ausgerichtet werden. Trends und Design werden von Menschen für Menschen geschaffen. Wiedererkennungswert und Produktidentifikation sind Schlagworte von menschlichen Produktmanagern. Die Beurteilung der Eigenschaften zur Qualitätskontrolle erfolgt zum großen Teil durch Menschen oder messtechnisch durch ein Verfahren, das die Beurteilung des Menschen nachstellen soll. Während der Herstellung von Druckprodukten kommt es auch immer auf das Urteilsvermögen des Druckers an, die Produktionsparameter so zu gestalten, dass entsprechende Qualität produziert wird. Für diese Aufgabenstellung, die Beurteilung der Druckqualität, gibt es bis heute keine vollständige Umsetzung in einem Messsystem oder Messverfahren.

Das Wissenschaftsgebiet der Künstlichen Intelligenz (Popovic 1994), das in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts entstand, beschäftigt sich mit Problemstellungen, die nicht algorithmisch modellierbar sind. Mit der großen Anzahl beinhaltender Methoden und Technologien ist es bisher nicht gelungen, einen General Problem Solver (GPS) zu entwickeln, der das menschliche Auge und das Gehirn in seinen Funktionen nachbilden kann. Vielmehr schränkt man heute die Bemühungen, z.B. bei der Entwicklung von Expertensystemen, vermehrt auf eng abgrenzbare Gebiete ein (Keller 2000). Die Anwendung intelligenter Technologien zur Entwicklung von Verfahren, die intelligentes menschliches Verhalten durch Computerprogramme nachbilden (McCarthy 1968), speziell auf dem Gebiet der Bildverarbeitung und der Bildbewertung, zeigen, dass durch eine Spezialisierung auf bestimmte, spezielle Aufgabengebiete leistungsfähige Algorithmen entwickelt werden können. Die Anwendung Neuronaler Netze in der Bildverarbeitung ermöglicht die Auswertung von Kamerabildern und befähigt Industrieroboter zum Einlegen von deformierbaren Objekten in schmale Kabelkanäle (Kinzel 2001) und selbstorganisierte neuronale Algorithmen verhelfen zu Farbpixelklassifikationen bei der Waferinspektion (Franke 2003).

Im Bereich des Offsetdruckes ist es gelungen, durch nichtlineare neuronale Modelle Farbeindrücke in einer Offsetdruckmaschine zu messen und die Ergebnisse zur Steuerung des Farbflusses in einer Zeitungsdruckmaschine anzuwenden (Englund 2003). Bei einem Ansatz von Faes wird gezeigt, dass das Neuronale Netz auf Basis der farbmetrischen Daten

der Reflexionsmessung des gefärbten Materials zuverlässige Vorhersagen über die visuelle Beurteilung machen kann (Faes 2002). Bei der Verwendung von Fuzzy-Systemen zur Beurteilung der Farbannahme im mehrfarbigen Offsetdruck zeigt sich, dass die Ergebnisse wesentlich besser mit dem visuellen Eindruck des Druckers übereinstimmen (Flemming 1996) (Flemming 1997a) (Flemming 1997b). Nutzt man ein Fuzzy-System zur Fehlerbewertung von Druckbildern in der Bildverarbeitung, können durch Unterteilung und separate Auswertung von Bereichen des Druckbildes lokale Druckstörungen erkannt werden (Flemming 2002).

Diese Ansätze motivieren und zeigen, dass es möglich ist, Verhaltensweisen und Maßstäbe von menschlichen Experten nachzubilden und in maschinell verarbeitbare Lösungen zu übertragen. Die derzeit geringe Anzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen über die Anwendung von intelligenten Technologien auf die Qualitätsbeurteilung von Druckprodukten begründet sich in dem innovativen, zeitmäßig jungen und alternativen Charakter dieses Wissenschaftsbereiches im Vergleich zu klassischen Methoden.

Diese Arbeit beschränkt sich auf die spezielle Anwendung intelligenter Technologien in der online-Druckbildkontrolle. Die Herleitung notwendiger Algorithmen bezieht sich dabei auf reelle Datensätze und ist auf Graustufenbilder beschränkt, bildet aber die Grundlage für die Entwicklung weiterer Algorithmen bzw. die Erweiterung auf Farbbilder. Die Modelle, Konzepte und die Entwicklung sollen insoweit vorgestellt werden, wie sie für die praktische Umsetzung notwendig sind. Die Aufstellung einer vollständigen theoretischen Betrachtung der verwendeten intelligenten Technologien liegt nicht im Rahmen dieser Arbeit (siehe Anhang). Vielmehr werden diese als Werkzeuge und deren Eignung für die Anwendung in dieser Arbeit betrachtet.

1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel der Arbeit liegt in der Untersuchung der Anwendbarkeit intelligenter Technologien in der online-Kontrolle im Weiterverarbeitungsprozess von Druckprodukten. Dabei fällt das Augenmerk auf die optischen Eigenschaften von Druckprodukten, die in einem automatischen Bildverarbeitungssystem ausgewertet werden sollen. Die Definition der Druckqualität, Verfahren zur Bestimmung dieser und das Urteil des Menschen bilden den Maßstab und den wesentlichen Anspruch an ein solches System. Untersucht werden daher die Messbarkeit der Druckqualität, die Unterschiede zu den subjektiven Beurteilungen und die Möglichkeiten vorhandener Bildverarbeitungssysteme. Ausgehend von den Anforderungen an ein Kontrollsystem aus Sicht der geforderten hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit und den wirtschaftlichen Randbedingungen in Bezug auf die technische Umsetzung soll ein Grundsystem vorgestellt werden. Aus dem Mangel an geeigneten Bildverarbeitungsfunktionen zur Bewertung von Druckprodukten wird auf Basis eines

Modells eines menschlichen Beobachters die Umsetzung der Erkennung einer Fehllage des Druckbildes mit Methoden der Fuzzy Logic vorgestellt. Mit Hilfe von Neuronalen Netzen wird das Expertenwissen zur Optimierung der Regelbasis verwendet und beurteilt. Die korrekte Lageerkennung des Druckbildes ist die Grundlage für die Erweiterung der Kontrolle auf weitere Merkmale. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich demzufolge an folgenden Teilaufgaben:

1. Zusammenstellung wesentlicher Aussagen und Definitionen der Druckqualität und Verfahren zur Bestimmung drucktechnischer qualitätsbestimmender Parameter.
2. Betrachtung des Herstellungsprozesses von Druckprodukten und die Möglichkeiten der Druckbildkontrolle sowie Ableitung von Anforderungen an ein Kontrollsystem und die Messsoftware.
3. Bildung eines Modells zur Bestimmung der Druckbildlage und deren Umsetzung mit intelligenten Technologien als Grundfunktion eines Druckkontrollsystems.
4. Implementierung des akquirierten Wissens und Anwendung der gefundenen Algorithmen auf Druckbilder und Bewertung der Ergebnisse.

2 Techniken zur Bewertung der Qualität von bedruckten Produkten

Die Qualitätsbewertung von Druckerzeugnissen stellt ein umfangreiches Aufgabengebiet dar. Der hohe Entwicklungsstand der Druckverfahren einerseits sowie die hohen Qualitätsansprüche andererseits erfordern eine wissenschaftlich begründete und wirtschaftliche Qualitätsbeurteilung der in der Druckindustrie hergestellten Produkte (Teschner 2003).

Die Suche nach dem Inhalt und der Bedeutung des Begriffes Druckqualität ist problematisch, da gegenwärtig sehr unterschiedliche, oft historisch bedingte Auffassungen zum Inhalt existieren. Die Unschärfe mancher wissenschaftlicher Begriffe sollte aber nicht als Mangel, sondern als Ausdruck der objektiven und bestimmbaren Möglichkeiten für die weitere Entwicklung gesehen werden (Helbig 1993). Aber je komplizierter und reicher ein Gegenstand oder ein Zusammenhang ist, desto reicher und vielsagender können seine Bestimmungen sein (Büttner 1969). Die Weiterentwicklung der Druckverfahren und die dadurch bedingte Weiterentwicklung der hergestellten Druckprodukte einerseits und die gestiegenen Anforderungen an gedruckte Produkte andererseits führen zu einer Anpassung der Anforderungen an die Druckqualität.

So versteht Büttner (Büttner 1969) unter der Qualität eines Druckerzeugnisses in Analogie zur bildmäßigen Fotografie den Grad der Übereinstimmung mit der abzubildenden Vorlage. Poulter (Poulter 1968) stellte sich die Frage nach dem Zweck der Informationsweitergabe und nach der Notwendigkeit, alle im fotografischen Bild enthaltenen Informationen unbedingt weitergeben zu müssen, und erkannte unter der Qualität eines Druckerzeugnisses den Grad der Übereinstimmung von bestimmten Kennzeichen des Druckerzeugnisses mit dem gewünschten Resultat. Beide meinen aber nur die Qualität des gedruckten Bildes, es fehlt die Definition eines Qualitätsmaßes und damit die zielgerichtete Beeinflussung des Prozesses für die Sicherung und Erhöhung der Druckqualität. Für die allgemeine Bestimmung der Qualität von Produkten gilt, nicht alle Eigenschaften sind qualitätsbestimmend, sondern nur die wesentlichen und die nicht wesentlichen Eigenschaften sind dadurch gekennzeichnet, dass sie in bestimmten Grenzen geändert oder sogar wegfallen dürfen, ohne dass das Produkt, dem sie angehören, aufhört, es selbst zu sein (Philosophisches Wörterbuch 1971).

Eine gut geeignete Definition ist somit: „Druckqualität ist die Gesamtheit der wesentlichen Eigenschaften beziehungsweise Merkmale eines Druckerzeugnisses, die den Grad seiner Eignung zur Übermittlung der dem Verwendungszweck entsprechenden Informationen unter Berücksichtigung der Ansprüche des Verbrauchers bestimmen.“ (Helbig 1980)

Qualitätskontrollen sind notwendig, um den gesamten Druckprozess und natürlich den Weiterverarbeitungsprozess prüfbar zu machen, um Aussagen über den Ist-Zustand des Druckerzeugnisses durch den Vergleich mit vorgegebenen Kennwerten zu erhalten. Ein besonderes Anliegen der Qualitätskontrolle besteht darin, sowohl Daten für die Güte der Produktionsergebnisse zu gewinnen als auch in immer zunehmendem Maße technische Aussagen zur Beeinflussung der Technologie zu erhalten, um die Produktionsqualität zu sichern und zu erhöhen. Das schließt neben der Wareneingangskontrolle und der Endkontrolle die Fertigungskontrolle ein. Diese wird von den Mitarbeitern der Arbeitsvorbereitung, der Qualitätssicherung, von Meistern und Schichtführern aber immer häufiger auch von Mitarbeitern der einzelnen Fertigungsabschnitte durchgeführt. Dies hat den entscheidenden Vorteil, die laufende Produktion im Interesse hoher Produktivität und Qualität sofort zu beeinflussen. Potenziale ergeben sich in der Automatisierung und Integration dieser Kontrolle direkt in den Herstellungsprozess – eine Beeinflussung der Druckqualität durch die Maschinensteuerung. Bereits während des Produktionsprozesses kann bei der Anwendung entsprechender Prüfmethoden der Entstehung von Ausschuss und Makulatur vorgebeugt werden (Teschner 2003).

Die wesentlichen Eigenschaften der Druckqualität leiten sich aus der Funktion des Druckerzeugnisses ab. Einer der wichtigsten Aspekte ist die Funktion der Informationsvervielfältigung und der Informationswiedergabe. Darüber hinaus ist ein subjektiver Faktor zu beachten, der sich aus der besonderen Nutzung, der visuellen Nutzung des Druckerzeugnisses, durch den Verbraucher abzeichnet.

2.1 Allgemeines zu Druckverfahren

Die Aufgabe einer Druckmaschine besteht darin, ein Farbmuster von einer Druckform auf den Bedruckstoff zu übertragen. Dazu müssen auf der Druckform die Flächen, die auf dem Druckerzeugnis einen Bildpunkt erzeugen, von jenen Flächen unterschieden werden, die zu keinem Bildpunkt führen. Anhand der Lage der druckenden und nichtdruckenden Flächen auf der Druckform werden drei Druckverfahren unterschieden: Tiefdruck, Durchdruck, Hochdruck und Flachdruck. Bedeutendstes Verfahren des Durchdrucks ist der Siebdruck. Beim Hochdruck werden die druckenden Flächen reliefartig aus der Druckform herausgearbeitet, z.B. Stempel. Der Flexodruck gehört zu den Hochdruckverfahren mit dem derzeitig höchsten Marktanteil unter den Hochdruckverfahren. Der Tiefdruck ist genau das Gegenteil dazu, hier befindet sich die Farbe in Nöpfchen, die druckenden Flächen liegen also tiefer als die nichtdruckenden (Sohnrey 2004). Im Flachdruck liegen die nichtdruckenden Flächen etwa in einer Ebene mit den druckenden. Bei der Unterscheidung der Flächen werden grenzflächenphysikalische Effekte ausgenutzt, die letztendlich auf der Abstoßung von Fett (Druckfarbe) und Wasser (Feuchtmittel) beruhen.

Wird das Druckbild von der Druckform direkt auf den Bedruckstoff aufgebracht, liegt ein direkter Druck vor. Von einem indirekten Druck wird dann gesprochen, wenn das Druckbild von der Druckform zunächst auf einen Zwischenträger und von dort auf den Bedruckstoff übertragen wird. Der indirekte Druck wird hauptsächlich im Flachdruck praktiziert. Es hat sich deshalb die Bezeichnung Offsetdruck für das indirekte Flachdruckverfahren eingebürgert. Der Zwischenträger ist im Allgemeinen ein im Vergleich zur Druckform relativ weiches Gummituch. Durch die Elastizität des Gummituches ergibt sich der Vorteil, dass auch raue Bedruckstoffe gut bedruckt werden können, da die Oberflächenrauigkeiten vom Gummituch ausgeglichen werden können. Entsprechend groß ist auch das mit dem Offsetdruckverfahren herstellbare Erzeugnisspektrum (bvdm 2004). So können Zeitungen, Bücher, ein- und mehrfarbige Prospekte sowie Etiketten, Verpackungen und Blech bedruckt werden. Grundsätzlich werden zwei Arten von Offsetdruckmaschinen unterschieden. Zum einen sind dies die Rollenoffsetmaschinen, bei denen endlose Papierbahnen verarbeitet werden (z.B. Zeitungsdruck). Zum anderen gibt es die Bogenoffsetmaschinen, die einzelne Bogen bedrucken (Michel 1998) (HDM 2004).

Zunehmende Verbreitung finden Digitaldruckverfahren. Zu den echten industriell genutzten Druckverfahren zählen der Tintenstrahldruck und die Elektrofotografie. Besonderheit dieser Verfahren ist die Verwendung von dynamischen Druckformen bei der Elektrofotografie und das dynamische Drucken ohne Druckform beim Tintenstrahldruck. Gemeinsamkeiten aller genannten Druckverfahren sind der industrielle Einsatz zur Herstellung von Massenprodukten und die Verwendung von bilddifferenzierenden Substanzen.

2.2 Druckqualität und ihre Messbarkeit

Die Druckqualität ist ein Bestandteil der Produktqualität. Sie wird im Gegensatz zu vielen anderen Qualitäten und Eigenschaften, beispielsweise dem Geruch, der Haptik oder physikalischen Eigenschaften, mit dem Auge erfasst und durch das subjektiv arbeitende menschliche Gehirn verarbeitet. Die Druckqualität hat also visuell wahrnehmbare Eigenschaften.

Visuelle Wahrnehmungen sind sehr komplex. Der Mensch verlässt sich im Alltag auf das, was er sieht. Optische Täuschungen und Phänomene zeigen aber auch, dass es notwendig ist, mit einer gewissen Skepsis den menschlichen Sinnen zu begegnen (Kanizsa 1979) (Metzger 1975). Ursachen liegen zum einen in der Physiologie des menschlichen Auges und der schon in den Prozessen der Bilderfassung und der Bildübertragung in dem Sehzentrum des menschlichen Gehirns stattfindenden Vorverarbeitung und Komprimierung der visuellen Reize (Abmayr 1994) (Schmidt 1995) (Hecht 2001). Zum anderen zeigt sich auch, dass bei der menschlichen Wahrnehmung der Kontext eine wichtige Rolle spielt.

Dies ist ein grundsätzlicher Unterschied zur technischen Verarbeitung von Bildinformationen, die typischerweise zunächst keinen Kontext kennt. Nicht nur die Art des Bildmotivs gehört zum Kontext, sondern auch die Erfahrungen und das Wissen des Betrachters. Die daraus entstehenden Mehrdeutigkeiten lassen sich mit einfachen Beispielen nachweisen (Hecht 2001). Es scheint so, als könnten Fachleute wie Laien gleichermaßen schnell sachkundige Urteile darüber abgeben, ob die Druckqualität gut oder schlecht ist, ob die Qualitätsanforderungen erfüllt oder nicht erfüllt werden (Helbig 1993).

Ist Druckqualität messbar? Die Frage ist provokatorisch, da hier zwei unvereinbare Sachverhalte miteinander verknüpft sind, nämlich die Messbarkeit und die Druckqualität. Jeder Beschäftigte der Druckindustrie meint zu wissen, was im Allgemeinen unter Druckqualität verstanden wird. Wenn er es wüsste, dann wäre die Druckqualität objektiv und verallgemeinerungswürdig. Aber es gibt über den Inhalt keineswegs einheitliche Auffassungen und der Sinn und Zweck einer exakten Definition werden angezweifelt. Es kann deshalb nicht etwas gemessen werden, was nicht exakt definiert ist. Das Messen setzt einen Maßstab voraus, die Messbarkeit ist an die Existenz eines entsprechenden Maßstabes gebunden. Es gibt kein Messgerät, das den komplizierten Sehvorgang simuliert und Messwerte entsprechend der menschlichen Empfindung liefert.

Im Allgemeinen wird die Notwendigkeit einer objektiven Qualitätsbewertung anerkannt, denn standardisierte technische Abläufe sind in einem modernen Druckprozess ohne die entsprechenden Messdaten nicht möglich. Quantitative Angaben sind für alle Teilprozesse unumgänglich und werden in Zukunft immer mehr an Bedeutung gewinnen (Helbig 1993) (Walenski 1991). Doch nicht nur Zahlenwerte sondern auch Funktionen sind Bindeglieder in und zwischen den Teilprozessen des Druckens. Sie stellen Eingangs- und Ausgangsgrößen und ihre funktionelle Abhängigkeit insgesamt dar. Problematisch erweist sich der Rückschluss von Messwerten auf die Druckqualität. Handelt es sich um die Bewertung der Druckqualität, so ist ein entsprechender Maßstab bei der Bewertung notwendig, der natürlich die Frage der Messbarkeit der Druckqualität einschließt. Deutlich werden diese Problematik und dieser Zusammenhang mit der messtechnischen Prüfung der Druckqualität. Die optische Dichte (s. Anhang A) und der Rastertonwert (s. Anhang A) sind messbare und eindeutig qualitätsbestimmende Größen. Die entsprechenden Messwerte dieser Größen lassen aber nur bedingt auf die Druckqualität schließen. So ist eine kleine Passerdifferenz (s. Anhang A) nicht das Kennzeichen für hohe Druckqualität, wenn zum Beispiel der Tonwertzuwachs (s. Anhang A) die zulässigen Werte überschreitet. Es besteht kein mathematisch beschreibbarer Zusammenhang zwischen einem einzelnen Messwert und der Druckqualität. Das ist auch begründet in der Charakterisierung der Druckqualität durch mehrere Merkmale, die erst in ihrer Gesamtheit den Güteeindruck vermitteln.

2.3 Visuelle Methoden der Qualitätsbewertung

Hat man ein beliebiges Druckbild und lässt dieses von einem Betrachter auf Qualitätskriterien hin beurteilen, wird dieser auf jeden Fall zu einem Ergebnis kommen. Wenn der Betrachter keine direkten Vergleichsmöglichkeiten besitzt, wird er etwas ihm Bekanntes oder ein Bild aus dem Gedächtnis zum Vergleich heranziehen und eine Aussage über die Qualität treffen.

Die visuelle Qualitätsbewertung der Druckqualität ist eine einfache Möglichkeit, mit geringem Aufwand zu einem praktikablen Qualitätsurteil zu gelangen (Teschner 2003). Normalerweise werden dabei keine Hilfsmittel benötigt, es wird nur beim Betrachten des Druckmusters durch das menschliche Auge ein Qualitätsurteil gefunden. Dieses Urteil ist von dem Betrachter, den Umgebungsbedingungen und natürlich von dem jeweiligen Prüfobjekt abhängig. Durch den Einfluss des Betrachters ist das Prüfergebnis stets subjektiv gefärbt.

Wenn diese Bewertung aber nicht von einem Menschen, sondern objektiv von einem maschinellen Bewertungssystem durchgeführt werden soll, gibt es einige Probleme zu lösen, die auf den ersten Blick trivial erscheinen, bei genauerem Hinsehen jedoch nur mit erheblichem Aufwand oder zum jetzigen Zeitpunkt überhaupt noch nicht befriedigend gelöst werden können.

Eine Unterscheidung der visuellen Methoden nach objektiven und subjektiven Methoden ist notwendig. Es gibt in diesem Zusammenhang oft Unklarheiten über die Definition von objektiv und subjektiv, deshalb werden hier die Begriffe subjektive Tests und objektive Qualitätsbeurteilungen unterschieden.

Subjektive Tests

Subjektive Tests haben einen hohen Stellenwert in der Beurteilung der Druckqualität. Eine wesentliche Aufgabe des Druckers ist die regelmäßige Kontrolle der Druckqualität. Dies geschieht durch den Vergleich eines gedruckten Bogens mit einem Andruck- oder Proofbogen (siehe Anhang A). Durch den Vergleich der Istwerte mit dieser Referenz versucht der Drucker Einstellungen an der Druckmaschine so zu verändern und anzupassen, dass das Druckergebnis so nah wie möglich die Referenz erreicht. Dieses Vorgehen wird immer als wesentlicher Bestandteil der Kontrolle der Druckqualität Bestand haben, im Zweifelsfall wird sich der Drucker auf sein Urteil verlassen und andere Beurteilungen oder Messungen als Unterstützung betrachten, bzw. im Fall eines grundlegend anderen Urteils diese ignorieren. Bei subjektiven Tests erfolgt die Beurteilung der Druckqualität durch psychologische Tests mit ausgewählten Personen. Dabei beziehen sich alle Maßstäbe auf das jeweilige Subjekt. Anschauungen, Erkenntnisse und Werte sind nur auf dieses bezogen. Der visuelle Wahrnehmungsvorgang, der von der Abbildung eines Bildes mit

Iris, Linse und Glaskörper auf die Netzhaut, über die Umwandlung der Lichtreize in Nervenimpulse (Stäbchen und Zapfen), über die Aufschaltung auf den Sehnerv, den Transport ins Sehzentrum bis zur Verarbeitung im Gehirn reicht, ist äußerst komplex und besonders der letzte Vorgang bei weitem noch nicht vollständig erforscht (Schmidt 1995). Um diesen Umstand zu umgehen, werden subjektive Tests an die verschiedenen Aufgaben der Qualitätsbestimmung speziell angepasst – ein Versuch der Objektivierung. Ein wesentlicher Nachteil ergibt sich jedoch im hohen Zeitaufwand. Ergebnisse solcher Versuche sind meist schwierig zu verallgemeinern und eine Wiederholbarkeit erfordert exakte Reproduktion aller wichtigen Parameter. Die Prüfbedingungen und die Methoden der subjektiven Tests der Qualitätsprüfung von Druckprodukten werden in Tabelle 1 erläutert:

Paarweiser Vergleich	Bei jeweils zwei gleichzeitig vorliegenden Druckproben wird ermittelt, welche besser als die andere ist oder ob beide Proben gleich gut sind. Die dabei den einzelnen Druckproben zugeordneten Punkte ermöglichen keine Bewertung der Qualität. Diese Methode ist nur für wenige Proben und eine geringe Anzahl von Beurteilern effektiv.
Methode der Rangordnung	Diese Methode umfasst das Ordnen der Druckproben hinsichtlich ihrer Qualität. Es erfolgt dabei ein Vergleich von gleichzeitig vorliegenden in Größe und Anzahl überschaubaren Proben, die entsprechend ihrer Qualität von „gut“ bis „schlecht“ geordnet werden.
Grenzmustermethode	Durch die Vorgabe von „Gut-“ und „Schlechtmustern“ kann jede einzelne Probe in entsprechende Qualitätsgrenzen einsortiert werden. Diese Methode ist gut geeignet für die Beurteilung eines qualitätsbeeinflussenden Parameters.
Methode der sukzessiven Intervalle	Diese visuelle Prüfung beruht auf einer Einstufung der Qualitätsempfindungen in vorgegebene Kategorien. In der Regel werden gleichartige Druckproben nach und nach durch fünf bis sieben verschiedene verbal beschreibende Formulierungen beschrieben.
Methoden der Wertminderungspunkte	Bei diesen Methoden werden einzelne durch Vereinbarungen vorgegebene Qualitätsparameter benotet. Anschließend wird aus den einzelnen Noten nach einer einfachen empirischen Beziehung die Druckqualität berechnet (Messing 1952, MacAulay 1955, Rogers 1958).

Tabelle 1: Subjektive Methoden zur Beurteilung der Druckqualität (Helbig 1993)

Bei der Anwendung dieser Methoden wird festgestellt, dass durch die verbale Formulierung von Urteilen fallweise Unsicherheiten beziehungsweise Meinungsverschiedenheiten auftreten, beispielsweise was unter der Formulierung „noch vertretbar“ zu verstehen ist. In jedem Fall ist das Ergebnis eng mit dem menschlichen Sensorsystem Auge und der Bildverarbeitung im Gehirn verbunden.

Der einfache subjektive Test – die Beurteilung des Istzustandes eines Druckes mit einer Referenz – wird auch bei einem optimalen Messsystem erhalten bleiben und wird somit immer als ein Maßstab für die Güte eines automatischen Messsystems zu betrachten sein. Zusammenfassend lässt sich weiter feststellen, dass bei allen Methoden der Maßstab zur Beurteilung der Druckqualität durch Muster vorgegeben ist, und damit der Vergleich immer relativ ist, aber dass trotz der Unsicherheiten durch unterschiedliche Personen und deren Maßstäbe sich nutzbares Expertenwissen in den Urteilen widerspiegelt. Eine direkte Ableitung oder Umsetzung dieser Methoden in eine automatische Kontrolle aller Druckbogen ist erst möglich, wenn der gesamte menschliche Sehvorgang verstanden ist.

Objektive Qualitätsbeurteilung

Eine objektive Qualitätsbeurteilung ist eine nachweisbare, tatsächliche, sachliche und allgemeingültige Beurteilung (Klien 1962). Soll eine Beurteilung also nicht von einem Menschen sondern objektiv von einem maschinellen Bewertungssystem durchgeführt werden, gibt es eine Reihe von Problemen. Ein erstes Problem bei der Beurteilung der Qualität von Druckprodukten stellt sich direkt bei der Vergleichsmöglichkeit: Womit soll ein solches System den erzeugten Druck vergleichen und welchen Maßstab soll es dabei ansetzen? Eine Lösung für das erste Teilproblem wäre eine unendlich große Produkt- und Bilddatenbank, die nach Objekten und Inhalten klassifiziert ist und bei der jedes Produkt oder jedes Bild auf alle möglichen Vergleichsparameter hin schon eine objektive Beurteilung erfahren hat. Dann treten aber schon die nächsten Probleme auf: Wie findet das maschinelle Bewertungssystem aus dieser unendlich großen Zahl von Vergleichsmöglichkeiten das richtige Objekt und welche Parameter sind in diesem Fall für die Bewertung relevant? Ein entsprechendes System müsste demnach erfassen, was wichtige visuelle Objekte und deren jeweilige Bewertungsmaßstäbe sind und beurteilen, welche zu vernachlässigen sind. Somit stellt sich das nächste Problem: Wie erkennt ein künstliches Beurteilungsverfahren, welche Regionen, Objekte und Strukturen eines Druckbildes wichtig sind und welche nicht? In jedem Fall wird sich ein System zuerst auf ein Modell abstützen müssen, das im Idealfall den menschlichen visuellen Wahrnehmungsvorgang von der optischen Abbildung des Bildes im Auge bis zur schlussendlichen Vorstellung im Gehirn exakt nachbildet. Da dieser Vorgang noch nicht vollständig erforscht ist und zu großen Teilen noch auf Theorien beruht, die heftig diskutiert werden (Schmidt 1995) (Steinbrecher 1993) (Schmid 1995), muss das Modell stark vereinfacht werden und dennoch zu guten Ergebnissen führen.

Bekannte Modelle und daraus abgeleitete Rechenmethoden zur Bewertung von Bildern verwenden kein Wissen in Form einer Datenbank. Vielmehr beruhen diese auf psychophysiologischen Modellen und bildanalytischen Methoden. Meist wird dabei ein Modell der menschlichen Wahrnehmung (Human Visual System - HVS) angewandt. Die Rechenmethoden arbeiten im Prinzip wie folgt: Ausgehend von der Darstellung eines Bildes wird eine neue, wahrnehmungsorientierte Darstellung generiert. Die wahrnehmungsorientierte Darstellung kann sich sowohl auf die Basisreize (Helligkeit, Farbe und andere) beziehen als auch komplexere Aspekte benutzen, wie eine Zuordnung zu Bildbereichstypen (z.B. Farbflächen). Die wahrnehmungsorientierten Darstellungen sind mehrdimensional. Für jedes „gestörte“ Bild werden die Unterschiede berechnet. Durch eine spätere Gewichtung in der Summierung der Bewertungen für einzelne Aspekte kann zum Beispiel auf einfache Art die visuelle Bedeutung einer Farbveränderung mit einer berechneten Veränderung in der Detailwiedergabe in Beziehung gesetzt werden. Die meisten Verfahren richten sich auf einzelne oder wenige veränderbare Aspekte zur Beurteilung (Hecht 2001) (s. Tabelle 2). Eine Anwendung auf eine vollständige Kontrolle der Druckqualität ist mit keinem dieser Verfahren möglich.

DCTUNE	benutzt die diskrete Kosinus Transformation (DCT). Bild und Referenzbild werden in lang- bzw. kurzwellige Anteile zerlegt. DCTUNE bewertet dann die Veränderung der Verteilung. Zusätzlich fließen empirisch ermittelte Gewichtungsfaktoren für die phänomenologische Bedeutung der Komponenten ein (Patent 1997).
S-CIELAB	hat das Ziel, Farbunterschiede zu bewerten. Es wird durch einen farbkanalabhängigen Weichzeichner die Physiologie des Auges berücksichtigt. Die über die CIELAB-Farbabstandsformel ermittelten Farbabstände ΔE werden summiert (Zhang 1998).
MCD	Mean Class Difference - ein selbstlernendes System, das Fuzzy-Zuordnungen nach Flächen, detailreichen Regionen, Verläufen und anderem im Bild vornimmt. Zur Bewertung wird der Betrag der Veränderungen der Klassenzuordnung berechnet (Mayer 1995).
BIFMA	Beim Bildfehlermaß wird das Bild in Regionen zerlegt und zwischen Kanten, flächenartigen und texturartigen Regionen unterschieden. Basierend auf dieser Segmentierung werden die jeweiligen Faktoren zum BIFMA-Wert verrechnet (Bock 1997) (Wilde 1996).
PQS	Bei der Picture Quality Scale werden fünf Eigenschaften genutzt und Gewichtungsfaktoren so bestimmt, dass eine optimale Anpassung an den Mean Opinion Score erreicht wird. Die Variante PQS II bewertet auch Unterschiede in Farbbildern (Miyahara 1998) (Kotani 1995).

Tabelle 2: Verfahren und Methoden der objektiven Bildbewertung

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass auch die objektive Qualitätsbeurteilung durch maschinelle Bewertungssysteme ein Modell benötigt, welches das menschliche Sehempfinden nachbildet. Die in Tabelle 2 dargestellten Methoden und Verfahren sind auf eine generelle Beurteilung von Bildern ausgerichtet, jedoch nicht auf das Spezialgebiet der Drucktechnik und sind, wie die subjektiven Methoden auch, an ein Referenzmuster gebunden und liefern dadurch ein relatives Maß als Ergebnis. Die Vielzahl der verschiedenen Verfahren zeigt, dass die Entwicklung eines objektiven qualitätsbeurteilenden Verfahrens nicht abgeschlossen ist und eine Spezialisierung der einzelnen Verfahren auf bestimmte Anwendungsfälle erfolgt (Flemming 1998). Bei der Entwicklung von Verfahren zur automatischen Kontrolle der Druckqualität wird die Verwendung einer Referenz und das Nachempfinden des menschlichen Sehempfindens ein wesentlicher Ansatzpunkt sein.

2.4 Messbare optische Eigenschaften von Druckprodukten

Das Verfahren zur Herstellung von Druckprodukten heißt nach DIN 16500 Drucken und ist die: „Vervielfältigung, bei dem zur Wiedergabe von Informationen (Bild und/oder Text) Druckfarbe auf einen Bedruckstoff unter Verwendung eines Druckbildspeichers (z.B. Druckform) aufgebracht wird“ (Walenski 1991). Aus dieser Definition und der Definition der Druckqualität lassen sich die wesentlichen und auf das Druckprodukt als Ganzes bezogenen nicht verzichtbaren Eigenschaften ableiten.

Fehler und Mängel sind keine wesentlichen Eigenschaften, vielmehr verzichtbare und unbedingt zu vermeidende Eigenschaften von Druckprodukten. Beispielsweise ist ein Dublee als Mangel keine wesentliche Eigenschaft. Tritt im Druckbild kein Dublee auf, kann noch nicht auf eine hohe Druckqualität geschlossen werden. Druckmängel werden hervorgerufen durch falsche technische Bedingungen. Diese sind grundsätzlich vermeidbar.

In der Fachliteratur gibt es zahlreiche Veröffentlichungen darüber, wie die Druckqualität durch messbare Einzeleigenschaften charakterisiert werden kann, und welchen Anteil diese sowohl einzeln als auch in ihrer Gesamtheit für die Beurteilung der Druckqualität haben (Kipphan 2000) (Walenski 1991) (Teschner 1997). In Tabelle 3 sind von Helbig die Ergebnisse solcher Betrachtungen zu einer rangfolgensortierten Übersicht der Qualitätskriterien zusammengefasst.

Rang 1:	Gleichmäßigkeit der optischen Dichte von Rasterflächen
Rang 2:	Gleichmäßigkeit der optischen Dichte von Volltonflächen
Rang 3:	Tonwertwiedergabe
Rang 4:	Farbwiedergabe und Detailwiedergabe
Rang 5:	Optische Dichte von Volltonflächen, Schärfe bzw. Gleichmäßigkeit von Linien und Rasterpunkten
Rang 6:	Passer und Glanz
Rang 7:	Rasterfrequenz, Gleichmäßigkeit des Glanzes, Farbe der Druckfarbe, Weißgrad und Farbe des Bedruckstoffes
Rang 8:	Gleichmäßigkeit des Weißgrades, Sättigung heller Farben und Graubalance

Tabelle 3: Bedeutung der Qualitätskriterien (Helbig 1993)

In modernen grafischen Betrieben wird zunehmend die Farbmessung (Farbmetrik) in die Qualitätsbewertung einbezogen. Mit einem definierten Farbsystem und einem geeigneten Messgerät wird das Ziel verfolgt, den visuellen Eindruck einer Farbe mit Farbmaßzahlen objektiv zu beschreiben und zu quantifizieren (Teschner 2003).

Diese Qualitätskriterien sind objektiv messbar und werden meist an Stichproben mit vorgegebenen Werten und deren Toleranzen verglichen. Auf dem Druckbogen werden spezielle Messfelder mitgedruckt. Diese sind für die Anwendung entsprechender Mess- und Kontrollmethoden unerlässlich. Erst dadurch sind exakte Messbedingungen definierbar und nachprüfbar. Üblich sind sowohl einzelne Kontrollelemente wie Passkreuze als auch komplexe Kontrollstreifen (Ugra-Offset-Testkeil), die Volltonfelder, Rastertonfelder, kombinierte Linienfelder und visuell kontrollierbare Elemente enthalten (Begriffserklärung siehe Anhang A). Teilweise werden einzelne Qualitätskriterien an jedem Druckprodukt während des Prozesses an solchen Kontrollfeldern gemessen und gesteuert, z.B. automatische Registerregelungen oder Systeme, die die optische Dichte von Volltonflächen regeln. Das Mitdrucken von Kontrollfeldern und Messelementen zur Kontrolle der Druckqualität, die Messung dieser und die daraus geschlossenen Schlussfolgerungen bedingen Einschränkungen und Annahmen:

1. Entsprechende Messfelder, entsprechende Messgeräte und Beurteilungsverfahren sind auf den entsprechenden Parameter der Druckqualität abgestimmt. Nur die Vollständigkeit ermöglicht eine Kontrolle. Es muss ein spezialisiertes Messelement

gedruckt werden, ein entsprechendes Auswerteverfahren vorhanden sein und ein Zusammenhang oder Rückschluss der Ergebnisse auf Parameter der Druckqualität möglich sein.

2. Eine Auswahl der Messelemente, eine Optimierung der Messorte (Platzierung auf dem Druckbogen) und deren Anzahl haben einen wesentlichen Einfluss auf die Relevanz der entsprechenden Messwerte. Der durch Messelemente benötigte Platz auf einem Druckprodukt bedeutet unverkäufliches Material. Dem steht eine Erhöhung der Aussagefähigkeit für den gesamten Druckbereich durch eine Steigerung der Anzahl der Messorte entgegen. In der Praxis erfolgt aus wenigen Messelementen und deren Messung eine Approximation auf eine Aussage für den gesamten Druckbogen.
3. Bei stichprobenartigen Kontrollen wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass alle Produkte, die zwischen zwei gemessenen Proben liegen und deren Messwerte der einzelnen Kriterien in den Toleranzen liegen, auch die gleiche Qualität aufweisen.

Natürlich schließt ein subjektives Qualitätsurteil eines Prüfers nicht nur die wesentlichen Eigenschaften von Druckprodukten ein, sondern auch die erkennbaren Mängel. Das Urteil wird schlecht ausfallen, wenn Mängel auf dem Druck vorhanden sind. Mängel und Fehler drücken die Unbrauchbarkeit des Produktes aus und schränken die Funktion der Druck-erzeugnisse hinsichtlich der Informationswiedergabe ein. Es gibt keine wissenschaftlich beweisbaren Beziehungen zwischen Druckmängeln und Druckqualität. Eine Qualitätskontrolle von Druckprodukten beinhaltet die Kontrolle von qualitätsbestimmenden Parametern und den Ausschluss von Fehlern und Mängeln.

Einen Beitrag zur Qualitätssicherung im Offsetdruck bietet der Prozessstandard Offsetdruck (bvdm 2005) und beschreibt Vorgaben und Methoden für einen standardisierten Herstellungsprozess.

Als Übersicht über mögliche Mängel und Fehler an Druckprodukten dient Tabelle 4.

Elementare Fehler:	<ul style="list-style-type: none"> – kein Druckbild vorhanden – Schimmelbogen – Makulatur, Einrichtbogen, Anlaufbogen, Auslaufbogen – Druckbild vertauscht, verdreht – Schön- oder Widerdruck vertauscht, verdreht, fehlt – Fehlen von Einzelprozessen (eine Farbe nicht gedruckt)
--------------------	--

Logistische Fehler:	<ul style="list-style-type: none"> – Auflage verwechselt, gemischt, verdreht – Makulatur untermischt – Schön- und Widerdruck von verschiedenen Auflagen – Chargen verwechselt
Mängel auf dem gesamten Druckbild, bzw. partielle Mängel im Druckbild:	<ul style="list-style-type: none"> – Dublieren, Schieben – Abschmieren, Abliegen – Tonen – Rupfen – Schablonieren – Butzen und Kratzer – Passerfehler – Tonwertschwankungen – Farbwertschwankungen
Bedruckstofffehler:	<ul style="list-style-type: none"> – Verwechslung – Schwankungen in optischen Eigenschaften – Orientierungsfehler (Laufrichtung, Oberseite und Unterseite vertauscht) – Materialfehler (z.B. Strichfehler)

Tabelle 4: Mängel und Fehler von Druckprodukten (Begriffserklärungen siehe Anhang A)

2.5 Schlussfolgerungen

Neben dem theoretischen und ingenieurtechnischen Interesse hat die Qualitätskontrolle von Druckprodukten hauptsächlich praktische und ökonomische Bedeutung. Der Anspruch, technische Vorgänge durch begleitende Messungen von physikalischen und chemischen Größen soweit exakt zu erfassen und zu berechnen, dass das Endergebnis des jeweiligen Vorgangs vorherbestimmt werden kann und damit auch der technische Vorgang der Produktion in Kenntnis der Messergebnisse so beeinflusst werden kann, dass ein gewünschtes Endergebnis reproduzierbar wird, ist unumstritten. Viele Produkte - so auch ein Druckprodukt - sind vielleicht von objektiven Messungen unabhängig, da die Qualität des Produktes letztendlich vom Betrachter, dem Kunden, bewertet wird. Der erfahrene

Drucker verlässt sich in der Regel nur auf sein Urteil und zwischendurch ausgeführte Messungen dienen im Zweifelsfall nur dazu, die Richtung einer willkürlichen Veränderung von Druckparametern zu bestimmen. Der ingenieurtechnische Versuch, durch Messungen, Verrechnung und entsprechende Steuerung den subjektiven Faktor Drucker zu ersetzen, ist mit den bisherigen Messmethoden nicht erfolgreich.

Verschiedene Verfahren und Methoden ermöglichen mit unterschiedlichen Ergebnissen und Schwerpunkten die Bestimmung der Druckqualität bzw. der Bildqualität. Bei den subjektiven Tests beurteilt der Mensch durch visuelle Abmusterung und Vergleich mit einem Referenzbild die Qualität, bei den objektiven Testverfahren wird durch die Anlehnung an ein physiologisches Modell und den Vergleich mit einer Referenz ein Qualitätsurteil gebildet. Beiden Methoden sind gemeinsam, dass eine Kontrolle aller Produkte unwirtschaftlich ist und durch den Bezug auf die Referenz kein absolutes Maß für die Druckqualität ermittelt wird.

Der Zusammenhang von messtechnisch erfassbaren Größen, deren Einfluss auf die Druckqualität und die eigentliche Relevanz der einzelnen Größe ist nicht direkt gegeben. Die Druckqualität ist nicht messbar und wird durch die Einhaltung, Kontrolle und Steuerung einzelner Qualitätskriterien beeinflussbar. Es bleibt bei dem Gelehrtenstreit, ob es überhaupt Objektivität jenseits der subjektiven Wahrnehmung der Druckqualität gibt. Eine isolierte Betrachtung der Druckqualität innerhalb oder direkt neben dem Druckprozess zeigt die wesentliche Bedeutung der Bestimmung der Druckqualität zur Einflussnahme auf das Druckergebnis. Fehler und Mängel am Druckprodukt sind nicht Bestandteil der Druckqualität, diese sind nicht in der Definition enthalten. Es lässt sich weder durch Ausschluss von Fehlern und Mängeln noch vom Grad der Fehler und Mängel direkt auf die Druckqualität rückschließen. Wenn aber der Druckprozess als ein Teil des Gesamtprozesses zur Herstellung von Produkten betrachtet wird, bekommen Fehler und Mängel eine wesentliche Bedeutung.

Für eine vollständig automatische Kontrolle der Druckqualität gilt es zu berücksichtigen:

1. Die Druckqualität ist Voraussetzung für eine gute Gesamtqualität des Endproduktes.
2. Eine allgemeingültige Definition bzw. mathematische Formel, die aus Messwerten physikalischer Größen die Druckqualität bestimmt, gibt es nicht.
3. Es wird davon ausgegangen, dass jedes Produkt unterschiedliche Qualitätsmerkmale besitzt und sich jeweils unterschiedliche Toleranzen ergeben.
4. Die manuelle visuelle Kontrolle jedes einzelnen Druckbogens dient als Verarbeitungsmodell für eine technische Umsetzung. Durch den Vergleich des Prüflings mit einer Referenz müssen Fehler und Mängel erkannt werden.

5. In einem modernen standardisierten Druckprozess kann durch die Kontrolle wichtiger Druckparameter und Qualitätsparameter an Stichproben davon ausgegangen werden, dass Produkte, die zwischen zwei Stichprobenmessungen liegen, auch die gleiche Qualität aufweisen wie die Stichproben.

Standardisierung, Festlegung von Toleranzen für messbare Einflussgrößen und die Kombination mit der Erfassung visuell eindeutiger Kriterien bilden die derzeitige Grundlage für die Bestimmung der Druckqualität. Wissenschaftliches Ziel ist zunächst, die visuellen Kriterien in ein objektives Messverfahren zu überführen. Dies bildet Voraussetzungen für die Umsetzung einer vollständigen Kontrolle der Druckqualität. Grundlage wird ein brauchbarer objektiver Maßstab für die Beurteilung der Druckqualität bilden.

3 Kontrolle von bedruckten Produkten

Aus der Feststellung, dass die Druckqualität nicht direkt messbar ist, jedoch durch eine Kombination aus Messungen von qualitätsbestimmenden Größen und der visuellen Beurteilung durch den Drucker während des Druckprozesses gewährleistet werden kann, ergibt sich die Frage nach dem Sinn einer Kontrolle des gedruckten Produktes in weiteren Herstellungsprozessen. In diesem Kapitel der Arbeit wird über die Betrachtung des Gesamtherstellungsprozesses, am Beispiel einer bedruckten Faltschachtel, die Notwendigkeit einer dem Druckprozess nachgelagerten Druckbildkontrolle dargestellt (Flemming 2000). Die sich ergebenden grundlegenden Anforderungen an ein System der Druckbildkontrolle fließen in die Formulierung eines Grundsystems ein.

3.1 Herstellung von bedruckten Produkten

Bei der Herstellung von bedruckten Produkten ist der Druckprozess nur ein Bestandteil des Gesamtherstellungsprozesses. Bei der allgemeinen Betrachtung des Prozesses zur Herstellung von bedruckten Produkten ergibt sich folgendes Grundmuster:

1. Verarbeitungsprozess I,
2. Zwischenprozess (Handhabungsvorgang) und
3. Verarbeitungsprozess II.

Typische Verarbeitungsprozesse sind:

- Schneiden und Trennen (Planschneiden, Stanzen, Perforieren),
- Umformen (Rillen, Prägen, Falzen),
- Fügen (Kleben),
- Beschichten (Drucken, Siegeln, Lackieren, Kaschieren).

Zu den Zwischenprozessen und Handhabungsvorgängen in der Drucktechnik zählen:

- Speichern (Stapel bilden),
- Fördern (Transportieren),
- Vereinzeln (Bogenschuppe bilden).

Entsprechend der jeweiligen Verarbeitungsaufgabe sind diese Teilprozesse in Ablauf und Struktur miteinander verknüpft (Gruhn 1978). Die weiteren Betrachtungen beziehen sich auf das Beispiel der Faltschachtelherstellung (s. Abbildung 1).

Dieser Herstellungsprozess gliedert sich in folgende Teilprozesse:

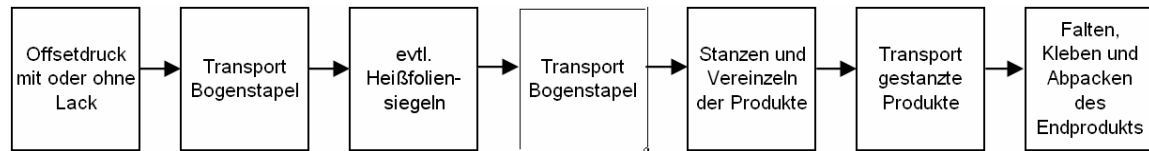


Abbildung 1: Prozessschabild Faltschachtelherstellung

Bei jedem dieser Verarbeitungs- und Zwischenprozesse können Fehler auftreten. Besteht der Herstellungsprozess eines Druckproduktes - wie der einer Faltschachtel - aus mehreren Verarbeitungsprozessen, so steigt mit einem komplexeren Gesamtprozess auch die Anzahl der Fehlerquellen. Durch die Multiplikation von Fehlergrößen jedes einzelnen Prozesses führt ein im Teilprozess nicht entdeckter Fehler zu einer proportionalen Steigerung der Anzahl von fehlerhaften Endprodukten. Je später in diesem Gesamtprozess kontrolliert wird, desto größer wird auch der wirtschaftliche Schaden, denn es bedeutet immer einen Verlust an Produktivität und an Material. Wird ein in der Herstellung unentdeckter Fehler erst vom Kunden erkannt, kann dies den Verlust eines Folgeauftrages oder der Verlust eines Kunden für den Hersteller bedeuten.

Mit einer Kontrolle der Zwischenprodukte zwischen jedem Verarbeitungsteilprozess ergeben sich Vorteile. Jeder Verarbeitungsteilprozess ist kostenintensiv, die Weiterverarbeitung von fehlerhaften Produkten kann durch rechtzeitiges Ausschleusen von fehlerhaften Zwischenprodukten reduziert werden. Eine Qualitätskontrolle eines bestimmten Verarbeitungsprozesses kann nach weiteren Verarbeitungsschritten sehr kompliziert bzw. unmöglich sein z.B. bei innen liegenden Bedruckungen nach dem Zusammenkleben der Faltschachtel. Letztendlich ist eine erfolgreiche Bestätigung der Qualität des Zwischenproduktes eine Voraussetzung für die Qualität des Endproduktes und der gesamten Auflage oder Charge. In der Druckindustrie kommt damit auf immer mehr Betriebe eine Chance und Anforderung besonderer Art in Form von Kundenforderungen zu. Die Pharmaindustrie verlangt von den Verpackungsdruckern immer häufiger im Rahmen der Produkthaftung eine Zertifizierung nach ISO/DIN 9000 bis 9004. Diese Zertifizierung ist nicht ein einfaches Prüfsiegel, sondern sie muss in einer gewissenhaften, streng kontrollierten Prozedur erarbeitet werden. Zu den Ergebnissen gehört eine stetige, lückenlose und sorgfältige messtechnische Überwachung der Produktion und Dokumentation (Helbig 1993). Diese muss sowohl verarbeitungsprozessbedingte wie auch zwischenprozessbedingte Mängel erfassen können.

In der modernen industriellen Produktion kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass der einzelne Verarbeitungsteilprozess an sich kontrolliert und gesteuert wird. In dem jeweiligen Verarbeitungsprozess werden jedoch meist nur die für diesen Teilprozess relevanten Kontrollen und Steuerungen vorgenommen. Zum Beispiel besitzt

eine Druckmaschine eine Doppelbogenkontrolle, kontrolliert aber nicht, ob der Druckbogen schon bedruckt ist. Betrachtet man den Herstellungsprozess von bedruckten Faltschachteln, so ergeben sich durch die Trennung der Arbeitsschritte Drucken und Stanzen zusätzliche Kontrollgrößen (Biedermann 2004). So ist für den Stanzprozess irrelevant, was auf den Bogen gedruckt wurde. Für das Endprodukt ist es jedoch wichtig, dass im Stapel die gestanzten Produkte alle gleich sind und keine Untermischungen stattfinden. Es sind somit nicht nur Kontrollen des jeweiligen Verarbeitungsprozesses notwendig, sondern auch durch oder in Zwischenprozessen entstandene Fehler müssen vor einem weiteren Verarbeitungsprozess ausgeschlossen werden. Ein schwerwiegender Mangel in der Herstellung von Faltschachtelzuschnitten ist die Untermischung innerhalb einer Auflage. Die Ursachen sind vielfältig:

- Materialverwechslungen durch falschen Bedruckstoff oder Materialuntersmischungen
- Nichtaussortierte Makulatur oder Vorlaufbogen vom Einrichten der Druckmaschine
- Unbedruckte Bogen, unbedruckte Vorder- oder Rückseiten
- Schöndruckseite und Widerdruckseite verwechselt
- Untermischungen innerhalb der Auflage
- Sprachverwechslungen, Auftrags- oder Kundenverwechslungen
- Verdrehte Bogen

Eine Kontrolle des einzelnen Druckproduktes als Zwischenprodukt innerhalb eines Gesamtprozesses auf Fehler und Mängel ist vor einem Weiterverarbeitungs- oder Veredlungsschritt sinnvoll. Um letztendlich den Einfluss von Fehlern und Mängeln sowie der Druckqualität auf die Qualität des Endproduktes so gering wie möglich zu halten und damit eine aufwendige manuelle (visuelle) Kontrolle abzulösen sowie Kosten- und Marktvorteile zu erreichen, ist eine Kontrolle des Druckbildes nach dem Druckprozess und vor dem Weiterverarbeitungsprozess wirtschaftlich und technisch gesehen sinnvoll. Um auch Mängel und Verwechslungen zu identifizieren eignet sich eine Druckbildkontrolle. Es ergibt sich die Möglichkeit der Kontrolle vor dem Stanzprozess oder vor einem späteren Verarbeitungsprozess.

3.2 Möglichkeiten der Druckbildkontrolle

Aus dem Mangel der Messbarkeit der Druckqualität und den daraus folgenden Mängeln entsprechender Messsysteme und der dennoch notwendigen objektiven Kontrolle des Druckbildes ergibt sich eine Möglichkeit – die Druckbildkontrolle. Allgemein betrachtet wird unter einer Druckbildkontrolle die maschinelle Prüfung von gedruckten Elementen durch Kamerasysteme mit einer folgenden Bildverarbeitung und Mustererkennung angesehen. „Aus der Sicht der Bildverarbeitung und Mustererkennung ist die Begutachtung

von Printmedien jeglicher Art nicht als trivial anzusehen. Diese Aufgabenstellung wird unter anderem in der Richtlinie VDI/VDE 2632 Blatt 1 (VDI 01) als Aufgabe hoher Komplexität, bzw. besonderer Anforderung definiert.“ (Lohweg 2003)

Systeme und Verfahren zur Druckbildkontrolle lassen sich in Klassen einteilen: indirekte Druckbildkontrolle, geometrische Druckbildkontrolle und vollständige Druckbildkontrolle. Liegt die Anwendung eines Druckkontrollsystems außerhalb der Druckmaschine in einer Weiterverarbeitungsmaschine, handelt es sich überwiegend nicht um Bahnbeobachtungssysteme, deren Einsatzgebiet auf der Kontrolle von bahnförmigen Bedruckstoffen in Rollendruckmaschinen liegt. Eine Ausnahme in Bezug auf die Verwendung eines Kamerasystems mit entsprechender Auswertung ist die manuelle Kontrolle.

Manuelle Druckbildkontrolle

Einfachste und älteste Möglichkeit der Druckbildkontrolle ist die manuelle Einzelbogen- bzw. visuelle Sichtkontrolle. Dabei kommt meist keine Messtechnik zum Einsatz, jeder Bogen oder jedes Produkt wird durch einen menschlichen Beobachter kontrolliert. Qualifizierte und geübte Beobachter sind in der Lage, recht schnell und in engen Toleranzen die Druckqualität zu bestimmen. Gerade eine Kontrolle von zwischenprozessbedingten Mängeln erfolgt sehr zuverlässig. Nachteilig an einer solchen Qualitätskontrolle sind subjektive, erfahrungsbedingte und ermüdungsbedingte Unterschiede der Urteile sowie hohe Personalkosten und aufwendige Protokollierung (IfaDo 2001).

Indirekte Druckbildkontrolle

Bei der indirekten Druckbildkontrolle werden nicht das Druckbild allgemein, sondern spezielle Druckbildbereiche kontrolliert. Es werden entsprechend definierte maschinenlesbare Elemente mitgedruckt und ausgewertet, die definierte messbare Eigenschaften besitzen und nicht zwangsläufig zum eigentlichen Druckbild gehören. Diese Elemente sind sowohl auf die Messgröße als auch auf das Messsystem optimal angepasst. Mit Druckkontrollstreifen, die einen festgelegten geometrischen Aufbau besitzen, können drucktechnische Parameter wie Farbe und Register vermessen werden (s. Abbildung 2). Spezielle Codierungen wie Strichcodierungen ermöglichen eine Identifizierung des Druckproduktes und können somit Verwechslungen verhindern. Bei diesem Verfahren muss durch die messtechnische optische Auswertung von Messfeldern, die die relevanten Eigenschaften des Druckbildes repräsentieren müssen, auf die Druckqualität des gesamten Druckbildes wie auch auf die Identität des Druckbildes geschlossen werden. Die damit verbundenen Schwierigkeiten ergeben sich sowohl im Platzbedarf solcher Messmarken wie auch in dem Datenhandling von Codierungen für die Identifizierung von Druckprodukten (s. Abbildung 3). Ein hoher administrativer Aufwand sowie die zwingende Anwendung der speziellen Messmarken und damit verbundener Makulatur sind für dieses Verfahren nachteilig. Problematisch ist auch die Tatsache, dass mit der heute verfügbaren

Messtechnik zwar wesentliche qualitätsbestimmende Merkmale, meist aber nicht Fehler oder Mängel, wie beispielsweise partielles Tönen, erfasst werden können.



Abbildung 2: Druckkontrollstreifen (Griepsch 2002)

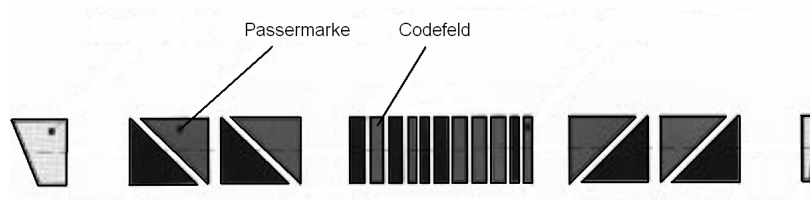


Abbildung 3: Maschinenlesbares Kontroll- und Identifizierungselement (Biedermann 2004)

Geometrische Druckbildkontrolle

Die geometrische Druckbildkontrolle erfasst wesentliche Merkmale direkt aus dem gedruckten Bildbereich. Alle Kontrollgrößen werden dabei auf eine primäre Lagebestimmung zurückgeführt. Mit solch einem Verfahren werden eine Druckbildidentifizierung, eine Vollständigkeitsprüfung der zu druckenden Elemente und deren Positionskontrolle durchgeführt. Über die Helligkeitswerte der gemessenen Elemente kann ein indirekter Zusammenhang zur Farbintensität ermittelt werden. Beim Einsatz eines Farbkamerasystems können in gewissen Grenzen auch zwischen den einzelnen gedruckten Farben und deren jeweiligen Intensitäten unterschieden werden (Druckkontrollsystem „FleyeVision Carton Expert“) (Vision Experts 2004). Durch spezielle Beleuchtungsoptionen (Durchlicht, Auflicht, Hell- und Dunkelfeldbeleuchtung) und Anpassungen in der Auswertung kann der kontrollierbare Merkmalsraum bis zu nicht sichtbaren Sicherheitsmerkmalen oder auf lackierte Bereiche erweitert werden. Eine weitere Spezialisierung ist die Messung von variablen Daten wie fortlaufende Seriennummern (Druckkontrollsystem PrintInspector) (Hättich 2004). Ökonomische und bautechnische Vorgaben können eine Einschränkung auf die Messfläche oder die Messauflösung haben.

Wesentliche Unterschiede bestehen auch im Automatisierungsgrad. Beim Druckkontrollsystem „AVS 2XX“ der Firma argus erfolgt ausschließlich eine Kontrolle von manuell festgelegten Objekten (Argus 2004).

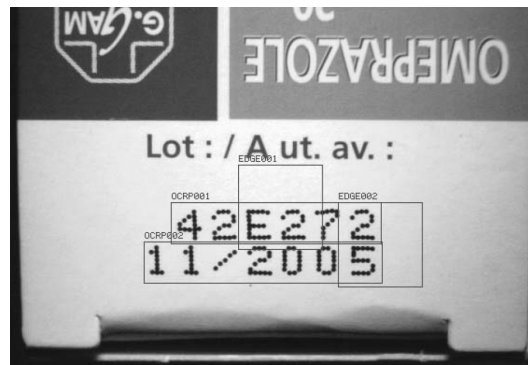


Abbildung 4: Manuell ausgewählte Kontrollobjekte (Argus 2004)

Vollständige Druckbildkontrolle

Durch den Einsatz einer komplexen Ganzbogenkontrolle ist sowohl die Erfassung der Druckqualität als auch die Erkennung von falschen Druckprodukten möglich. Jedoch bedingen die sehr hohen Anschaffungskosten wie auch die langsame Verarbeitungszeit solcher Systeme entweder eine Stichprobenkontrolle (beispielsweise nur jedes zehnte Produkt) oder den Einsatz in Spezialgebieten wie der Wertpapierherstellung.

Der Einsatz solcher vollständigen Druckkontrollsysteme, die Farbe messen können und auch eine normgerechte automatische Druckqualitätkontrolle ermöglichen, wird nicht nur durch wirtschaftliche Aspekte begrenzt. Die Funktionalität hängt im großen Maß von den Sensoren und der Auswertung ab. Eine Weiterentwicklung auf diesem Gebiet und die Entwicklung eines Verfahrens zur Messung der Druckqualität mit der Möglichkeit der realen Rückkopplung in den Druckprozess sind wesentliche Voraussetzungen für eine vollständige Druckbildkontrolle. Am weitesten entwickelt auf dem Gebiet der Ganzbogenkontrolle sind Systeme, die direkt in die Bogendruckmaschine (s. Abbildung 5 und Abbildung 6) integriert sind und damit eine sehr frühzeitige Kontrolle des Druckbildes im Gesamtherstellungsprozess durchführen. Vorteilhaft für die Kontrolle ist die stabile Bogenposition durch den noch im Greiferschluss befindlichen Bogen. Keines dieser Systeme ist für den Einsatz in Weiterverarbeitungsmaschinen entwickelt worden. Der Einsatz ist durch die jeweilige Baugröße der Kameraeinheiten und deren notwendigen Betrachtungsabständen begrenzt. Wesentliche Voraussetzung für den Einsatz in Weiterverarbeitungsmaschinen ist eine sehr kurze Verarbeitungszeit und ein in den zulässigen Lagetoleranzen (bis zu 3 mm) des Weiterverarbeitungsprozesses arbeitender Auswertalgorithmus.

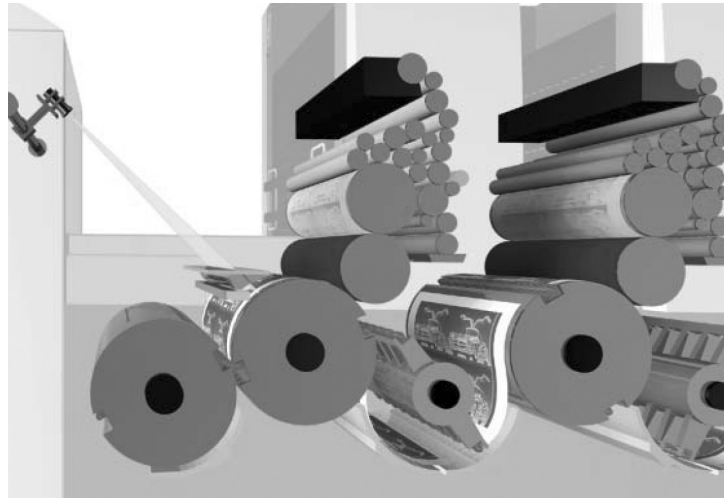


Abbildung 5: Inline-Bogeninspektionssystem Qualitronic II (Koenig & Bauer AG 2004)

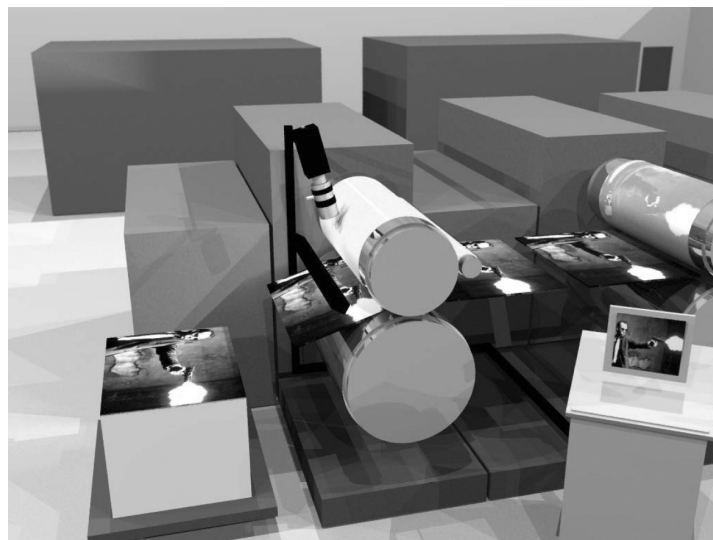


Abbildung 6: Inspektionssystem Expert 4000 in Bogendruckmaschine (Vision&Control 2001)

Der geometrischen und vollständigen Druckbildkontrolle gemeinsam ist der direkte Zusammenhang zwischen der Kontrollqualität und dem entsprechenden Auswertalgorithmus. Die Vielfältigkeit der Druckprodukte und die Varianten von möglichen Druckfehlern erfordern hohe Flexibilität an die Kontrolle. Dabei sollte die Güte der Entscheidungen so nah wie möglich an die subjektiven Maßstäbe des Menschen angepasst sein. Eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit soll eine 100 %ige Kontrolle der Produktion erlauben. Nachteile des Sensorsystems und der Beleuchtung durch die Wahl von ökonomischen Baugruppen können in dem Auswertalgorithmus zwar nicht vollständig ausgeglichen werden, können aber durch intelligente Anpassung auf die Kontrollaufgabe optimiert werden.

Neben den technischen und prozessbedingten Anforderungen, stellen die wirtschaftlichen und anwendungsorientierten Anforderungen besondere Anforderungen an eine Inline-Kontrolle von bedruckten Produkten.

Zu den allgemeinen Anforderungen eines Inline-Kontrollsystems zählen Autonomie, Fehlertoleranz, einfache Bedienung, breites Anwendungsgebiet, Parametrierung, Protokollierung und Auswertung der Messwerte.

Zu den speziellen Anforderungen einer Inline-Kontrolle der Druckqualität vor einem Weiterverarbeitungsprozess wie dem Bogenstanzen gehören die Kontrolle der Druckbildposition, Kontrolle von wesentlichen Merkmalen des Druckbildes und die Identifizierung des Druckbogens, um unterschiedliche Chargen auseinander zu halten. Handelt es sich um beidseitig bedruckte Zwischenprodukte ist die Möglichkeit der Kontrolle beider Bogenseiten vorzusehen.

Zu den wichtigsten wirtschaftlichen Anforderungen eines Inline-Kontrollsystems zählen die Industrietauglichkeit und damit die Möglichkeit eines dauerhaften Einsatzes, eine einfache bauliche Integrationsmöglichkeit in die Verarbeitungsmaschine und eine universelle Signalschnittstelle zur Kommunikation mit der Verarbeitungsmaschine. Der modulare Aufbau und die Verwendung von Standardkomponenten sollen den allgemeinen Forderungen nach niedrigen Investitionskosten, geringen Betriebskosten und hoher Zuverlässigkeit entgegenkommen. Unter diesen Gesichtspunkten kann eine Beschränkung auf einen kleineren Kontrollbereich des Produktes folgerichtig sein. Technisch machbare größere Kontrollbereiche bedingen höhere Kosten für ein solches Kontrollsystem und schränken zusätzlich durch benötigten Bauraum die Anwendungsmöglichkeiten ein.

Unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen soll im Rahmen dieser Arbeit als Kontrollsystem im Weiteren ein geometrisch arbeitendes System betrachtet werden. Die Überlegungen lassen sich unter dem Aspekt der Verallgemeinerung auch auf ein System der vollständigen Druckbildkontrolle übertragen und stellen eine Schnittmenge beider Systeme dar.

Grundfunktionen eines Kontrollsystems des Druckbildes sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Diese sind auf eine Kontrolle und Identifizierung des Druckbildes im Weiterverarbeitungsprozess ausgerichtet. Für andere speziellere Aufgaben lassen sich diese Funktionen erweitern, beispielsweise auf den gesamten Druckbereich oder durch den Einsatz von Farbsensoren auf eine Bewertung der gedruckten Farbe.

Hauptfunktionen:	<p>Verwendung des Druckbildes als wesentliches Merkmal - durch Vergleich mit einer Referenz werden fehlerhafte Produkte erkannt</p> <p>Kontrolle des vorangegangenen Druckprozesses durch Messungen am Druckbild auch ohne spezielle Messmarken zur Erfassung der Druckqualität</p> <p>Identifizierung des Druckproduktes durch Messung im Druckbild und damit auch eine Kontrolle von Zwischenprozessen (Verwechslung, Lage und anderes)</p> <p>Aus der Messung in einem repräsentativen Teilbereich des Druckbogens wird auf die Qualität des gesamten Druckbogens geschlossen.</p> <p>Der Einsatz in Weiterverarbeitungsmaschinen erfordert eine lagetolerante Kontrolle des Druckbildes innerhalb der prozessbedingten Toleranzen.</p>
Nebenfunktionen:	<p>Bestehen keine wesentlichen bzw. messbaren Unterschiede zwischen zwei Produkten, sollen durch eine Erfassung von Codierungen bzw. eine inhaltliche Kontrolle fehlerhafte Produkte erkannt werden.</p> <p>Maßstab für die Qualität der Kontrolle soll mindestens die visuelle Einzelbogenkontrolle sein.</p> <p>Die Geschwindigkeit des Messvorgangs muss eine Kontrolle aller Produkte ermöglichen.</p> <p>Der Zeitpunkt der Messung muss durch den Verarbeitungsprozess steuerbar sein.</p>

Tabelle 5: Funktionen eines Druckkontrollsystems

3.3 Beschreibung des Grundmesssystems

Bei der Kontrolle des Druckbildes sollen optische Eigenschaften bewertet werden. Der Druckprozess kann als Informationsübertragungsprozess aufgefasst werden, bei dem die optischen Informationen in der Form von Bild und Text von einem Informationsträger (Druckform) auf einen anderen Informationsträger (Produkt) übertragen werden. Damit gehören die meisten Mess- oder Kontrollgeräte zu den optischen Geräten.

Aufgaben, die sich mit der Erzeugung, der Manipulation und der Auswertung von Bildern oder Bildfolgen beschäftigen, werden als Bildverarbeitung bezeichnet. Ein wesentliches Gebiet der Bildverarbeitung ist die Bildanalyse und Mustererkennung. Bezieht sich die Auswertung von Bildern auf die Analyseaufgabe, die Ermittlung der Qualitätsmerkmale eines Objektes, spricht man von Bildanalyse. Qualitätsmerkmale von Objekten können die Position der Objekte, geometrische Merkmale, Helligkeitsunterschiede oder Texturmerkmale sein.

Das Grundsystem zur Kontrolle des Druckbildes ist ein Bildverarbeitungssystem mit einem Flächensensor. Ein Bildverarbeitungssystem besteht aus folgenden allgemeinen Komponenten (Nawrath 2001): Beleuchtungseinrichtung, Abbildungsoptik, optischer Flächensensor, Framegrabber, Bildprozessoren und ein Rechnersystem mit Betriebssystem und einer Bild- und Messsoftware. Für eine Rückkopplung in die Verarbeitungsmaschine wird ein Interface zur Ansteuerung einer Maschinenschnittstelle notwendig. Diese Grundstruktur ist als Schema in Abbildung 7 dargestellt.

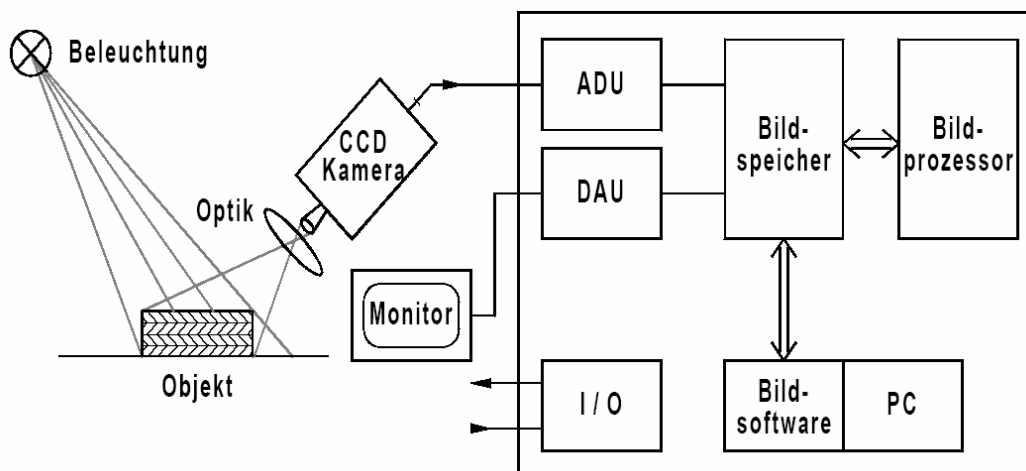


Abbildung 7: Struktur eines Bildverarbeitungssystems (Nawrath 2001)

Für die spezielle Aufgabe der Kontrolle von bedruckten Produkten in einem Weiterverarbeitungsprozess und unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen und Randbedingungen ergibt sich folgender zweckmäßiger Aufbau:

- Spezielle indirekte Dombelichtung mit LED zur Vermeidung von Reflexionen und den Einfluss von Fremdlicht (Nawrath 2001) (Vision&Control 2001)
- Weitwinkelobjektive ermöglichen geringen Abstand zum Objekt und verringern damit den Einfluss von Fremdlicht und den Einfluss von Schwingungen
- Triggerbare Kamera (Field-on-demand bzw. Restartfunktion) zur schnellen und taktgebundenen Aufnahme der Objekte
- Dual-Framegrabber zur Ansteuerung von Kameras und Digitalisierung der Kamerasignale von zwei Sensoren
- Industrietauglicher PC mit Schnittstellenkarte für Ein- und Ausgangssignale
- Eine Bildverarbeitungs-(Mess-)Software

In Abbildung 8 ist ein praktisches Beispiel für den Einbau einer Druckbildkontrolle auf dem Anleger einer Bogenstanzmaschine dargestellt. Der Sensor ist dabei auf den vordersten Bogen der Schuppe ausgerichtet. Von der Verarbeitungsmaschine wird ein Messsignal generiert, wenn der Bogen den Ausrichtevorgang abgeschlossen hat.

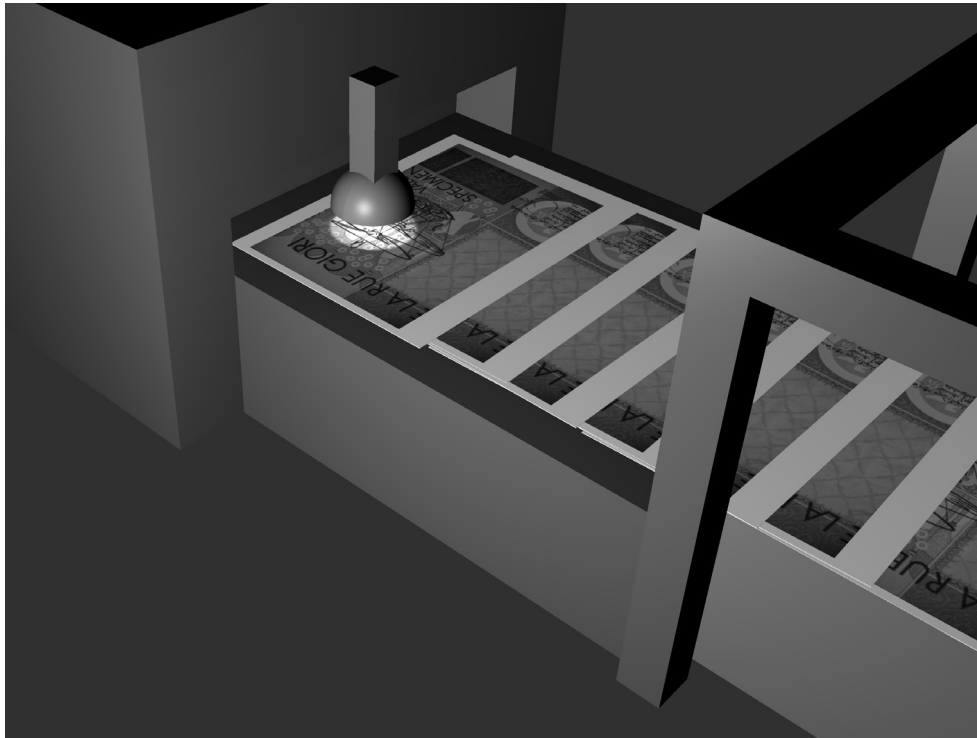


Abbildung 8: Druckbildkontrolle auf dem Anleger einer Bogenstanzmaschine (nach PITSID 2005)

3.4 Beschreibung der Messsoftware

Grundaufgabe eines Systems zur Online-Kontrolle von bedruckten Bogen ist die automatische Erfassung und Auswertung des Druckbildes. Diese lässt sich in die Aufgabstellungen Identifikation, Positionserkennung, Vollständigkeitsprüfung und Oberflächeninspektion untergliedern. Die klassischen Aufgaben der Identifikation und der Positionserkennung in Bildverarbeitungssystemen dienen primär der Verbesserung der Prozessqualität und damit der Kostenreduktion, dadurch, dass sie den Automatisierungsgrad bzw. die Zuverlässigkeit (Prozessgenauigkeit) erhöhen. Vollständigkeitsprüfung und Oberflächeninspektion führen zu einer Erhöhung der Produktqualität, da sie an Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit im Vergleich mit personenbasierten Inspektionen überlegen sind und eine 100 %ige Inspektion wirtschaftlich ermöglichen (Nawrath 2001). Bei der Kontrolle von bedruckten Produkten hat sich gezeigt, dass von einem System erwartet wird, alle obigen Aufgaben gleichzeitig zu lösen.

Die Leistungsfähigkeit eines Bildverarbeitungssystems wird in erheblichem Maß von der Software bestimmt, die die vorher genannten Aufgaben erfüllt. Unter Leistungsfähigkeit wird hier die Mächtigkeit und Robustheit der verfügbaren Algorithmen, die automatische Nutzbarkeit bei der Kontrolle des Druckbildes und die problemlose Übernahme der in der Entwicklungsphase entwickelten Funktion in ein Zielsystem verstanden. Die notwendigen Algorithmen müssen sehr schnell ablaufen und genaue Ergebnisse liefern.

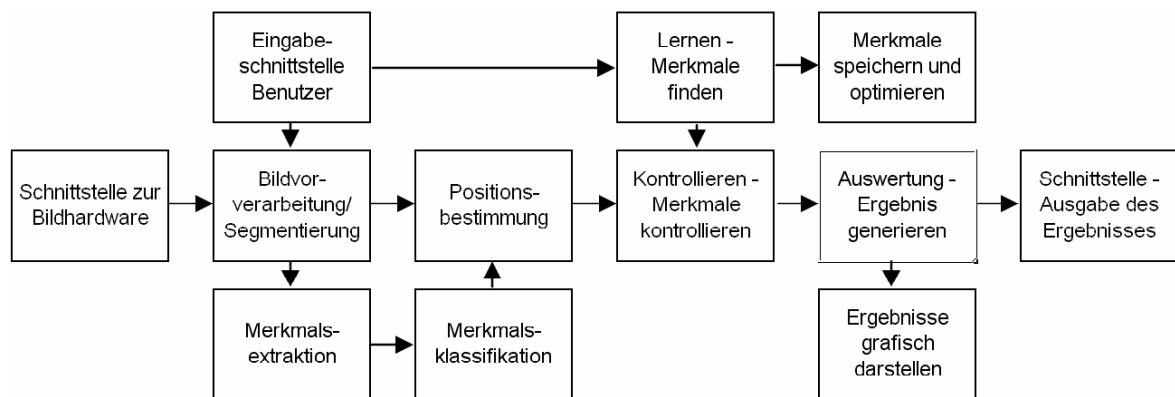


Abbildung 9: Softwarestruktur

In Abbildung 9 ist die Softwarestruktur für ein Grundsystem zur Druckbildkontrolle dargestellt. Die auf der mittleren Horizontalen angeordneten Funktionsblöcke beschreiben den reinen Messvorgang. Die umliegenden Funktionsblöcke werden beim „Teach-In“ und für Nebenfunktionen benötigt.

An wichtigster Stelle steht eine semantische Analyse des Messbildes, eine Erkennung von relevanten Merkmalen und eine folgende Ableitung und Optimierung von Merkmalen für die Kontrollaufgabe. Die Funktionsweise ist bei den meisten Druckkontrollsystemen gleich. Der Grundaufbau der Bildverarbeitung ist in folgende Teilaufgaben unterteilt: Bildvorverarbeitung, Segmentierung, Merkmalsextraktion und Klassifikation (Steinbrecher 1993).

Bildvorverarbeitung

Darunter werden Operationen der Bildrestaurierung und Bildverbesserung zusammengefasst, die eine Bild zu Bild Transformation durchführen. Bei der Bildrestaurierung werden systematische bei der Bilderfassung entstandene Fehler wie Geometriefehler, Farbfehler, Shadingfehler oder Bewegungsunschärfe beseitigt (Fuchs 2003). Die Bildverbesserung soll die Analyse des Bildes für den Menschen erleichtern, bringt aber für eine automatische Bildauswertung im Fall der Druckbildkontrolle keine Vorteile.

Segmentierung

Segmentierung ist die Zerlegung des Bildes in die zu analysierenden Objekte und den Bildhintergrund (Steinbrecher 1993), eine Unterscheidung von gedruckten Elementen und Bedruckstoff.

Merkmalsextraktion

An die Segmentierung schließt sich die Operation der Merkmalsextraktion an. Es erfolgt eine Transformation des Bildes in je einen Merkmalsvektor pro Objekt. Merkmalsklassen können in geometrische Merkmale, Farbmerkmale und Texturmerkmale unterschieden werden (Steinbrecher 1993).

Klassifikation

Klassifikation bedeutet die Zuordnung eines Merkmalsvektors, der einer Aussage entspricht. Im Fall der Druckbildkontrolle ist es beispielsweise die Entscheidung „das Objekt gehört der Klasse homogene Flächen“ an. In der Auswertung kann es dann die Entscheidung „die Lage des Objektes liegt innerhalb der Toleranzen“ sein (Fuchs 2003) (Ernst 1991) (Abmayr 1994).

Die Merkmalsextraktion im Druckbild hat das Ziel, im Bild genau diese Elemente zu finden, die die Grundlage für die anschließende Klassifikation bilden. Um der Kontrollaufgabe gerecht zu werden, müssen diese Elemente typisch für dieses Druckprodukt sein. Dies ermöglicht im weiteren Verlauf der Software eine Identifikation des Druckproduktes. Weitere Merkmale müssen gefunden werden, die eine Beurteilung des Druckbildes ermöglichen.

In Abbildung 10 sind verschiedene Beispielfelder dargestellt. Es zeigt sich, dass die Bilder keine Standardmuster enthalten. Dementsprechend ist primär eine Erkennung auf zweidimensionale einfache geometrische Figuren zurückzuführen. Umschreibende Rechtecke sind als Merkmal für Flächen gleicher Helligkeit mit einer geringen Streuung geeignet, Texturen beschreiben Strukturen und kleine Schriften. Eindimensionale Merkmale beschreiben Helligkeitsübergänge, Kanten und Abstände zwischen Elementen. Diesen geometrischen Grundelementen werden Merkmale zugeordnet, die für die Kontrolle des Druckbildes spezifisch sind. Das sind Helligkeitswerte als Maß für entsprechende Farbdeckung und deren statistische Verteilung als Maß für die Gleichmäßigkeit. Aus einer Folge des Grundelements Kante können abgeleitete Merkmale wie Strichcodierungen oder Schriftzüge gebildet werden. Durch einen Umkehrschluss von Merkmalen kann auf Veränderungen des Druckbildes reagiert werden. Besitzt beispielsweise ein Flächenelement einen Helligkeitswert mit einer geringen Streuung und wird bei der Kontrolle dieses Elementes eine Veränderung des Helligkeitswertes oder der Streuung festgestellt, kann auf Flecken und Kratzer rückgeschlossen werden.

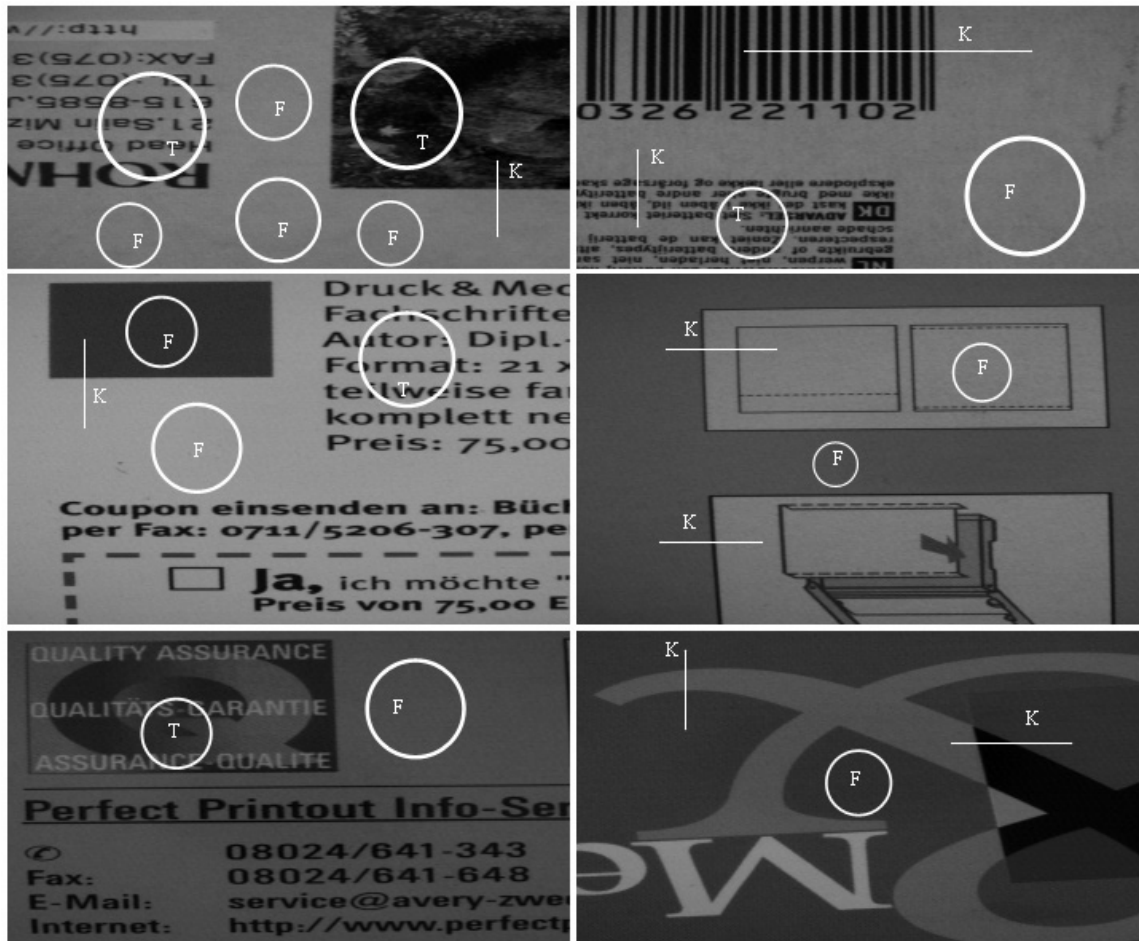


Abbildung 10: Merkmale im Druckbild – Flächenmerkmale(F), Texturen(T), Konturen(K)

In Tabelle 6 sind Grundmerkmale und deren Rückschlüsse auf Eigenschaften des Druckbildes aufgelistet. Aus einfachen geometrischen Merkmalen werden durch Kombination komplexe Merkmale bis hin zu inhaltlichen Merkmalen gebildet.

Merkmal	Beschreibung	Druckbildeigenschaft
Positionsmerkmal	Punkt mit Position und Helligkeitswert	Farbe, bedruckt, Bedruckstofffarbe
Kantenmerkmal	Zwei Punkte mit Position und einem Helligkeitsunterschied	Gedruckte Elemente, Flächen, Schrift
Linienmerkmal	Zwei Kantenmerkmale mit Position und Abstand	Tabellen, Zeichnungen, Schrift

Flächenmerkmal	Mehrere Punkte mit Position und gleichem Helligkeitswert oder mehrere Kantenmerkmale mit Position und Abstand	Farbe, Größe von Flächen, große Schrift
Texturmerkmal	Mehrere Punkte mit Position und statistischen Helligkeitswerten (Mittelwert, Standardabweichung)	Farbverläufe, kleine Texte, Strukturen, Bilder
Folge oder Zusammensetzungen von Merkmalen	Logisches Muster, bzw. mathematischer Zusammenhang zwischen mehreren gleichartigen Kantenmerkmalen oder Linienmerkmalen	Rasterflächen, Schriftzüge, Strichcodes, Druckkontrollstreifen, Messfelder

Tabelle 6: Grundmerkmale

In Tabelle 7 ist eine Zusammenstellung von abgeleiteten Merkmalen dargestellt. Wird bei der Auswertung von Grundmerkmalen ein Zusammenhang zwischen fehlerhaften Merkmalen gefunden, wird auf Druckbildeigenschaften geschlossen, die Fehler und Mängel des Druckbildes beschreiben.

Merkmal	Beschreibung	Druckbildeigenschaft
Gesamtsumme oder Verhältnis korrekter und nicht korrekter Einzelmerkmale	Zusammenfassung einer Menge von richtig oder falsch erkannten Einzelmerkmalen	Falsches oder richtiges Druckbild, Gesamtposition des Druckbildes falsch
Partielle Gesamtsumme oder Verhältnis korrekter und nicht korrekter Merkmale	Zusammenfassung einer Menge von richtig oder falsch erkannten verschiedenen Merkmalen in einem bestimmten Bereich	Auftreten von Flecken und Kratzern, Fehler des Bedruckstoffes, Fehlen einer Druckfarbe
Partielle Gesamtsumme oder Verhältnis korrekter und nicht korrekter Einzelmerkmale	Zusammenfassung einer Menge von richtig oder falsch erkannten Einzelmerkmalen in einem bestimmten Bereich	Falscher Text, falscher Code, Fehlen einer Druckfarbe

Tabelle 7: Abgeleitete Merkmale

Allen Merkmalen bzw. Merkmalsvektoren eines Druckbildes geht eine Lagebestimmung voraus. Bei der Merkmalsextraktion und Klassifikation von Merkmalen muss - mit dem Ziel, diese Elemente und auch deren Lageveränderung feststellen zu können - immer auch eine Positionsbeschreibung erfolgen. Beim Einsatz eines Druckkontrollsystems in einem Weiterverarbeitungsprozess ist immer die Lagebestimmung des Gesamtbildes wie auch die Lagebestimmung der einzelnen zu vergleichenden Merkmale Grundvoraussetzung.

Neben den dargestellten Aufgaben der Software, Merkmale des Druckbildes zu finden, zu kontrollieren und Rückschlüsse auf Eigenschaften der Druckprodukte zu ermöglichen, ist eine kurze Rechenzeit eine der wichtigsten Anforderungen. Typische Zykluszeiten in einer bogenverarbeitenden Maschine liegen bei ca. 200 ms (18.000 Ex/h). Sollen Kontrollvorgang und Reaktion auf das Kontrollergebnis innerhalb eines Taktes stattfinden, reduziert sich die Kontrollzeit auf ca. 30 ms. Um diese kurzen Verarbeitungszeiten zu realisieren, reichen allein hocheffiziente Algorithmen und hohe Rechenleistung des Kontrollsystems nicht aus. Ein leistungsfähiges Optimierungswerkzeug kann durch eine Reduzierung der zu kontrollierenden Merkmale auf die wesentlichen und notwendigen Merkmale des jeweiligen Druckbildes den Rechenaufwand verringern und damit die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Informationen erhöhen.

Die Anforderungen an die Algorithmen gehen weit über die Möglichkeiten klassischer Bildverarbeitungsfunktionen (Fuchs 2003) (Steinbrecher 1993) (Abmayr 1994) (Ernst 1991) und Verfahren hinaus. Die Anpassung bekannter Funktionen und die Neuentwicklung einer speziellen Software sind notwendig. Im folgenden Kapitel werden deshalb die Potenziale von intelligenten Technologien untersucht.

4 Anwendung von intelligenten Technologien

Die bisherigen Betrachtungen zeigen, dass die Anforderungen an eine Bestimmung der Druckqualität durch ein automatisches bildverarbeitendes System große Herausforderungen an die Software und deren Funktionen stellt. Eine Übertragung der visuellen Eigenschaften des Druckbildes in digital verarbeitbare Daten ist möglich und es sind optimierte Lösungen verfügbar – angepasst an technische und wirtschaftliche Voraussetzungen. Eine technische Umsetzung des Urteils- und Bewertungsvermögens des Druckers existiert jedoch nicht. Die wissenschaftliche Herausforderung besteht also in der Umsetzung von Erfahrungen, Wissen und Urteilsvermögen eines Menschen in Algorithmen, die als Eingangsgröße digitale Druckbilder verwenden und als Ausgangsgröße eine Bewertung des Druckergebnisses liefern.

Mit dem Menschen als Vorbild zur Bewertung von Druckbildern und der Aufgabe der Umsetzung dieses Modells auf eine maschinelle Druckkontrolle sind klassische Bildverarbeitungsfunktionen überfordert. Es muss immer eine Anpassung der mathematischen Formeln und Berechnungsalgorithmen auf die jeweilige Anwendung erfolgen. Besteht wie in diesem Fall das Ziel, die Informationsverarbeitung eines Menschen nachzubilden, kommen nur intelligente Technologien in Betracht.

Unter einer intelligenten Technologie versteht man eine von Menschen erzeugte Technologie, die in der Lage ist, flexibel auf Aufgabenstellungen bestimmter meist vorher definierter Art zu reagieren, sei es durch Simulation Neuronaler Netzwerke wie das menschliche Gehirn oder durch Verarbeitung von Expertenwissen in Fuzzy-Systemen oder durch andere komplexe Algorithmen. Im Prinzip beschreibt Intelligenz in erster Linie die Fähigkeit zur Assoziation und Korrelation neuer Informationen. Je höher die Intelligenz, desto schneller und besser kann entsprechend aufgearbeitetes Wissen aufgenommen und in Verbindung gesetzt werden (Keller 2000). Der Wunsch, menschliches Problemlösungsverhalten auf einen Rechner oder ein Verfahren zu übertragen, liegt zum einen in immer praktischeren Problemstellungen und zum anderen in deren Behandlung, die nicht mehr durch klassische Vorgehensweisen oder einfache Programmentwicklungen realisierbar sind.

Die Simulation menschlichen Verhaltens (Jackson 1987) ist das Zusammensetzen von Informationen bzw. Informationseinheiten zu Abbildungen, Zuordnungen und Funktionen, die sich meist nicht - wie im klassisch mathematischen Sinne - algorithmisch prozedural formulieren lassen (Koller 1999). Der Zusammenhang zwischen intelligenten Technologien und der künstlichen Intelligenz spiegelt sich in folgender Definition wider: „Künstliche Intelligenz ist der Teil der Computerwissenschaft, der sich mit der

Entwicklung intelligenter Computersysteme befasst. Das sind Systeme, die die charakteristischen Eigenschaften aufweisen, die wir mit intelligentem Verhalten assoziieren - Verstehen von Sprache, Lernen, Schlüsse ziehen, Probleme lösen und so weiter.“ (Barr 1981) Intelligente Technologien befassen sich damit, Computer so zu programmieren, dass sie Aufgaben ausführen können, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt durch Menschen wahrgenommen werden wie z.B. Entscheidungen treffen oder Schlüsse ziehen (Koller 1999).

Ein Überblick über die verschiedenartigen Integrations- und Kombinationsformen sowie die Einordnungsmöglichkeiten intelligenter und konventioneller Techniken ist in Abbildung 11 dargestellt.

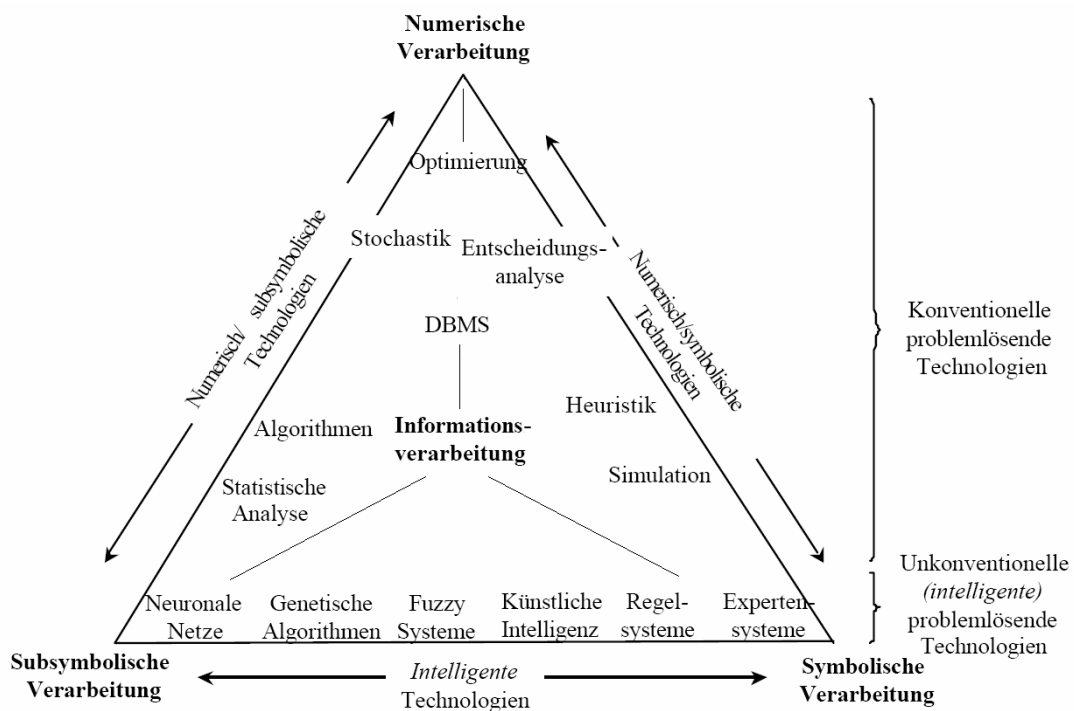


Abbildung 11: Klassifikationsmodell problemlösender Methoden und Einordnung unterschiedlicher Intelligenter Technologien nach Madey (Madey 1994) (Koller 1999)

Im Rahmen dieser Arbeit fällt ein besonderes Augenmerk auf die Technologien, die von Madey als unkonventionell und intelligent bezeichnet werden. Dazu gehören Neuronale Netze, Genetische Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Expertensysteme.

Anhand einer effektiven Positionserkennung als wesentliche Grundlage zur Druckbildkontrolle wird in diesem Kapitel der Umgang mit unscharfem Wissen erläutert und im Vergleich mit einem klassischen Lösungsansatz bei der (Fehl-)Lagebestimmung untersucht und bewertet. In einem weiteren Schritt wird mit Hilfe von Neuronalen Netzen die Optimierung der Regelbasis demonstriert.

4.1 Klassische Lösungsansätze zur Positionsbestimmung

Eine wesentliche Voraussetzung zur Herstellung von qualitativ hochwertigen Stanzprodukten ist eine korrekte Lage des Druckbildes zum Stanzbild. Die Erkenntnis, dass im Unterschied zu einer Messung am Druckbild in einer Druckmaschine, die Lage des Druckbildes in einer Weiterverarbeitungsmaschine in einem größeren Maß variieren kann, muss dementsprechend in der Druckbildkontrolle berücksichtigt werden. Hauptsächlich wird der Bezug zum Stanzwerkzeug über die Materialaußenkanten hergestellt. Es wird vorausgesetzt, dass das Druckprodukt lagerichtig und natürlich mit dem korrekten Inhalt hergestellt wurde. Ein mechanischer Vorder- und Seitenanschlag erfüllt die Ausrichtung des Zwischenproduktes.

Nun zählt die absolute Druckbildposition auf dem Bogen (Stand bzw. Register) nicht unbedingt zu den wesentlichen Qualitätsmerkmalen von Druckprodukten und wird dementsprechend auch nur während des Einrichtens der Druckmaschine korrigiert; stellt aber für das passgenaue Stanzen die wesentliche Voraussetzung dar. Häufigste Fehlerscheinung ist die Verschiebung des gesamten Druckbildes auf dem Druckbogen. Die Ursachen sind vielfältig – einzelne Bogen können durch fehlerhaften Papierlauf in der Druckmaschine oder durch Formattoleranzen bzw. schlecht vorgestapeltes Material entstehen. Systematische Fehler können durch Verstellungen an der Bogenanlage der Druckmaschine, durch Palettenwechsel und logistische Einflüsse wie Veränderungen der Reihenfolge der Materialpaletten verursacht werden.

Neben der Verschiebung des gesamten Druckbildes kann es auch zu partiellen Verschiebungen innerhalb des resultierenden Druckbildes kommen. Dazu zählen weniger die Effekte, die durch Passerungenauigkeiten oder Materialdehnung begründet sind, als vielmehr gröbere Fehler innerhalb des Druckbildes wie Verschiebungen von Farbauszügen zueinander (Registerverstellungen) während des Einrichtens der Druckmaschine oder durch mehrmaliges Bedrucken oder Veredeln entstandener Versatz von optisch sichtbaren Elementen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Lagefehler des Druckbildes aufzählen - das gesamte Druckbild kann verschoben, verdreht oder falsch sein und innerhalb des Druckbildes können Elemente verschoben, verdreht oder falsch sein. Daraus lassen sich folgende Grundfunktionen einer Lagekontrolle des Druckbildes herleiten: die allgemeine Lage des Druckbildes innerhalb der spezifischen Toleranzen und die Lage einzelner Elemente innerhalb des Druckbildes müssen kontrolliert werden.

Eine direkte Messung der Lage des Druckbildes ist nicht möglich. Die größte Schwierigkeit liegt in der für das Messsystem unbekanntem Struktur des Druckbildes. Wesentliche Voraussetzung für die Bestimmung der Lage ist das Erkennen von

vermessbaren Elementen, über die eine Lagebestimmung realisiert werden kann. Die Möglichkeit, gezielt maschinenlesbare Elemente mitzudrucken und auszuwerten, ist eine Möglichkeit, muss aber entweder als eine gestalterische Störung im Druckbild vom Kunden akzeptiert werden oder außerhalb des Druckbildes im Verschnitt des Bogens angeordnet sein. Ziel ist die Bestimmung der Druckbildlage direkt am Druckbild. Das ist auch die Voraussetzung für die Kontrolle weiterer Merkmale im Druckbild.

Verschiedene Verfahren der Bildverarbeitung lassen eine indirekte Bestimmung innerhalb eines Messbildes zu und sollen im Weiteren betrachtet und bewertet werden. Über die starre mechanische Verbindung der Messkamera mit der Verarbeitungsmaschine wird ein quasi-statisches Lagebezugssystem zwischen dem gemessenen Druckbild und den Werkzeugen der Verarbeitungsmaschine hergestellt. Es wird vorausgesetzt, dass gemessene Verschiebungen des Druckbildes im Bild einer Messkamera im direkten Verhältnis zu einer realen Verschiebung des Druckbildes zu den Werkzeugen der Verarbeitungsmaschine stehen bzw. durch eine Übertragungsfunktion abgebildet werden:

$$\text{Druckbildlage[rel.]} = (\text{Druckbildlage[abs.]} \cdot \text{Abbildungsmaßstab}) + \text{Versatz}$$

Eine relative Veränderung der Lage des Druckbildes lässt sich aus der Folge von mindestens zwei Messbildern bestimmen. Dabei wird das erste Messbild als Referenz betrachtet.

Es gibt eine Reihe verschiedener Ansätze zur Bestimmung der Bildposition:

Diskrete Fourier Transformation

Bei der diskreten Fourier Transformation wird das zweidimensionale Bildsignal in sinusförmige Schwingungen zerlegt. Dabei enthalten die Darstellungen im Frequenzraum die gleichen Informationen wie im Ortsraum. Verschiebungen (im interessierenden Fall Veränderung der Lage von gedruckten Elementen) der Funktion $f(x,y)$ bewirken eine lineare Phasendrehung der Funktion $F(u,v)$. Die Phase legt somit die Position und die Struktur der Objekte fest (Steinbrecher 1993). Eine Positionsänderung des Druckbildes im Vergleich zum Referenzbild wird durch eine Phasendrehung messbar. Der experimentell ermittelte sehr hohe Rechenaufwand und die damit verbundene Rechenzeit lassen den Einsatz dieser mathematischen Methode in der online-Kontrolle nicht zu.

Hough Transformation

Die gleiche Einschränkung durch die hohe Rechenzeit ergibt sich für den Einsatz der Hough Transformation. Das Prinzip der Hough Transformation beschreibt eine nach P.V.C. Hough benannte Transformation und ist in einer Patentschrift von 1962 niedergelegt (Hough 1962). Diese wurde 1972 von Duda und Hart (Duda 1972) zur Erkennung

von Geraden und Kurven adaptiert. 1982 wurde dann von Ballard und Brown (Ballard 1982) die verallgemeinerte Hough Transformation erweitert und zur Erkennung von Kreisen, Ellipsen usw. verwendet. Von einem binären und skelettierten Kantenbild ordnet die Hough Transformation jedem Kantenpunkt in diesem Binärbild die Gerade (Geradenbündel) zu, die durch diesen Punkt läuft. Jede Gerade wird durch zwei Parameter beschrieben, beispielsweise durch den Anstieg und den Ordinatenabschnitt, oder durch den Abstand zum Ursprung und dem Winkel zur X-Achse (Hessesche Normalform). Eine Lageverschiebung des Druckbildes im Vergleich zum Referenzbild wird die Lage der Kanten im Bild verändern. Diese Unterschiede werden sich in der Beschreibung der Kanten durch die Parameter aus der Hough-Transformation widerspiegeln.

Kantenerkennung

Wesentlich schneller funktionieren Verfahren, die Kanten und deren zugehörige Ortskoordinaten detektieren. Dabei werden sowohl im Referenzbild als auch im aktuellen Messbild Kanten mit mathematischen Verfahren bestimmt (Steinbrecher 1993) (Abmayr 1994). Es gibt drei Gruppen: Differenzoperatoren (Sobel, Roberts, Prewitt), Differenzialoperatoren (Laplacian, Gaussian) und Komplexoperatoren (Canny). Über die Orientierung und die Lage der Kanten wird dann die Lageverschiebung des Bildes bestimmt (Meier 2002). Nachteilig ist der Aufwand für die Optimierung der Anzahl der Kanten. Durch die Reduzierung der Merkmale muss die Rechenzeit verkürzt werden und bei der Filterung von „typischen“ Kanten des Bildes wird auch die Qualität der Kontrolle verbessert. Jedoch ist das Wiederfinden der entsprechenden Kanten aufwendig und kann bei größeren Lageverschiebungen fehleranfälliger werden (Straßer 2003). Es können aber im Vergleich zu den Transformationsverfahren selektiv für einzelne gedruckte Elemente deren Lageveränderungen bestimmt werden.

Differenzbildverfahren

Als eine der einfachsten Methoden gilt das Differenzbildverfahren, bei dem durch eine Differenz des Referenzbildes und des aktuellen Bildes (pixelweise Helligkeitsdifferenzen) auf eine Lageänderung geschlossen werden kann. Da dieses Verfahren jedoch je nach Bildinhalt (Anzahl und Höhe der Kontraste) sehr unterschiedlich gut funktioniert und auch kein direktes Maß für die Lageverschiebung bestimmt wird, ist es für die Kontrolle der Lage des Druckbildes qualitätsmäßig weniger geeignet. Treten in zu kontrollierenden Bild periodische Muster auf, die kleiner als die zu tolerierende Lageverschiebung sind, kann dieses Verfahren nicht zuverlässig angewendet werden. Des Weiteren führen kleine Helligkeitsschwankungen zwischen den Messbildern durch den integrierenden Charakter zu einer hohen Fehlerquote oder bedingen eine entsprechende Vergrößerung der Toleranzen.

Bildprozessoren

Ein Verfahren, das durch Hardware realisiert wird, verwendet sehr schnelle Bildprozessoren (Herstellerfirmen: ICOS Visions Systems NV, Cognex Germany Inc., QuISS GmbH, ISRA Visions Systems GmbH). Da diese meist für einen sehr spezialisierten Anwendungsfall (z.B. Maschine Vision, Robotik) hergestellt werden, einen hohen Aufwand bei der Entwicklung bedeuten und weniger anpassungsfähig sind, eignen sich Bildprozessoren für die sehr unterschiedlichen Bedingungen bei der Kontrolle des Druckbildes primär nicht. Meist sind diese Bildprozessoren auch an eine Hardware und Software so eng gekoppelt, dass eine Erweiterung der Funktionen oder der Wechsel von Komponenten sehr aufwendig werden kann. Kann die Druckbildkontrolle auf eine positionsinvariante Merkmalsgewinnung reduziert werden, ist der Einsatz von nichtlinearen Spektraltransformationen in programmierbaren applikationsspezifischen Schaltkreisen implementierbar (Lohweg 2003).

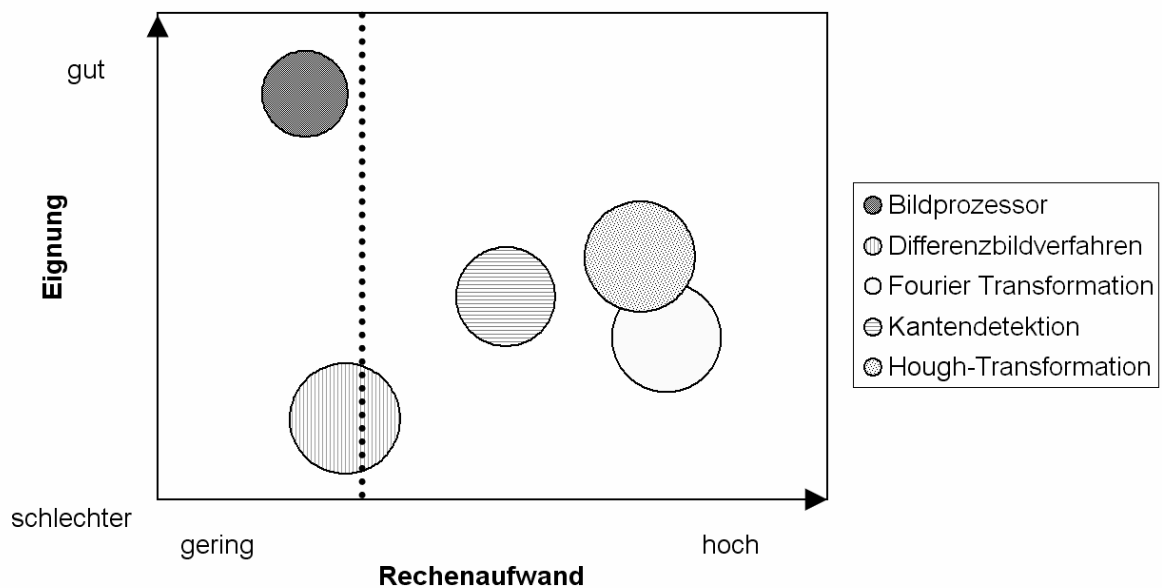


Abbildung 12: Verschiedene Verfahren der Lagebestimmung – Vergleich der Qualität und der notwendigen Rechenzeit

In Abbildung 12 ist schematisch die Eignung verschiedener Verfahren im Vergleich zum benötigten Rechenaufwand dargestellt. In Versuchen stellt sich heraus, dass die meisten Verfahren einen zu hohen Rechenaufwand benötigen (rechts neben der gepunkteten Linie). Das Differenzbildverfahren hat zwar einen geringeren Rechenaufwand, ist aber im Vergleich zu der Hardwarelösung durch Bildprozessoren weniger gut geeignet.

4.2 Modell zur Lagebestimmung von Druckbildern

Nachdem die vorherigen Abschnitte die Notwendigkeit der Bestimmung der Druckbildlage und deren Randbedingungen beschreiben, wird in diesem Abschnitt eine Lösung mit Hilfe eines unscharfen Entscheidungsmodells beschrieben. Dabei ist der wichtigste Aspekt eines wissensbasierten Systems die Trennung zwischen der Darstellung des Wissens und der Verarbeitung des Wissens. Während in der Wissensbasis spezielles Wissen über den Anwendungsbereich zu finden ist, stellt die Wissensverarbeitung eine relativ anwendungsunabhängige Komponente dar (Beierle 2000). Grundlagen von Expertensystemen werden unter anderen von Jackson (Jackson 1987), Kurbel (Kurbel 1989), Keller (Keller 2000) und Beierle (Beierle 2000) beschrieben. Einen Überblick über die Anwendung von unscharfem Wissen und Fuzzy Logic in einem Expertensystem geben Tilli (Tilli 1993b), Mayer (Mayer 1993), Zimmermann (Zimmermann 1993) und Keller (Keller 2000).

Für die Herleitung eines geeigneten Modells zur Bestimmung der Lage des Druckbildes wird die Handlungsweise eines menschlichen Betrachters genutzt. Diese bildet die Grundlage für die Wissensbasis. Es stellt sich die wissenschaftliche Frage, ob die effiziente Wissensverarbeitung des Menschen in einer Software umgesetzt werden kann.

Der Einsatz der visuellen Kontrolle von Druckbogen und in diesem Zusammenhang die Kontrolle der Lage des Druckbildes kann sowohl offline, das heißt losgelöst von einem Prozessschritt, oder online direkt in oder vor einem Prozessschritt erfolgen. Eine geeignete online-Kontrolle ist an den vereinzelt und ausgerichteten Produkten beispielsweise auf dem Anleger einer Stanzmaschine möglich (s. Abbildung 8).

Der Beobachtungsvorgang zur Identifizierung einer Lageabweichung eines bedruckten Bogens lässt sich aus eigenen Versuchen vereinfacht wie folgt beschreiben:

- Der Beobachter wählt nach seinen Erfahrungen einen geeigneten Bereich des bedruckten Bogens aus. Dabei wird aus einer gewissen Erfahrung ein geeigneter kleiner Beobachtungsbereich gewählt, nicht der gesamte bedruckte Bereich. Wichtige Auswahlkriterien dabei sind relevante Merkmale wie Linien und Konturen.
- An diesen Konturen prägt sich der Beobachter die korrekte Lage des Druckbildes ein. In jedem Fall wird dabei ein Bezugssystem im Blickbereich des Beobachters zur Beurteilung genutzt. Dabei werden mehr oder weniger bewusst Relationen zu feststehenden Maschinenteilen, zum Beispiel des Anlegers oder Materialkanten, gebildet.
- Kommt nun während der Beobachtung ein Produkt mit Lageabweichungen außerhalb der Toleranz des Benutzers, wird dieses sehr schnell und zuverlässig als fehlerhaft erkannt.

Dabei lassen sich folgende Stärken und Schwächen des menschlichen Experten (Beobachters) aufführen (Stumpner 1990):

- Der Experte besitzt überdurchschnittliche Fähigkeiten, Aufgaben in einem speziellen Gebiet zufrieden stellend zu lösen. Es findet in jedem Fall eine Reduzierung der Merkmale durch den Beobachter statt, es wird weder das gesamte Druckbild noch jedes einzelne Detail des Bereiches beobachtet.
- Experten verwenden heuristisches Wissen, um spezielle Aufgaben zu lösen und verwenden ihre Erfahrung.
- Sie handeln oft intuitiv richtig, können dann aber ihre Entscheidungen nicht begründen. Es kann weder ein absolutes Maß für die Grenze der Lageabweichung angegeben werden, noch ein genaues Maß für die Abweichung der Position von der Sollposition.
- Sie können Probleme unter Verwendung von unvollständigem und unsicherem Wissen lösen.
- Aber ihre Leistungsfähigkeit ist nicht konstant, sondern kann nach Tagesverfassung schwanken.
- Expertenwissen kann verloren gehen und kann oft nicht als solches weitergegeben werden (Beierle 2000).

Es stellt sich die Frage, ob das beschriebene menschliche Verhalten bei der Beobachtung der Lage von Druckbildern in einem Algorithmus abgebildet werden kann.

Expertensysteme sind intelligente Rechneranwendungen, die dem Anwender die Entscheidung bei der Lösung von Problemen abnehmen. Dabei verhält sich ein Expertensystem flexibler als ein auf Algorithmen aufgebautes Programm, da der Programmablauf nicht vorgegeben ist, sondern durch ein Schlussfolgerungssystem, das die in der Wissensbasis gespeicherten Fakten und Regeln auf die Eingabedaten anwendet, bestimmt wird. Durch Ändern, Hinzufügen oder Weglassen von Wissensteilen aus der Wissensbasis wird folglich nicht die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems beeinflusst, sondern nur die Qualität des Ergebnisses. Es wird also mit wenigen Fakten ein Versuchssystem aufgebaut, das vom Experten so beurteilt und erweitert wird, dass dessen Problemlösungsstrategien schrittweise nachgebildet werden. Die grundlegenden Komponenten eines Expertensystems bilden die Wissensbasis und die Wissensverarbeitung (Zimmermann 1993) (Beierle 2000) (Köster 2002). Die Wissensbasis ist eine Ansammlung menschlichen Wissens. Da menschliches Wissen von Natur aus unscharf und unpräzise ist, enthält die gefundene Wissensbasis eine Ansammlung von Regeln und Fakten, die größtenteils weder absolut sicher noch absolut konsistent sind. Daher ist es logisch, diesen Teil des Wissens nicht durch scharfe Symbole und Konzepte darzustellen, sondern durch Fuzzy-Sets – unscharfe Mengen.

4.3 Wissensbasis modelliert mit unscharfen Mengen

In dem Fall der Lagebestimmung des Druckbildes ist eine präzise und vollständige Modellierung unpraktikabel oder gar unmöglich. Klassische Lösungsansätze erwiesen sich in Versuchen für diese spezielle Aufgabe und unter den strikten Vorgaben an die Rechenzeit als ungeeignet. Ein weiteres Problem ergibt sich bei den unterschiedlichsten zu erwartenden Druckmotiven; es gibt kein allgemeines mathematisches Modell, das für die Mehrheit der verschiedenen Druckmotive zur Lagebestimmung geeignet ist.

Wenn es gilt, Lösungen schnell und kostengünstig bereitzustellen, hat sich in den letzten Jahren häufig der Einsatz unscharfer, qualitativer Methoden bewährt, weil man sich dabei oftmals teure und langwierige Entwicklungen des mathematischen Modells erspart. Meist zeigt sich dabei, dass die entwickelte Lösung sogar besser und robuster ist als die mit weitaus höherem Aufwand erstellte klassische Variante (Keller 2000).

Grundidee beim Umgang mit unscharfem Wissen - beim Umgang mit Fuzzy-Systemen - ist die Formalisierung menschlichen Problemwissens, das entweder von einem Experten bereitgestellt oder aber vom Entwickler des Systems intuitiv in einer unscharfen (vagen) Form formuliert wird. Im Gegensatz zu einem weit verbreiteten Vorurteil handelt es sich primär nicht um lernende Systeme, sondern um eine Modellierungstechnik, bei der die menschliche Fähigkeit, Sachverhalte intuitiv nicht auf einer strukturellen oder funktionalen, sondern auf einer verhaltensorientierten Ebene zu erfassen, die Basis bildet. Die entsprechenden Erfahrungen des Menschen bei der Lagebestimmung von Druckbildern lassen sich so in Form von Verhaltensregeln nutzbar machen. Ein derartig entwickeltes System wird im optimalen Fall das Leistungsvermögen Desjenigen erreichen, der die Wissensbasis zur Verfügung gestellt hat. Die wichtigen Ansätze der unscharfen Mengen seit der Entwicklung des Konzeptes von L.A. Zadeh (Zadeh 1965) um 1960 sind in Arbeiten von Kruse (Kruse 1993) und Zimmermann (Zimmermann 1993), in den Werken von Yager (Yager 1992), Schulte (Schulte 1993), Passino (Passino 1998) und Kahlert (Kahlert 1993) enthalten.

Ein Bildverarbeitungssystem liefert digitale Bilder bestehend aus zweidimensionalen Helligkeitsverteilungen. In einem Rasterbild bezeichnen 'm' und 'n' die Bildelemente (Pixel) und 'b' die zugehörigen Helligkeitswerte.

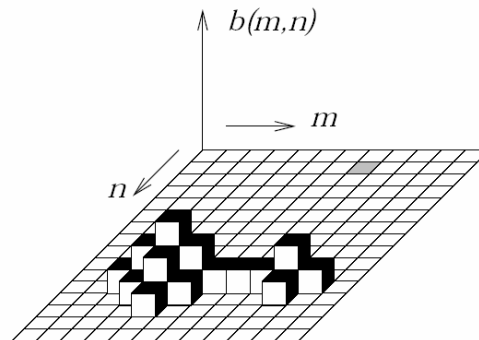


Abbildung 13: Rasterbild (m , n bezeichnen Bildelemente Pixel und b die zugehörigen Helligkeitswerte)

Wird das digitale Bild um die Variable 'Zeit' als eine weitere Dimension erweitert, erhält man eine zeitliche Folge von Einzelbildern bzw. bewegte Szenen (Fuchs 2003). Im Weiteren wird das Referenzbild (meist das erste Bild einer Szene) als Lernbild definiert. Die Lage des Druckbildes im Lernbild wird als Bezug zur Bestimmung einer Lageveränderung bzw. zur Detektion einer Fehllage des Druckbildes genutzt. Folgebilder einer Szene werden als Messbilder definiert und werden im Bezug auf das Lernbild betrachtet.

Parallel zu einem menschlichen Beobachter erfasste Bilder zeigen im Falle einer Translation des Druckbildes eine örtliche Verschiebung in den Helligkeitswerten.



Abbildung 14: Bedruckte Blisterverpackung - Beobachtungsbereich des Bildverarbeitungssystems, rechts oben markierter Bereich

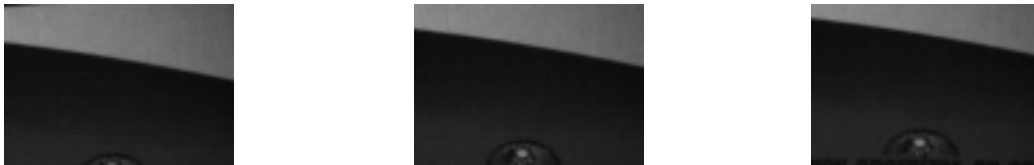


Bild a)

Bild b)

Bild c)

Abbildung 15: Szene einer Druckbildverschiebung im markierten Bereich von Abbildung 14 in y-Richtung (Bild a) Position null, Bild b) Position des Druckbildes innerhalb der Toleranz des Beobachters, Bild c) Position des Druckbildes außerhalb der Toleranz des Beobachters)

Legt ein menschlicher Beobachter sein Augenmerk beispielsweise auf eine helle Fläche (Markierung in Abbildung 14), wird bei einer Lageveränderung des Druckbildes (Lageveränderung in vertikaler Richtung s. Abbildung 15) an der beobachteten Stelle ein dunklerer Bildbereich wahrgenommen. In einer digitalen Szene zeigt sich dies in einer Verschiebung der Grauwertfunktion. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang bei der Betrachtung einer einzelnen Spalte der Grauwertmatrix (Abbildung 16).

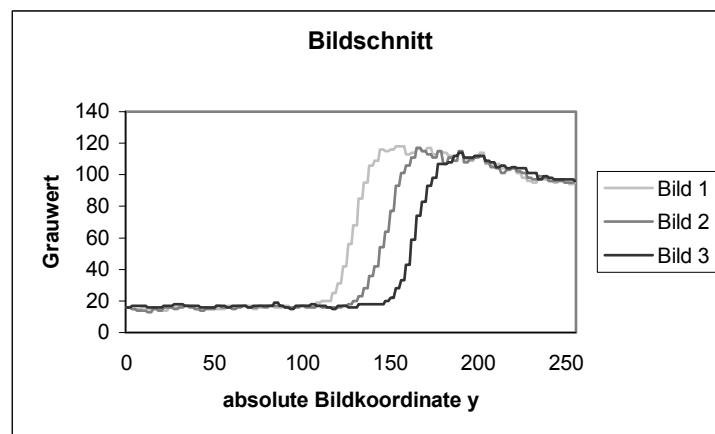


Abbildung 16: Verschiebung der Grauwertfunktion bei Lageveränderung des Druckbildes



Abbildung 17: Interessanter Beobachtungspunkt

Der in Abbildung 17 markierte Beobachtungspunkt wird bei einer Lageverschiebung in positiver y-Richtung einem negativen Grauwertsprung folgen. Dabei bewegt sich der Grauwert des Beobachtungspunktes zunächst zwischen der oberen und unteren Grenze (Abbildung 18). Um eine Lageveränderung in negativer y-Richtung in einer Grauwertfunktion abzubilden, wird der Beobachtungspunkt in diesem Beispiel im dunklen Bereich positioniert.

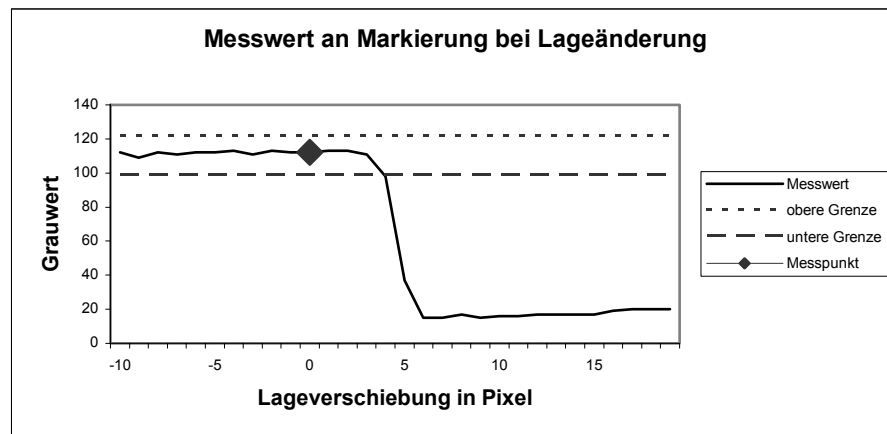


Abbildung 18: Parameter am Beobachtungspunkt

Ausgehend von der Wahrnehmungsfunktion des Menschen, die einen logarithmischen Verlauf hat (Abmayr1994) (Schmidt 1995), und durch eine von den Lagetoleranzen der Kontrollaufgabe abhängige Positionierung der Beobachtungspunkte (s. Anhang), lassen sich Werte ableiten, die zur Fehllegeerkennung geeignet sind. Diese stehen dann immer im Bezug zum Referenzbild, dem ersten Bild einer Szene bzw. dem Lernbild.

Die Variable 'Absolutdifferenz' ist die Grauwertdifferenz aus dem Grauwert des Beobachtungspunktes des Lernbildes und aus dem Grauwert des Beobachtungspunktes des Messbildes. Ist dieser Wert 'groß', kann nicht von einer korrekten Lage des Druckbildes ausgegangen werden.

Der Abstand zur 'oberen Grenze' ist die Differenz des Grauwertes des Beobachtungspunktes des Messbildes von der 'oberen Grenze' des Grauwertes des Lernbildes. Der Abstand zur 'unteren Grenze' wird analog zur 'unteren Grenze' des Grauwertes des Lernbildes gebildet (s. Anhang). Ist dieser Abstand 'klein' oder 'negativ', dann ist die korrekte Lage des Druckbildes an diesem Beobachtungspunkt auszuschließen.

Diese umgangssprachlichen Begriffe lassen sich durch Fuzzy Logic mit mathematischem Inhalt füllen. In Abbildung 19 ist die Fuzzifizierung der Variable 'Absolutdifferenz' dargestellt. Diese ist in die drei Terme 'klein', 'nah' und 'groß' unterteilt. Es ist für jede Grauwertdifferenz der entsprechende Zugehörigkeitsgrad zu den einzelnen Termen ersichtlich (s. Anhang).

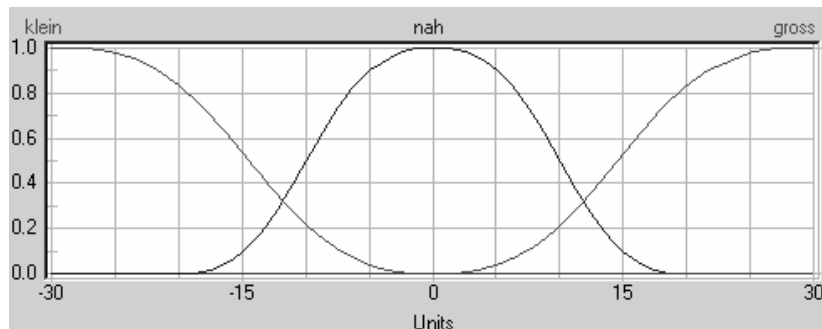


Abbildung 19: Zugehörigkeitsfunktion der Variable 'Absolutdifferenz'

In Abbildung 20 ist für die beiden Variablen 'Grenze oben' und 'Grenze unten' die Fuzzifizierung und die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen für die Terme 'nah' und 'weit' dargestellt.

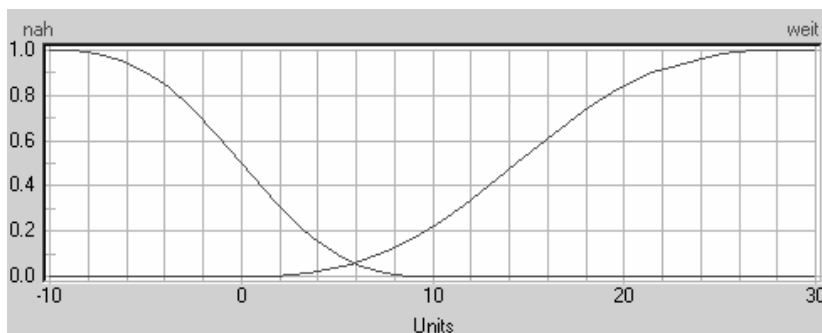


Abbildung 20: Zugehörigkeitsfunktion der Variablen 'Differenz_oben' und 'Differenz_unten'

In diese Transformation sind Ergebnisse von Versuchen an gedruckten Produkten eingeflossen. Sind entsprechende Beobachtungspunkte definiert, lassen sich Ergebnisse der einzelnen Beobachtungspunkte in Messbildern fuzzifizieren. Es zeigt sich, dass sich Lageverschiebungen des Druckbildes bei Annäherung oder Überschreitung der Lagetoleranz entsprechend in den unscharfen Werten widerspiegelt.

Diese Fuzzifizierung ist eine Wissensakquisition, eine Transformation und damit eine Überführung von menschlichem Wissen in maschinell verfügbares Wissen. Diese Wissensakquisition ist in diesem Fall indirekt erfolgt. Eine direkte Wissensakquisition bietet sich für weniger spezielle Anwendungen und Merkmale an und kann mit selbstlernenden Techniken wie Neuronalen Netzen oder Genetischen Algorithmen kombiniert werden und ist bisher selten realisiert (Heinsohn 1999).

4.4 Neuronales Netz zur Optimierung der Regelbasis

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, wie menschliches Wissen bei der Überführung von Messwerten der Beobachtungspunkte in maschinell verfügbares Wissen genutzt wird. Am Ende der Fuzzifizierung der Messwerte des Beobachtungspunktes stehen Zugehörigkeitsgrade zu den jeweiligen Variablen. Ein menschlicher Experte kann mit diesen unscharfen Werten die Entscheidung treffen, ob der jeweilige Beobachtungspunkt dem entsprechenden Wert für eine korrekte Druckbildlage entspricht – also ‘wahr’ oder ‘falsch’. Ist beispielsweise der Wert der Variable ‘Differenz oben’ dem Term ‘nah’ mit einem Zugehörigkeitsgrad von 1 zugeordnet, ist für die Ausgangsvariable ‘EinzelPosition’ dem Term ‘falsch’ ebenfalls die Zugehörigkeit von 1 zuzuordnen. Umgangsprachlich: „Ist der Messwert des Beobachtungspunktes der ‘unteren Grenze’ ‘nah’, dann ist die ‘EinzelPosition’ und damit die Druckbildlage an dieser Position ‘falsch’“. Für die automatische Verarbeitung in einer Software erfolgt die Formalisierung und Verknüpfung der Fakten und damit die Verbindung der Eingangsgrößen mit den Ausgangsgrößen, die Wissensrepräsentation, durch Produktionsregeln, Aussagen- und Prädikatenlogik, Frames und Objekten oder durch prozentuale Repräsentationen. Am häufigsten werden Regelsysteme angewendet (Beierle 2000). Dabei setzt sich jede Produktionsregel aus einer Prämisse und Konklusion zusammen. Die Prämisse skizziert den Umstand, der eintreten muss, damit die entsprechende Regel „feuert“. Prämissen können aus mehreren elementaren Aussagen bestehen und mit logischen Operatoren verknüpft werden. Die Konklusion liefert die Grundlage für die Ausführung – „Feuern“ einer Aktion. Alle Produktionsregeln zusammengenommen bilden einen Regelbaum, der die gegenseitigen Abhängigkeiten der Variablen darstellt. In Fuzzy-Expertensystemen mit approximativem Inferenzschema kann bestehendes Wissen eingearbeitet werden oder neues Wissen aus bestehenden Fuzzy-Sets generiert werden (Grauel 1995). Werden alle Terme der Eingangsgrößen mit allen Termen der Ausgangsgrößen kombiniert, entsteht eine vollständige Regelbasis (s. Tabelle 8). Dabei wird der Plausibilitätsgrad DoS (Degree of Support) als Verknüpfungsfaktor und Gewicht der Regel verwendet. Durch Veränderung dieses Wertes kann die Wirkung der Regel und damit die Auswirkung der Eingangsterme auf die Ausgangsterme gesteuert werden.

WENN			DANN	
'Absolut-differenz'	'Differenz_oben'	'Differenz_unten'	DoS	'EinzelPosition'
...
klein	weit	weit	1.00	falsch
klein	weit	weit	1.00	wahr
nah	nah	nah	1.00	falsch
nah	nah	nah	1.00	wahr
nah	nah	weit	1.00	falsch
...

Tabelle 8: Durch Kombinatorik erzeugte Regelbasis (vollständige s. Anhang)

Für die Formulierung der Regeln beziehungsweise für die Anpassung der Plausibilitätswerte der vollständigen Regelbasis bieten sich verschiedene Möglichkeiten (Kruse 1993):

1. Ein Experte, der in der Lage ist, den Entscheidungsprozess für den Beobachtungspunkt manuell zu regeln, spezifiziert die Regeln und die DoS-Werte, die seine Handlungsweise widerspiegeln. Im Allgemeinen kann dabei eine widersprechende Regel durch Setzen des Plausibilitätswertes auf Null quasi deaktiviert und das Verhalten einer „feuernden“ Regel in einem geringen Maße durch Veränderungen der Plausibilitätswerte angepasst werden.
2. Ein Experte, der in diesem Fall die Lageverschiebung des Druckbildes erkennen kann, wird über einen längeren Zeitraum beobachtet und die Messwerte der Beobachtungspunkte und die Entscheidungen des Experten erfasst. Aus diesen Prozessgrößen versucht man Regeln abzuleiten, die das Verhalten des Experten nachbilden. Die Gewinnung der Regeln aus den Daten kann direkt durch Analyse der Daten, durch Clustering- oder Fuzzy-Clustering-Verfahren geschehen (Bezdek 1981). Diese Methode bietet sich für sehr unübersichtliche und große Datenmengen an bzw. wenn keine geeignete Regelbasis verfügbar ist.
3. Der Fuzzy-Regler lernt die Regeln selbst unter Verwendung von Meta-Wissen, aus dem erkennbar ist, ob eine durchgeführte Kontrollaktion gut oder schlecht war. Vorschläge für diese Technik finden sich unter anderen in Werken von Scharf (Scharf 1985), Grauel (Grauel 1995) und Procyk (Procyk 1979).
4. Fuzzy-Systeme können durch die Integration der Technologie der Neuronalen Netze mit Lernfähigkeit erweitert werden (Keller 2000).

Die Kombination der beiden Technologien der Fuzzy Logic und der Neuronalen Netze wird Neuro-Fuzzy genannt und kann die Vorteile beider Technologien kombinieren. Künstliche Neuronale Netze sind nach dem Vorbild von biologischen Informationsprozessen geschaffen. Sie lernen aus Beispielen und können daraus Informationen abstrahieren, die zu gültigen Entscheidungen in neuen, ähnlichen Fällen führen. Dabei ist ein hoher Grad an Parallelität und Redundanz gegeben (Kratzer 1990).

Ein Optimierungspotenzial für die Regelbasis zur Bestimmung einer Fehllage des Druckbildes ergibt sich in einem kooperativen Neuro-Fuzzy-System. Bei einem solchen System arbeitet das spätere Fuzzy-System und das Neuronale Netz grundsätzlich unabhängig voneinander. Die Kopplung besteht darin, dass Parameter des Fuzzy-Systems vom Neuronalen Netz erzeugt oder optimiert werden (Nauck 1996). Die durch Kombinatorik erzeugte Regelbasis wird dabei zu einem Modell. Durch eine vorgegebene Lernaufgabe wird versucht, die Regelbasis anzupassen. Das resultierende Fuzzy-System gelangt dann erst zum Einsatz, wenn der Lernvorgang abgeschlossen ist. Geeignet ist dafür die Gewichtung (der Plausibilitätsgrad) der Fuzzy-Regeln. Bei diesem einfachen Ansatz wird durch die Gewichte die Ausgabe-Fuzzy-Menge einer Regel multipliziert, wodurch die Fuzzy-Menge durch Stauchung oder Streckung modifiziert wird. Die Gewichte können mit Hilfe eines einfachen Neuronalen Lernverfahrens, beispielsweise der Delta-Regel oder Error-Backpropagation-Algorithmus, adaptiert werden. Dieser Ansatz ist in kommerziellen Fuzzy-Entwicklungsumgebungen implementiert, z.B. in fuzzyTech der Inform GmbH.

Ausgangspunkt der Optimierung ist die durch Kombinatorik entstandene Regelbasis (s. Tabelle 8). In diesem Fall gehören 24 Regeln zur Regelbasis. Ein Ziel der Optimierung ist die Reduzierung der Anzahl der Regeln durch Vermeidung von Redundanzen und die damit verbundene Reduzierung der Verarbeitungszeit bei der Anwendung des Algorithmus in der online-Kontrolle. Je geringer die Anzahl der zu durchlaufenden Regeln, umso schneller ist die Auswertung des jeweiligen Beobachtungspunktes und umso schneller ist die Gesamtverarbeitung aller Beobachtungspunkte. Ein weiteres bedeutenderes Ziel der Optimierung der Regelbasis ist die Veränderung der Gewichte zur Verbesserung und Anpassung der Regelbasis auf die vorgesehene Kontrollaufgabe. Zur Optimierung der durch den Experten vordefinierten und angepassten Regelbasis wird in einer Simulation der Fuzzy-Regler mit Trainingsdatensätzen betrieben. In den Trainingsdatensätzen sind sowohl die Messwerte der Beobachtungspunkte wie auch die jeweilige Ausgangsgröße hinterlegt. Diese Datensätze können auf zwei verschiedene Weisen erstellt werden:

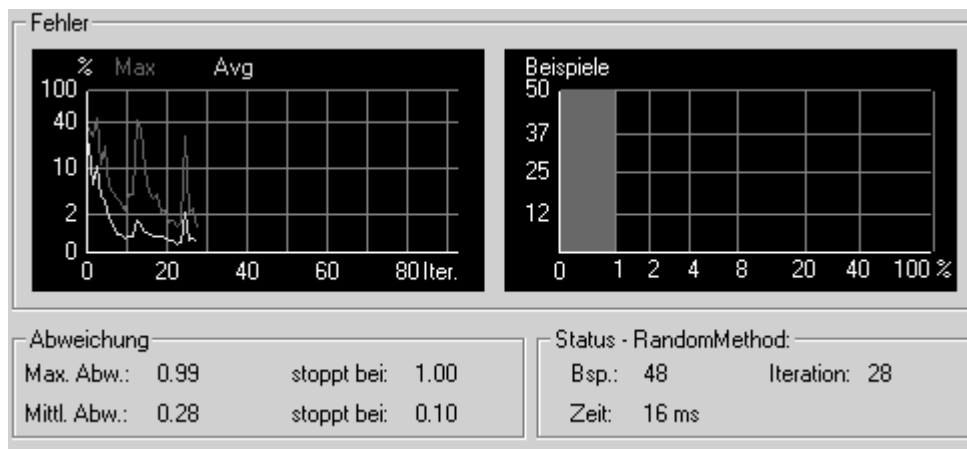
1. Reale Messdaten aus einer Produktionskontrolle werden mitgeschrieben und im späteren offline-Betrieb durch einen Experten beurteilt. Es entsteht eine Datensammlung mit den jeweiligen Messwerten der Beobachtungspunkte und den zugehörigen Gut- und Schlechtureteilen des Experten.

2. Eine andere ergänzende Methode ist die Simulation des Produktionsprozesses offline durch gezielte Lageveränderungen des Messbildes und damit des Druckbildes. Parallel werden in diesem Fall die entsprechenden Messwerte der Beobachtungspunkte und die durch die gezielte Lageveränderung bekannten Werte erfasst.

Die durch die Methoden erfassten Datensätze müssen für die Verarbeitung im Lernalgorithmus noch vorverarbeitet werden. Dies ist aus folgenden Gründen notwendig:

- Redundante Daten müssen beseitigt werden. Aus den mehreren tausend Druckbogen müssen repräsentative Datensätze erzeugt werden. In den Datensätzen sind auch „ungewöhnliche“ Konstellationen enthalten. Da der Trainingsprozess alle Daten mit gleicher Intensität einbezieht, soll den Standardfällen große Aufmerksamkeit zukommen und Ausnahmen weniger Beachtung finden.
- Konflikte innerhalb der Daten sollen beseitigt werden.
- Inkonsistenzen müssen erkannt werden. Da die Daten auch von realen Messungen stammen und mit einem Expertenurteil verknüpft sind, kann es zu widersprüchlichen Daten kommen, die erkannt und aussortiert werden.

Neben der Möglichkeit, die Daten manuell zu sortieren und vorzuverarbeiten, stellt die Anwendung eines Cluster-Algorithmus ein geeignetes Verfahren dar. Clustern bedeutet die Kombinierung von ähnlichen Daten zu einer Gruppe. Das Ergebnis des Cluster-Verfahrens ist ein Satz von typischen Daten, wobei jeder typische Datensatz ein Cluster repräsentiert. Die Ähnlichkeit der Datensätze wird durch so genannte Toleranz zwischen den einzelnen Variablen beschrieben. Am Anfang des Cluster-Algorithmus wird die geometrische Distanz aller Datensätze berechnet. Im folgenden Schritt werden die Datensätze, deren Distanz geringer als die Toleranz ist, zusammengefasst und sortiert. Aus jeder Kombination entsteht ein neuer Datensatz und ersetzt die jeweiligen Datensätze. Verschiedene Techniken unter Einsatz von Fuzzy-Algorithmen bieten sich für diese Aufgabe an. In der Literatur werden von Bonfig (Bonfig 1992), Tilli (Tilli 1993a) und Zimmermann (Zimmermann 1993) Verfahren und Anwendungen vorgestellt, die sich an diese Aufgabe anpassen lassen. Im Ergebnis des Cluster-Verfahrens stehen die Datensätze von Druckbogen zur Verfügung, die für das Neuronale Netz zur Optimierung der Regelbasis verwendet werden. Es entsteht eine Zusammenstellung von Messwerten, die die Gesamtanzahl von Druckbogen repräsentieren. Die Regelbasis enthält durch die Plausibilitätsgrade ein entsprechendes Gewicht. Durch Veränderung dieser wird die Wirkung jeder einzelnen Regel auf das Endergebnis gesteuert. Während des Lernprozesses werden diese Regeln zu einem Teil des Neuronalen Netzes, jede Regel ist ein Neuron. Bei dem mehrfachen Durchlauf der Datensätze der Druckbogen durch dieses Netzwerk werden die Gewichte der Regeln verändert, und zwar so, dass die Ausgabeabweichung, die durch jeden Eingangsdatensatz erzeugt wird, minimiert wird. Bei jeder Iteration wird nur in kleinen Schritten in die verbesserte Richtung verändert. Liegt der Gesamtfehler unter einer vorgegebenen Toleranz, ist der Lernprozess abgeschlossen (s. Abbildung 21).



11	klein	weit	weit	<input type="checkbox"/> 0.50 <input type="checkbox"/>	falsch
12	klein	weit	weit	<input checked="" type="checkbox"/> 0.50 <input type="checkbox"/>	wahr
13	gross	weit	weit	<input type="checkbox"/> 0.50 <input type="checkbox"/>	falsch

Abbildung 21: Lernprozess des Neuronalen Netzes

Es zeigt sich, dass einige Regeln nach dem Lernprozess einen Plausibilitätsgrad von 'null' erhalten. Diese Regeln haben keinen Einfluss auf das Ergebnis und können gelöscht werden. Im Beispiel für die Regelbasis zur Erkennung einer Fehllage des Druckbildes ergibt sich die in Tabelle 9 dargestellte optimierte Regelbasis.

WENN			DANN	
'Absolutdifferenz'	'Differenz_oben'	'Differenz_unten'	DoS	'EinzelPosition'
klein	nah	nah	1.00	falsch
klein	weit	nah	0.80	falsch
klein	nah	weit	0.80	falsch
klein	weit	weit	0.50	falsch
klein	weit	weit	0.50	wahr
nah	weit	weit	1.00	wahr
nah	nah	nah	1.00	falsch
nah	weit	nah	0.80	falsch
nah	nah	weit	0.80	falsch
groß	nah	nah	0.80	falsch
groß	weit	nah	1.00	falsch

groß	nah	weit	1.00	falsch
groß	weit	weit	0.60	falsch
groß	weit	weit	0.60	wahr

Tabelle 9: Optimierte Regelbasis

In Abbildung 22 sind als Ergebnis die Abhängigkeiten der Variablen 'Absolutdifferenz' und 'Differenz_Oben' zur Ausgangsgröße 'Zugehörigkeitsgrad EinzelPosition' dargestellt. Die Funktion ist eine lückenlose Fläche und zeigt damit, dass das Regelwerk vollständig ist. Auch ist eine Interpretation des Expertenwissens möglich. Es spiegelt sich das Entscheidungsverhalten des menschlichen Experten bei der Bestimmung der Zugehörigkeit eines Beobachtungspunktes zu der korrekten Druckbildlage wider.

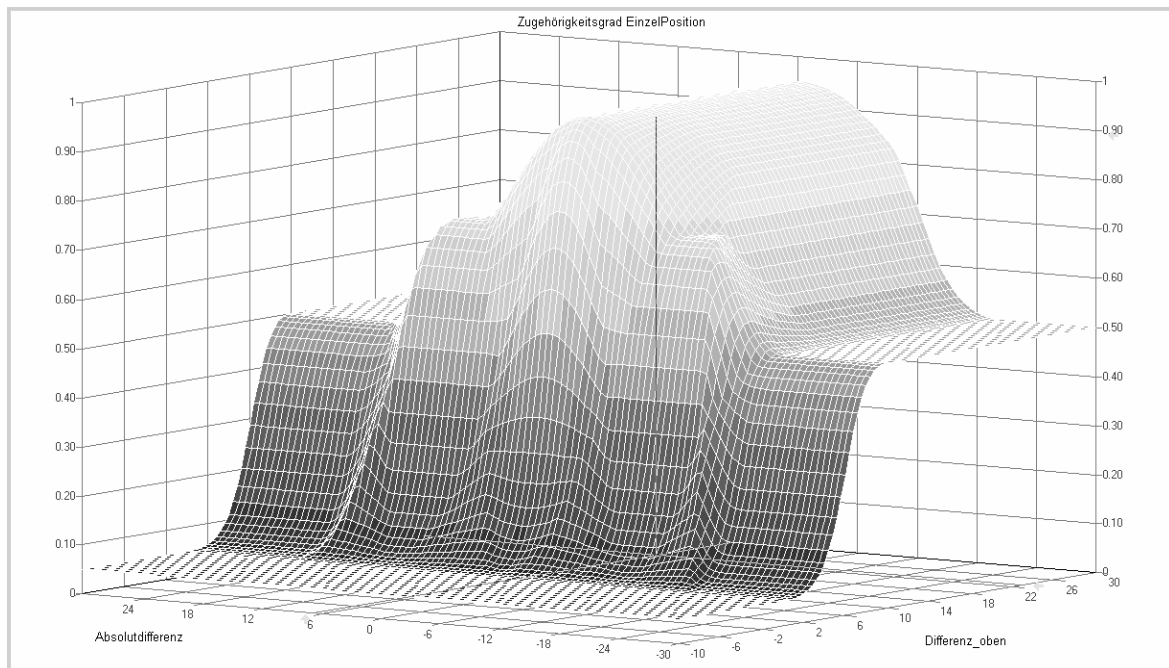


Abbildung 22: Darstellung der Zugehörigkeitsfunktion der Ausgangsvariable 'EinzelPosition'

Die Kombination von Clusterung der Daten, Neuro-Fuzzy und Fuzzy Logic stellt ein leistungsfähiges Werkzeug für die Entwicklung und Anwendung intelligenter Technologien dar. In Abbildung 23 sind die Anwendung und die Kombination der Techniken dargestellt. Das Expertenwissen fließt in die Erfassung der realen Datensätze und in die Formulierung der Regelbasis für das Fuzzy-System. Nach der Clusterung werden die typischen Datensätze mit einem Neuronales Netz verwendet, um das Regelwerk des Fuzzy-Systems zu optimieren. Das Neuronales Netz wird in diesem Fall also nur offline bei der Entwicklung der Regelbasis verwendet. Der optimierte Fuzzy-Algorithmus ist für den Einsatz in einem online-Kontrollsystem geeignet.

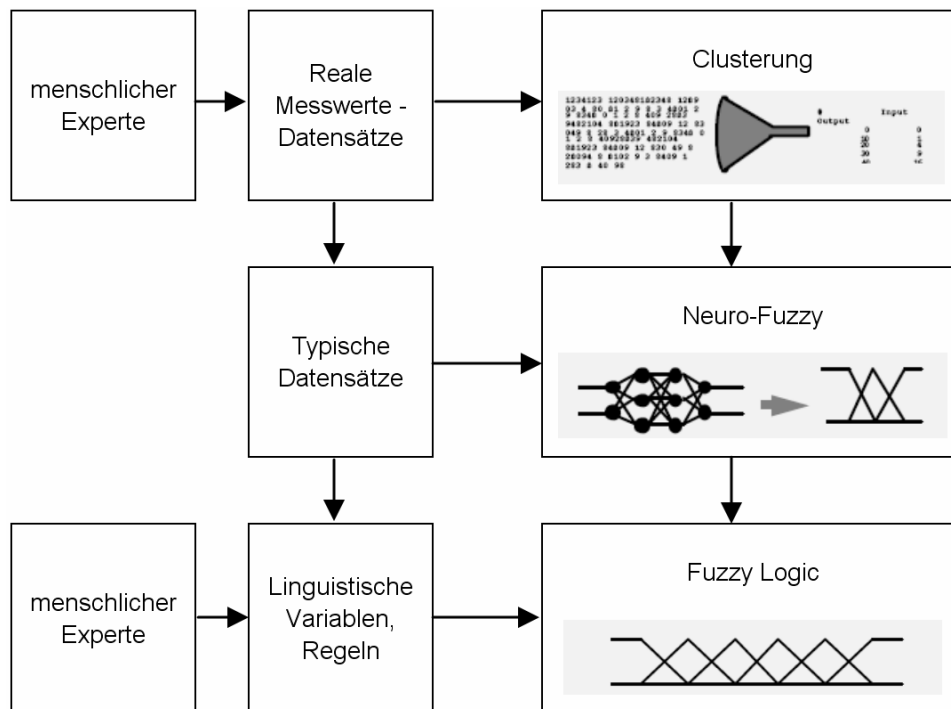


Abbildung 23: Anwendung von Clustering, Neuro-Fuzzy und Fuzzy Logic (Inform 2001)

4.5 Anwendung Genetischer Algorithmen

In der Einteilung intelligenter Verfahren finden sich bei Madey (Madey 1994) in Abbildung 11 auch Genetische Algorithmen bzw. Evolutionsstrategien. Sie eignen sich vor allem für Planungs- und Optimierungsprobleme, die ab einer gewissen Komplexität nur selten mit konventionellen Lösungen adäquat modelliert werden können. Derartige Probleme werden durch Genetische Algorithmen bzw. Evolutionsstrategien nicht auf dem herkömmlichen, algorithmischen Weg gelöst, sondern nach dem Vorbild der biologischen Evolution und der molekularen Genetik. Dazu werden zufällig Start-Lösungen generiert, aus denen Lösungen gemäß dem Darwinschen Prinzip, „survival of the fittest“, anhand multidimensionaler Bewertungsfunktionen ausgewählt werden (Moros 1999) (Rechenberg 1973). Hierbei handelt es sich zunächst nur um suboptimale Lösungen, die es zu verfeinern gilt. Dazu werden diese Lösungen – gemäß biologischem Vorbild - mutiert und miteinander rekombiniert. Die besten Individuen (Lösungen) einer Generation erhalten eine Überlebenswahrscheinlichkeit, die proportional zu ihrer Fitness ist. Nach hinreichend vielen Generationen werden auf diesem Weg optimale oder annähernd optimale Lösungen generiert. Eine detaillierte Einführung in die Technologie der Genetischen Algorithmen und Evolutionsstrategien ist in (Schwefel 1995), (EducHTH 1999) und (EfiTrading 2001) ausgeführt. Eine Anwendung in der Druckbildkontrolle bietet sich bei der Identifizierung

von gedruckten Codierungen. So besitzen die meisten Verpackungen von Konsumgütern den EAN-Code, auf Medikamentenverpackungen sind Pharmacodes gedruckt und häufig werden zur Identifizierung der Verpackung firmeninterne Strichcodierungen mitgedruckt. Den meisten Codierungen unterliegt ein mehr oder weniger komplexer mathematischer Algorithmus. Bei der Kontrolle in einem Weiterverarbeitungsprozess ist es jedoch nicht immer möglich bzw. notwendig, bei einer Kontrolle von Codierungen eine vollständige Decodierung durchzuführen. Solch eine Kontrolle würde eine vollständige Hinterlegung des mathematischen Modells im Kontrollsystem voraussetzen und außerdem eine vollständige Erfassung des Codewortes bedingen. Gerade dieser Aspekt ist bei einer Rückseitenlesung von bedruckten Blisterverpackungen nicht immer gegeben. Wird jedoch eine geometrische Kontrolle eines Codefragments und eine automatische Erkennung des mathematischen Modells angestrebt, so bieten Evolutionsstrategien eine sehr effektive Technologie zur Analyse und Bildung eines Kontrollalgorithmus. Ein einfacher Bildverarbeitungsprozess bildet relative Werte für die Längen der einzelnen „Lücken“ und „Striche“.

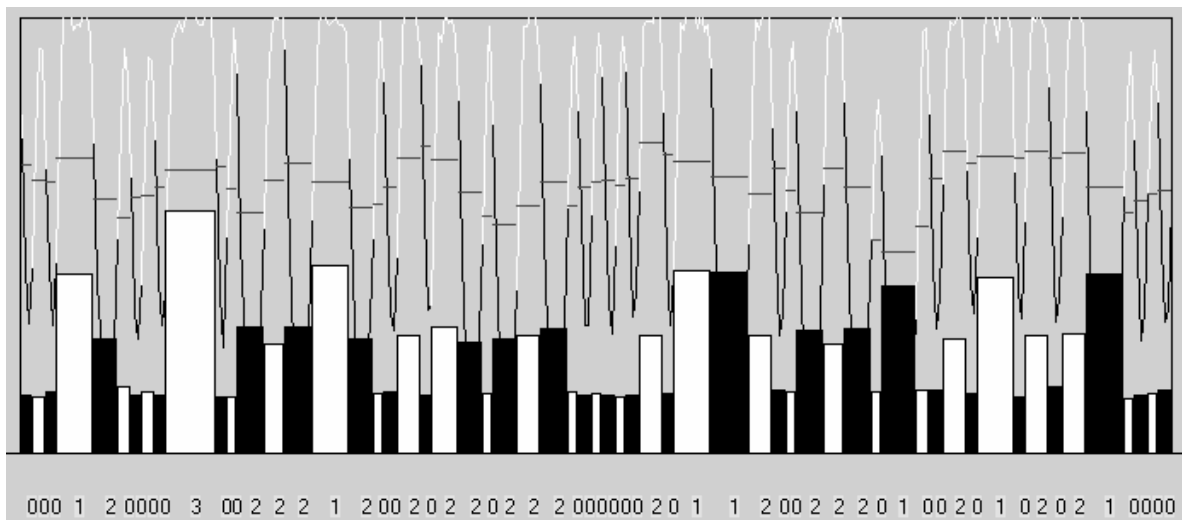


Abbildung 24: Klassifizierung einer Codierung mit Evolutionären Algorithmen

Im Lernmodus werden nun durch Evolutionäre Algorithmen die entsprechenden Längen der einzelnen Bereiche klassifiziert. Eine anfängliche Startpopulation wird zufällig initialisiert und durch Methoden der Rekombination, Mutation und Selektion iterativ optimiert. In die Fitnessfunktion, die Bewertung eines Individuums, fließen die Minimierung der Anzahl der Klassen und die Reihenfolge der Klassen ein. Das Ergebnis ist das „fitteste“ Individuum, welches anschließend durch ein einfaches Regelwerk verifiziert wird, beispielsweise haben sich eine Mindestanzahl von zwei Klassen und eine Mindestzahl von fünf Codeteilen als sinnvoll erwiesen. Anderenfalls wird bei der autonomen Anwendung dieses Lernverfahrens eine zu große Anzahl von möglichen Codierungen im

realen Druckbild erlernt. Das Ergebnis des Lernverfahrens ist eine Definition der jeweiligen Klassen und die Codefolge der einzelnen Klassen. In Abbildung 24 ist eine solche Klassifizierung für einen EAN-Code dargestellt. Die unter den Codestücken dargestellten Zahlen sind die Bezeichnungen für die erlernten und zugeordneten vier Klassen. Dies ermöglicht im späteren Messprozess eine sehr schnelle Erkennung und fehlertolerante Verifizierung des Codes.

4.6 Versuche und Ergebnisse

In Experimenten wird die Leistungsfähigkeit der gefundenen Anwendungen intelligenter Technologien näher untersucht. Besonderes Augenmerk fällt auf die Verarbeitungsgeschwindigkeit und auf die Qualität der Ergebnisse. In einer Simulationssoftware werden reale Messbilder mit Lageverschiebungen und simulierten Verschiebungen ausgewertet.

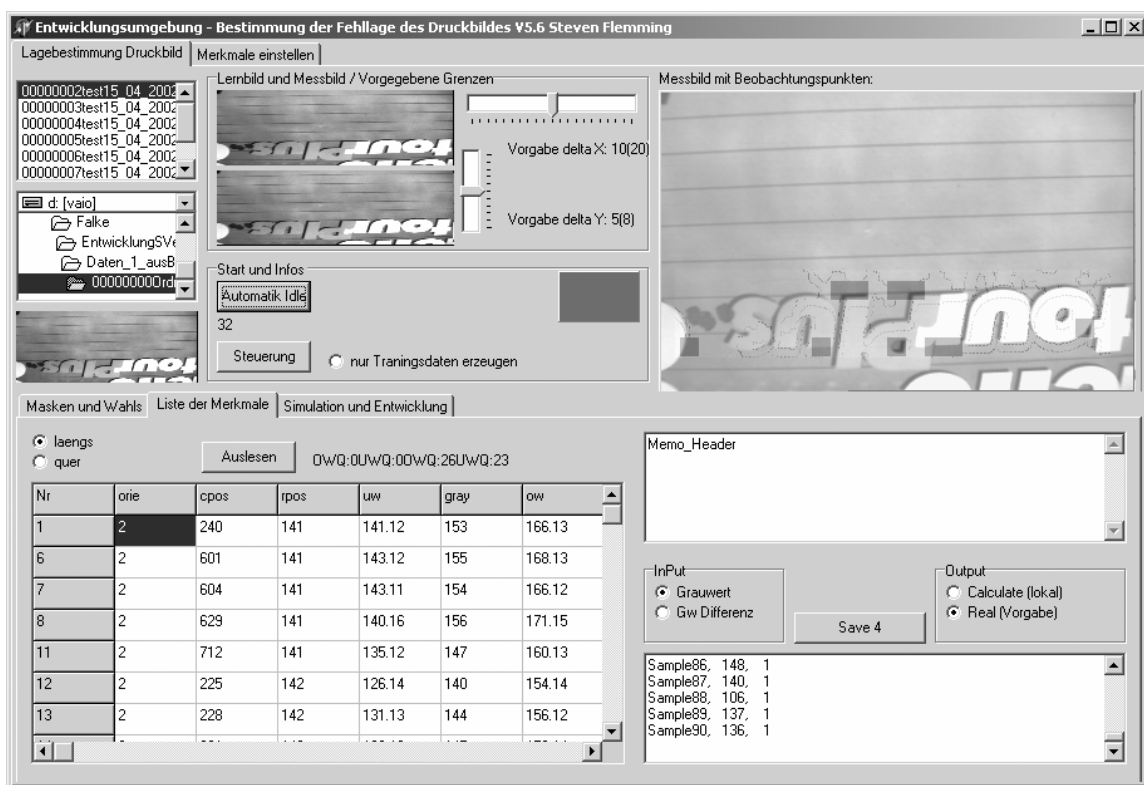


Abbildung 25: Entwicklungssoftware

In Abbildung 25 ist ein Bildschirmfoto der Entwicklungssoftware dargestellt. Wesentliche Funktionen sind:

- Messdatenverwaltung von abgelegten Druckbildern
- Parametrierung der Messaufgabe
- Simulation von Lageverschiebungen
- Erzeugen von Messwerten der Beobachtungspunkte
- Überprüfung der entwickelten Algorithmen

Zur Überprüfung der Verarbeitungsgeschwindigkeit wird durch Zeitmessung des reinen Rechenalgorithmus ein weiteres Softwareprogramm verwendet (s. Abbildung 26). Durch die Kombination aller möglichen Messwerte kann die maximale Verarbeitungszeit der Software für 10.000 Merkmale überprüft werden und können die jeweiligen Ergebnisse mit den simulierten Werten verglichen werden.

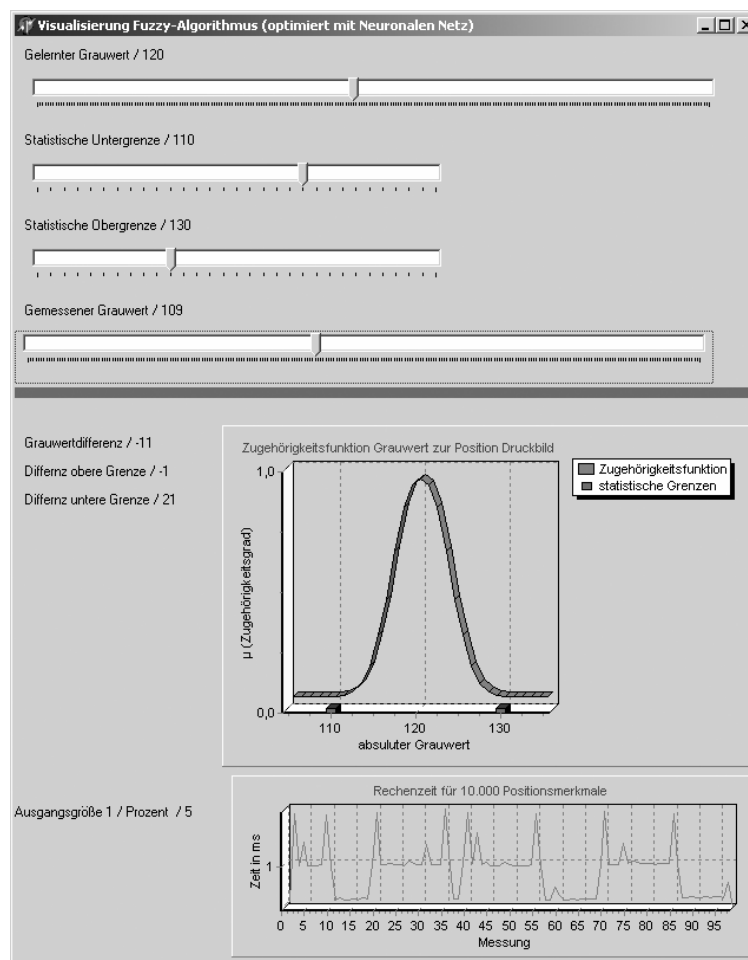


Abbildung 26: Software zur Ermittlung der Rechenzeit

Bei der Entwicklung der in diesem Kapitel vorgestellten Algorithmen und bei den Versuchen wird als Versuchsumgebung ein Intel Pentium basierter PC mit Microsoft Windows XP als Betriebssystem verwendet. Für die Benutzeroberfläche, Simulationssoftware, Messwertsimulation, Implementierung der Fuzzy-Systeme, Überprüfung der Ergebnisse der Optimierung der Regelbasis durch Neuronale Netze, die Anwendung der Genetischen Algorithmen und die Zeitmessung eignet sich die objektorientierte Programmiersprache Pascal (Borland Delphi). Die fuzzyTECH Sprache (FTL) besitzt als standardisierte Sprache zum Lesen und Schreiben von Fuzzy-Systemen Vorteile bei der Entwicklung und Implementierung des Fuzzy-Algorithmus. Die Software fuzzyTECH 5.50 der Inform GmbH als Werkzeug zur Umsetzung und Visualisierung der Fuzzy-Systeme und zum Debugging der Neuronalen Netze ermöglicht eine schnelle und angepasste Entwicklung. Datengrundlage für die Entwicklung und die Versuche bilden ca. 7.500 reale Druckbilder von verschiedenen Verpackungsprodukten, aufgenommen mit einem Produktkontrollsystem der Firma PITSID (s. Abbildung 27).





Abbildung 27: Auswahl Druckbilder

Die Versuche zur Bestimmung der Verarbeitungszeit des Fuzzy-Algorithmus ergaben eine maximale Verarbeitungszeit von 3 ms für 10.000 Beobachtungspunkte je Druckbild (s. Abbildung 28). Die starken Schwankungen der Messwerte liegen in den für jede Lage des Druckbildes unterschiedlichen Werten für die Beobachtungspunkte und der damit unterschiedlichen Anzahl von abzuarbeitenden Regeln. Es zeigt sich eine Abhängigkeit der Druckbildlage zur Verarbeitungszeit des Fuzzy-Algorithmus. Eine weitere Ursache für die Streuung der Messwerte ist im Betriebssystem des Rechners begründet. Da das verwendete Betriebssystem Microsoft Windows XP in der Grundkonfiguration nicht echtzeitfähig ist, kommt es während der Berechnung zu Latenzzeiten, in denen nicht die gesamte Rechenkapazität dem Fuzzy-Algorithmus zugeteilt wird.

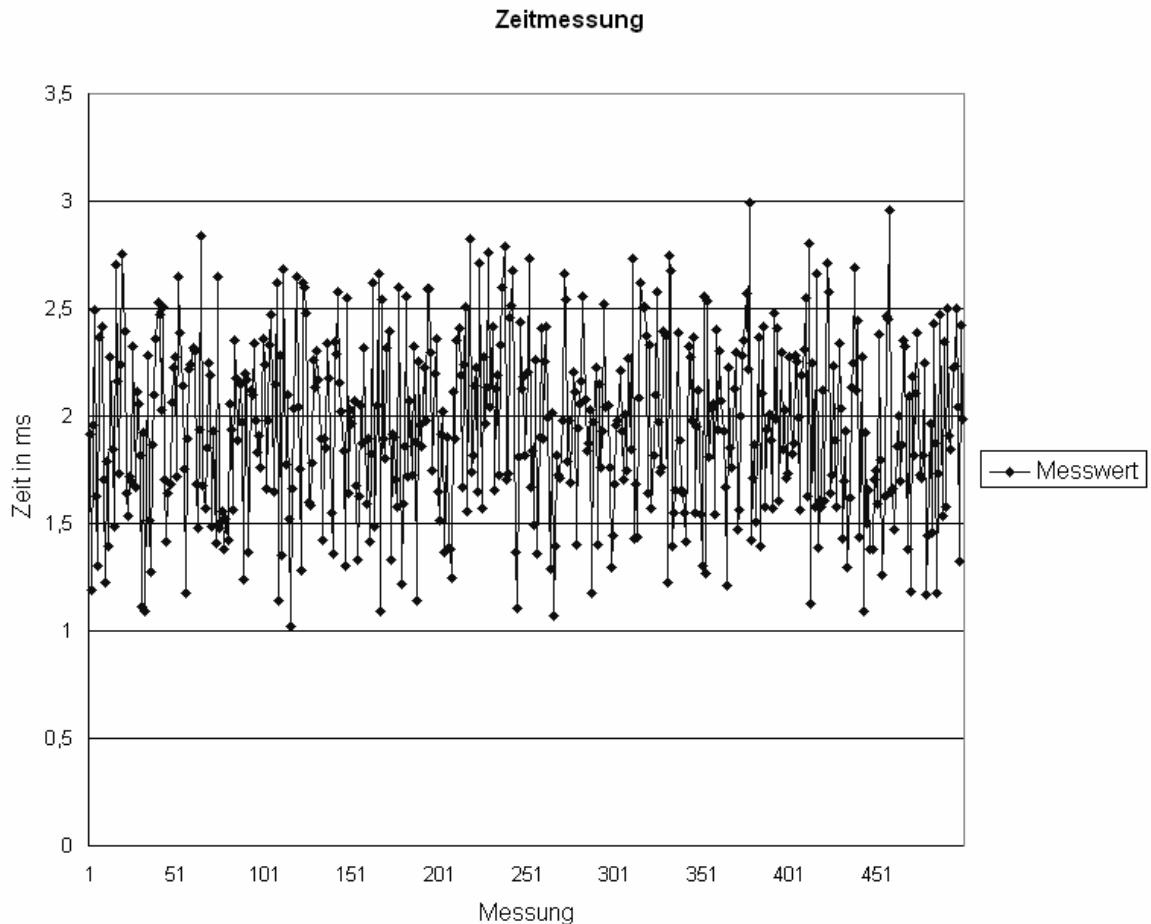


Abbildung 28: Messwerte der Zeitmessung für den Fuzzy-Algorithmus

Die Verarbeitungsgeschwindigkeit ist auch direkt abhängig von der Leistungsfähigkeit des Prozessors. Um die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Fehlfragebestimmung beurteilen zu können, wird diese mit anderen notwendigen Verarbeitungsschritten der Software verglichen (s. Abbildung 29). Dabei zeigt sich, dass die mittlere Verarbeitungszeit des Fuzzy-Algorithmus mit ca. 2 ms ausreichend ist. Bei einer angestrebten Gesamtverarbeitungszeit vom Startsignal bis zur Bereitstellung eines Ausgangssignals von 30 ms lässt sich der Algorithmus in eine online-Kontrolle von Druckprodukten integrieren. Bei der Verwendung eines echtzeitfähigen Betriebssystems (durch spezielle Konfigurationen und Verwendung von Echtzeittools modifizierte Microsoft Windows und Linux-Versionen) ist von einer Reduzierung der Verarbeitungszeit auszugehen. Bei der stetigen Steigerung der Leistungsfähigkeit von Prozessoren ist durch deren Einsatz im Zielsystem eine weitere Reduzierung der Verarbeitungszeit zu erreichen.

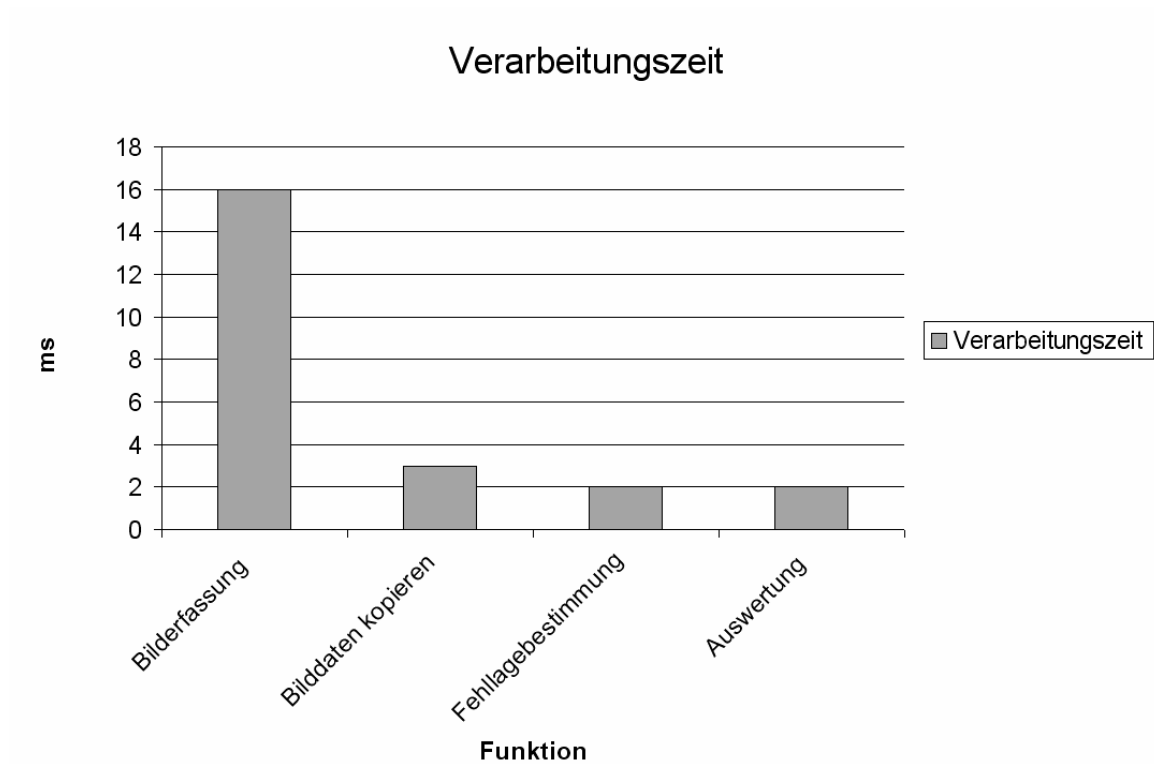


Abbildung 29: Vergleich der Verarbeitungszeit

Um Ergebnisse zur Funktion des Fuzzy-Algorithmus zur Fehllagebestimmung von Druckbildern beurteilen zu können, werden folgende Versuche durchgeführt:

1. Reale Messwertreihen werden während des Verarbeitungsprozesses mitgeschrieben. Zu diesem Zweck werden die Sensordaten der Kamera als digitale Bilder in Dateien gespeichert. Im folgenden offline-Prozess wird für jedes gespeicherte Bild ein von einem menschlichen Experten erstelltes Urteil zur Fehllage erfasst und gespeichert. Diese Datensätze werden in der Simulationssoftware (Abbildung 25) geladen und durch den Fuzzy-Algorithmus bewertet. Die Ergebnisse werden dann mit den hinterlegten Expertenurteilen verglichen.
2. Aus den realen Messdaten werden einzelne digitale Bilddaten ausgewählt. Mit einer Bildverarbeitungssoftware werden die Inhalte dieser Bilder verschoben. Wird jedes Bild dabei in jeder Richtung um 25 Schritte verschoben, entsteht pro Versuchsbild eine Datenmenge mit 2601 Bildern. Durch eine Festlegung der Toleranz auf 10 Schritte wird für jedes generierte Bild zusätzlich das Zielurteil hinterlegt. Auch diese Datensätze werden in der Simulationssoftware geladen, mit dem Fuzzy-Algorithmus bewertet, mit dem Zielurteil verglichen und die Ergebnisse ausgewertet.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt eine gute Korrelation zwischen den Expertenurteilen und der Urteile des Fuzzy-Algorithmus. In Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Im Hintergrund der Abbildungen ist das jeweilige Druckbild dargestellt. Die Säulen der Simulationswerte (Istwert) stellen das theoretische Ergebnis dar. So müsste beispielsweise eine absolute Lageverschiebung von acht Schritten bei 1.000 Proben zu 1.000 „Gut“-Urteilen für die Druckbildlage führen. Sowohl bei den Expertenurteilen wie auch bei den Ergebnissen des Fuzzy-Algorithmus ist bei Annäherung der Lageverschiebung an den Toleranzwert von 10 eine Abnahme der „Gut“-Urteile zu beobachten.

Druckbild 1

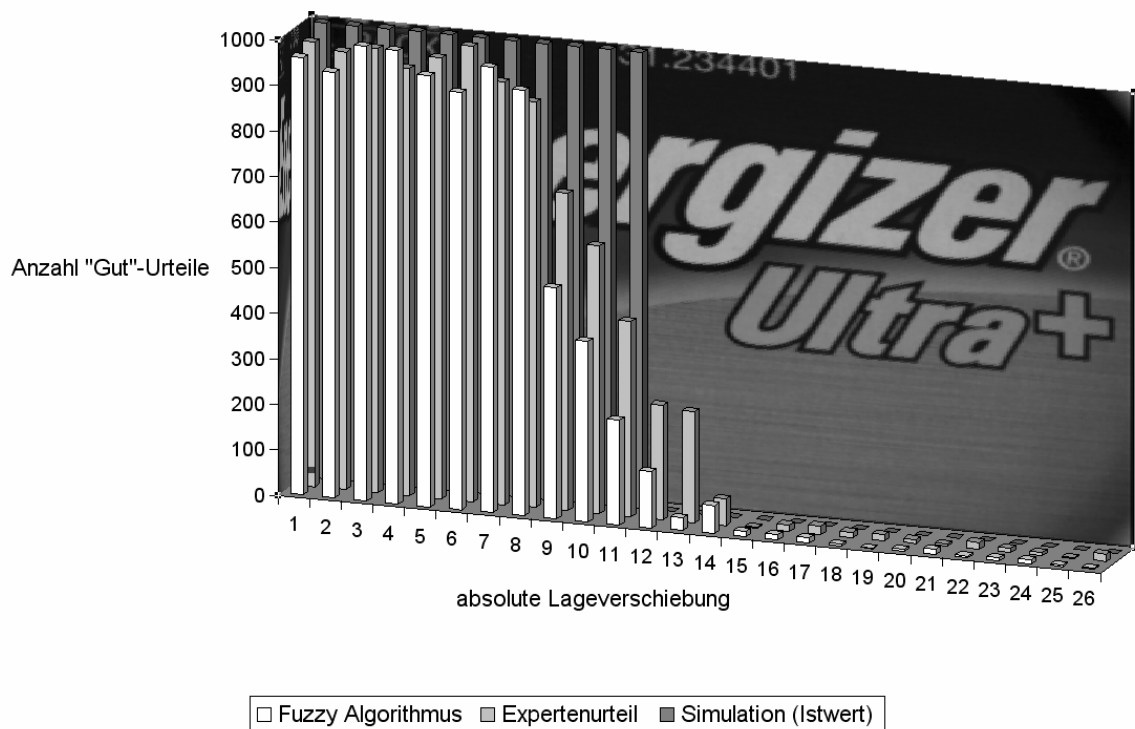


Abbildung 30: Ergebnisse des Fuzzy-Algorithmus für Druckbild 1

Dieser Effekt wie auch die abnehmende Anzahl von „Gut“-Urteilen bei Überschreiten der Toleranzgrenze des Fuzzy-Algorithmus ist auch in den Expertenurteilen ersichtliche. Die Ursache dafür liegt in der Entwicklung des Algorithmus. Der Erstellung der Regelbasis und der Datensätze für den Lernalgorithmus des Neuronalen Netzes zur Erstellung der optimierten Regelbasis lagen die gleichen Daten zu Grunde.

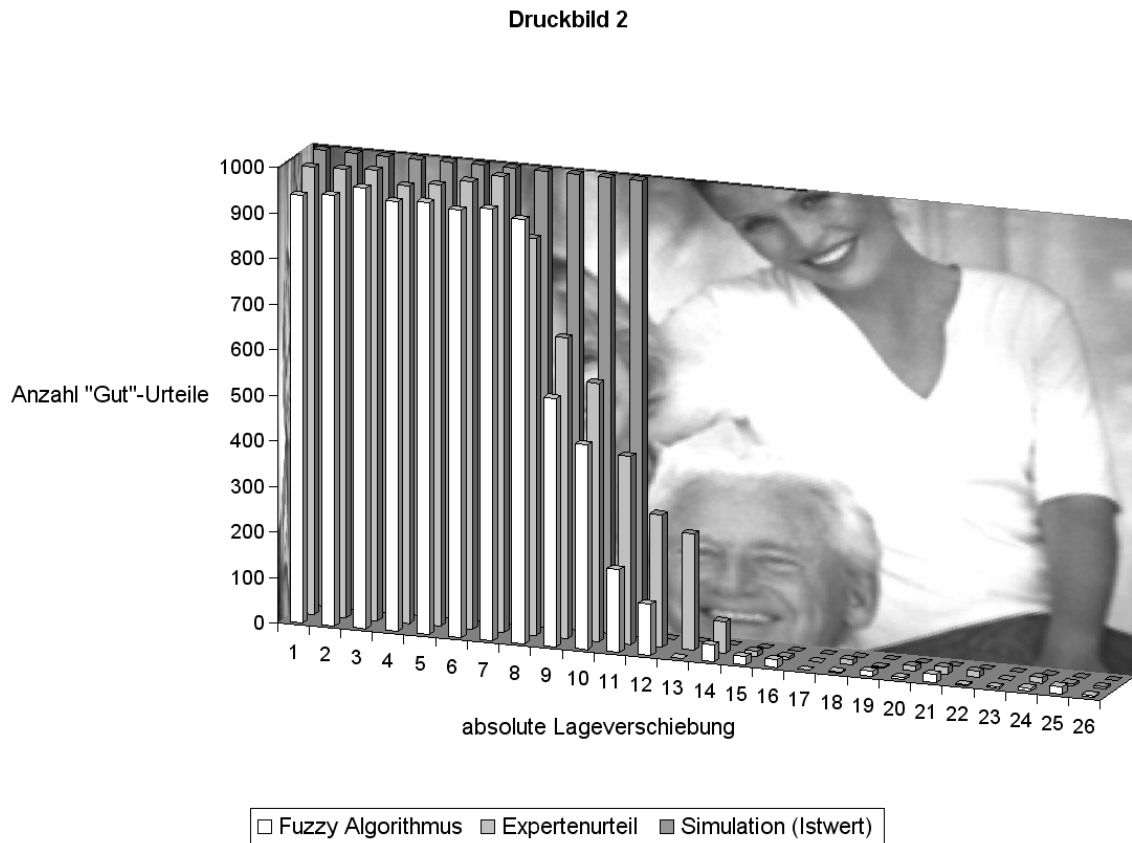


Abbildung 31: Ergebnisse des Fuzzy-Algorithmus für Druckbild 2

Weiterhin zeigt sich, dass die Anzahl der „Gut“-Urteile vom Druckbild selbst abhängen. Je nach Anzahl der Linien, Helligkeitsunterschiede und Strukturen werden im Druckbild unterschiedliche Mengen von Merkmalen gefunden, die zur Erkennung der Druckbildlage geeignet sind. Deutlich wird der Effekt in Abbildung 32. Das Druckbild enthält überwiegend vertikale Linienstrukturen. Dementsprechend ist die Anzahl verwertbarer Merkmale für die horizontale Lage sehr gering. Dies erklärt die größeren Abweichungen der Anzahl der „Gut“-Urteile zu den Istwerten. Sowohl der menschliche Experte als auch der Fuzzy-Algorithmus kommt bei diesem für die Bestimmung der Druckbildlage „ungünstigen“ Druckbild zu schlechteren Ergebnissen als bei Druckbildern mit „günstigeren“ Merkmalen.

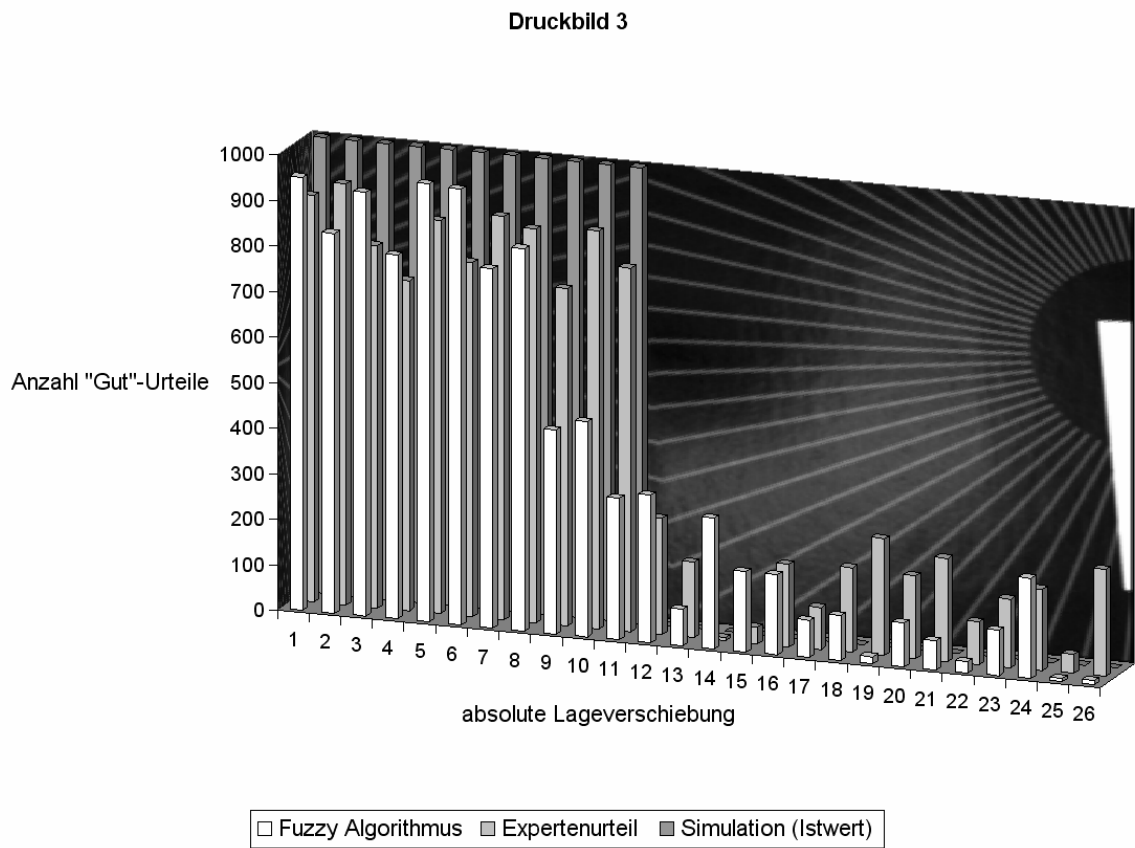


Abbildung 32: Ergebnis des Fuzzy-Algorithmus für Druckbild 3

5 Zusammenfassung

5.1 Schlussfolgerungen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Anwendbarkeit intelligenter Technologien in der online-Kontrolle von Druckprodukten.

Die Betrachtung der Techniken zur Bewertung der Qualität von bedruckten Produkten zeigt die Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Druckqualität. Diskrepanzen zwischen den verfügbaren Messverfahren und Methoden sowie der visuellen Bewertung spiegeln sich in der sehr anpassbaren und unpräzisen Definition der Druckqualität wider. Der Anspruch an die Druckqualität wird rekursiv über das Produkt und deren wesentliche qualitätsbestimmende Eigenschaften und über den Verwendungszweck unter Berücksichtigung der Ansprüche des Verbrauchers bestimmt. Diese sind vorrangig dem Hauptzweck des Druckens als Vervielfältigung von Informationen in Form von Bildern und Text auf das menschliche Auge als wahrnehmendes Sinnesorgan ausgerichtet. Bisherige gängige Messverfahren erfassen isolierte Größen, die überwiegend zur Kontrolle und Regelung des Herstellungsprozesses geeignet sind.

Es ist kein vollständiges System bekannt, das in der Lage ist, die praktizierte visuelle Kontrolle zu ersetzen. Dieser Aufgabe sollen sich Druckkontrollsysteme stellen. Durch deren Einsatz soll neben einer Reduzierung der manuellen visuellen Kontrolle eine durchgehende Kontrolle des bedruckten Produktes auch nach dem eigentlichen Druckprozess in Weiterverarbeitungsprozessen möglich werden. Unzulänglichkeiten bei der Messung im Druckbild durch den Mangel an entsprechenden Verfahren und Algorithmen werden zurzeit durch indirekte Messungen außerhalb des Druckbildes umgangen. Es werden spezielle maschinenlesbare Kontroll- und Messelemente mitgedruckt, gemessen und Annahmen über die Qualität des Druckbildes aufgestellt.

Dass die Anpassung des Druckbildes an das Messsystem und die Vorstellung, dass die damit erzeugten Messwerte mit dem visuellen Eindruck korrelieren, nicht der beste Weg ist, zeigt sich in den trotzdem notwendigen häufigen visuellen Kontrollen und Verifizierungen der Messwerte durch den Menschen.

Der erste entscheidende Schritt ist also, den Messort für die Beurteilung des Druckbildes und damit für die Beurteilung der Druckqualität in das Druckbild selbst zu legen. Das ist in realisierten Applikationen umgesetzt. Unter Berücksichtigung der Investitionskosten und der Baufreiheit in Verarbeitungsmaschinen stellt die Reduzierung der Messfläche auf einen repräsentativen Druckbildbereich einen Kompromiss und einen Ausgangspunkt zum Übergang zur Ganzbogenkontrolle dar.

Der zweite entscheidende Schritt ist demnach, das Messsystem an diese Aufgabe und an das Bewertungssystem des Menschen anzupassen. Der Mensch bildet dabei nicht nur den Maßstab für die Kontrollgüte, sondern eignet sich als Modell, nach dessen Fähigkeiten die Funktionen des Druckkontrollsystems nachgebildet werden können.

Intelligente Technologien sind in der Lage, menschliches Verhalten bei der Lagekontrolle von Druckbildern nachzubilden. Die Messung direkt im Druckbild bedingt immer eine Lagebestimmung des gesamten Druckbildes und der entsprechenden gedruckten Elemente. Nur dann können Elemente im Druckbild zu messbaren und wiederfindbaren Merkmalen werden. Erfolgt die Messung in einem Weiterverarbeitungsprozess, steigt die Bedeutung der Bestimmung der Druckbildlage. Zum einen erfolgt eine durchaus fehlerbehaftete Neuausrichtung des Produktes und damit bestätigt eine korrekte Druckbildlage die richtige Position zum Werkzeug. Zum anderen wird an einem falschen Produkt mit großer Wahrscheinlichkeit keine „gute“ Druckbildlage ermittelt.

Die Nachbildung der Lagebestimmung von gedruckten Elementen durch einen menschlichen Beobachter ist als Modell zur Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus geeignet. Sowohl die Reduzierung des Druckbildes auf wenige Beobachtungspunkte wie auch die verbale Beschreibung bei der Erkennung der Fehllage des Druckbildes lassen sich durch unscharfe Mengen nachbilden. Durch die Lernfähigkeit und das Abstraktionsvermögen Neuronaler Netze lässt sich aus Musterdatensätzen mit jeweiligen Expertenurteilen die Regelbasis des Fuzzy-Systems optimieren.

Am Beispiel der Umsetzung von Expertenwissen bei der Bestimmung der richtigen Druckbildlage mit Hilfe von Fuzzy Logic und anschließender Optimierung der Wissensbasis mit Neuronalen Netzen wird die Eignung der Technologien als Werkzeug zur Entwicklung geeigneter Algorithmen gezeigt.

Die Erstellung der Regelbasis und der Datensätze für den Lernalgorithmus des Neuronalen Netzes zur Erstellung der optimierten Regelbasis erfolgte mit realen Daten. Die Korrelation der Ergebnisse des Fuzzy-Algorithmus mit den Bewertungen der Druckbildlage durch einen menschlichen Experten weist die Eignung der gefundenen Lösung zur Bestimmung der Fehllage des Druckbildes nach. Die gefundene Lösung bildet die Grundlage zur Kontrolle von Druckprodukten in Weiterverarbeitungsprozessen. Aufbauend auf der Lagebestimmung ist die Kontrolle von weiteren Merkmalen mit Ortsbezug im Druckbild möglich. Exemplarisch für die Erkennung spezieller Merkmale des Druckbildes und die Anwendung intelligenter Technologien zeigt der Einsatz Genetischer Algorithmen als Optimierungswerkzeug Potenziale zur Erkennung von regelmäßigen Strukturen und Liniencodes auf.

Versuche bestätigen die Eignung in Bezug auf die notwendigen kurzen Verarbeitungszeiten. Durch die ermittelten Rechenzeiten der Algorithmen ist die online-Fähigkeit der Lösungen gegeben. Der geringe Rechenaufwand lässt den Einsatz preiswerter Rechenleistungen zu. Der Algorithmus arbeitet autonom, es sind keine Benutzereingaben oder Anpassungen beim Wechsel des Druckbildes notwendig. Die Lösung ist nicht auf die Anwendung der Druckbildkontrolle in der Stanzmaschine beschränkt und kann auch in anderen Prozessschritten der Herstellung von bedruckten Produkten zur Kontrolle verwendet werden - so zum Beispiel in Faltschachtelklebmaschinen und Abpackeinrichtungen. Der Wunsch einer Druckbildkontrolle besteht auch bei der Verwendung anderer Druckverfahren. Es besteht ein Potenzial für die Anwendung beim Flexodruck, Siebdruck und Digitaldruckverfahren. Die Verfahren und Algorithmen sind auch auf andere Anwendungsgebiete übertragbar, immer dann, wenn eine Bildinformation ein wesentliches Merkmal eines Produktes ist und ein korrektes Bild ein Qualitätsmerkmal ist. Die Qualitätsansprüche müssen nicht unbedingt nur konsumorientiert sein – die Auswertung von Werkstückmarkierungen oder Einzelnutzenmarkierungen bedingen auch eine (Fehl-) Lagebestimmung.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen die Eignung der Anwendung intelligenter Technologien in der online-Qualitätskontrolle von Druckprodukten. Die Lösung der einzelnen Teilaufgaben stellt einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Druckkontrollsystemen dar. Intelligente Technologien können Verhalten und Urteilsvermögen eines menschlichen Experten nachstellen und somit einen wesentlichen Beitrag zur Anpassung von Systemen zur Beurteilung von Druckbildern an das visuelle Urteil des Menschen leisten.

5.2 Ausblick

Die Verwendung intelligenter Technologien, die die einfache Verarbeitung von nicht exaktem Wissen erlauben (Fuzzy Logic), anhand von Beispielen trainiert werden können (Neuronale Netze) sowie gezielt nach optimierten Lösungen suchen können (Genetische Algorithmen), bringen das Erreichen der Zielsetzung nach einem automatischen Bildverarbeitungssystem, das zur online-Kontrolle von Druckprodukten geeignet ist und dabei die Druckqualität nach menschlichen Maßstäben bewertet, weiter. Trotzdem ist die Leistungsfähigkeit dieser Systeme noch weit von der Bildverarbeitungsleistung des Menschen entfernt. Neue Möglichkeiten ergeben sich mit der Weiterentwicklung und einer völlig neuen Betrachtung der Druckqualität. Eine Entwicklung eines besseren Modells und entsprechender Sensoren, die die Sinnesempfindungen des Menschen nachbilden und die Bildverarbeitungsfunktionen des Gehirns besser imitieren können, werden in Zukunft leistungsfähigere intelligentere Systeme ermöglichen, die eine visuelle

Kontrolle unterstützen und gegebenenfalls ersetzen können. Mit großer Sicherheit werden dabei die Methoden der intelligenten Technologien eine wesentliche Rolle spielen.

Die folgenden Punkte nennen einige Weiterentwicklungsmöglichkeiten der gefundenen Algorithmen. Durch eine Integration und Umsetzung der Algorithmen in ein bestehendes Druckkontrollsystem können gesammelte Ergebnisse und Erkenntnisse zur Weiterentwicklung und Optimierung genutzt werden. Erweiterungsmöglichkeiten ergeben sich in der Anwendung in Ganzbogen-Kontrollsystemen und die Verwendung von Farbkamerabildern. Die „Gut“-Lagebestimmung von gedruckten Elementen bildet die Grundlage für die Auswertung weiterer Merkmale des gedruckten Bildes: Kanten, Linien, Flächen, Texturen und Schrifterkennung. Auch für diese Aufgabenstellungen können menschliche Vorgehensweisen als Modell und intelligente Technologien zur Umsetzung dieser in Computerprogramme untersucht werden. Ausgehend von der rasanten Weiterentwicklung von Sensorsystemen und der stetigen Steigerung der Rechenleistungen von Prozessoren wird der Einfluss der Verarbeitungsgeschwindigkeit als begrenzender Faktor unbedeutender. Vielmehr werden immer komplexere Funktionen realisierbar sein.

Literaturverzeichnis

- (Abmayr 1994) Dr. Ing. Wolfgang Abmayr: "Einführung in die digitale Bildverarbeitung", 1. Aufl., Stuttgart, Teubner, 1994
- (Altrock 1991) C.v. Altrock, H.-J. Zimmermann: "Fuzzy Control dient als Basis für eine neue Rechnergeneration", in: Computerwoche, März, 1991, S. 29-32
- (Argus 2004) argus sensorsysteme GmbH: "Bildverarbeitungssystem AVS 2XX - Bedienungsanleitung", Kahla, 2004
- (Bagley 1967) J.D. Bagley: "The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms", in: Dissertationsschrift an der University of Michigan, 1967
- (Ballard 1982) D.H. Ballard, C.M. Brown: "Computer Vision", Engelwood Cliffs, Prentice-Hall, 1982
- (Barr 1981) A. Barr, E.A. Feigenbaum: "The Handbook of Artificial Intelligence", 1. Band, Mass., Morgan Kaufmann, 1981
- (Bässmann 1995) H. Bässmann, P.W. Besslich: "Ad Oculum - Digital Image Processing", London, Bonn, Boston, Madrid, Johannesburg, Melbourne, Mexico City, New York, Paris, Singapore, Tokyo, Toronto, u.a., International Thomson Computer Press, 1995
- (Beierle 2000) Christoph Beierle, Gabriele Kern-Isberner: "Methoden wissensbasierter Systeme", Braunschweig, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2000
- (Bezdek 1981) J.C. Bezdek: "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms", New York, Plenum Press, 1981
- (Biedermann 2004) Jochen Biedermann, Ludwig Cromme: "Echtzeit-Farbbildverarbeitung zur vollflächigen Kontrolle von Faltschachteln", in: Veröffentlichung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - <http://www.math.tu-cottbus.de/nam>, Cottbus, 2004
- (Bock 1997) F. Bock, H. Walter, M. Wilde: "A New Distortion Measure for the Assessment of Decoded Images Adapted to Human Perception", TH Darmstadt, 1997
- (Bonfig 1992) Karl Walter Bonfig und 7 Mitautoren: "Fuzzy Logik in der industriellen Automatisierung", Ehningen bei Böblingen, expert Verlag, 1992
- (Burkart 2003) Patrick Burkart: "Alles kontrollletti, oder?", in: Verpackungs-Rundschau www.verpackungsrundschau.de, 54. Jahrgang, 2003

- (Büttner 1969) J. Büttner: "Bedruckbarkeit als komplexe Eigenschaft von Papier, ihre Messung und ihre Beziehung zu den Elementargrößen", in: Dissertationsschrift an der TU Dresden, 1969
- (bvdm 2004) Bundesverband Druck und Medien e.V.: "Die deutsche Druckindustrie in Zahlen", Wiesbaden, 2004
- (bvdm 2005) Bundesverband Druck und Medien e.V.: "ProzessStandard Offsetdruck", Wiesbaden, 2004
- (Darwin 1859) C. Darwin: "On the origin of species by means of natural selection", (deutsche Übersetzung: Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl, Stuttgart, Reclam 1974), London, Murray, 1859
- (Duda 1972) R.O. Duda, P.E. Hart: "Use of the Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures", in: Communications of the ACM, Graphics and Image Processing. Band, 15. Jahrgang, Januar, 1972, S. 11..15
- (EducHTH 1999) EducHTH: "Genetische Algorithmen", in: www.educeth.ethz.ch/informatik/interaktiv/genalg/information.html, World Wide Web, 1999
- (EfiTrading 2001) EfiTrading: "Was sind genetische Algorithmen?", in: www.efitrading.ch/doku/algorithmen.shtml, World Wide Web, 2001
- (Englund 2003) Cristofer Englund, Josef Kindberg, Joakim Olsson, Björn Sjögren: "Offset print control", in: Technical report School of Information Science, Computer and Electrical Engineering Halmstad University, 2003
- (Ernst 1991) H. Ernst: "Einführung in die digitale Bildverarbeitung", 1. Aufl., München, Franzis Verlag GmbH, 1991
- (Faes 2002) Günter Faes: "Neuronale Netze in der Farbmeterik zur Bestimmung des Farbabstandes in der Qualitätsprüfung", in: Veröffentlichung der DyStar GmbH & Co. Deutschland KG, Leverkusen, 2002
- (Flemming 1996) Steven Flemming: "Fuzzy-Logik - Möglichkeiten zur Beschreibung des Farbannahmeverhaltens in Offsetdruckmaschinen", in: Diplomarbeit an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur in Leipzig, 1996
- (Flemming 1997a) Steven Flemming, Wolfgang Walenski: "Farbannahme im Offsetdruck – Einfluß der Oberflächenstruktur und Beschaffenheit des Papiers und der Druckbedingungen", Das Papier, Darmstadt, 1997
- (Flemming 1997b) Steven Flemming, Ulrike Herzau-Gerhard: "Calculation of trapping in offset lithography considering the visual impression by experts and the paper quality", in: Vortrag auf der IARIGAI Conference, London, 1997
- (Flemming 1998) Steven Flemming: "Fuzzy Logic in der Qualitätsbewertung", Polygraph, Frankfurt am Main, 1998

- (Flemming 2000) Steven Flemming: "Die Anwendung der Fuzzy Logic zur informationstechnischen Durchdringung von Verarbeitungsprozessen und zur Kontrolle der Verarbeitungsqualität unter besonderer Berücksichtigung des Bogenstanzens", in: Vortrag auf der VVD Fachtagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik, Dresden, 2000
- (Flemming 2002) Steven Flemming: "Verfahren zur Fehlererkennung und Fehlerbewertung von Druckprodukten", in: Patenschrift DE 199 17 899 C2, 2002
- (Fogel 1966) L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh: "Artificial Intelligence through Simulated Evolution", New York, John Wiley & Sohn, 1966
- (Fogel 1992) D.B. Fogel: "Evolving Artificial Intelligence", in: Dissertationsschrift an der University of California, San Diego USA, 1992
- (Fogel 1995) D.B. Fogel: "Evolutionary computation: toward a new philosophy of machine intelligence", in: www.natural-selection.com/misc/evolCompBook.html, New York, IEEE Press, 1995
- (Franke 2003) Karl-Heinz Franke, Torsten Machleidt: "Farbpixelklassifikation mittels partitionierender Clusteralgorithmen und Vergleich mit neuronalen Ansätzen", in: Wissenschaftlicher Beitrag der Technischen Universität Ilmenau, 2003
- (Fuchs 2003) Siegfried Fuchs: "Bildverarbeitung", in: Vorlesungsskript unter <http://pikas.inf.tu-dresden.de/~weser/Lehre/Mubi/mebvk.html>, 2003
- (Gonzalez 1987) R.C. Gonzalez, P. Wintz: "Digital Image Processing", 2. Aufl., Addison Wesley, 1987
- (Grauel 1995) Adolf Grauel: "Fuzzy Logik - Einführung in die Grundlagen mit Anwendungen", 1. Aufl., Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1995
- (Gribsch 2002) Peter Gribsch: "Qualitätssicherung durch Prozess-Standardisierung", in: Deutscher Drucker, Nr. 22 Juni, 2002
- (Gruhn 1978) G. Gruhn, W. Fratzscher, H. Krug u.a. (Herausgeberkollektiv): "Verarbeitungstechnik", Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978
- (Hättich 2004) Willy Hättich: "PrintInspector - Ein System zur prozessfolgenden Druckbildkontrolle", in: Veröffentlichung des Fraunhofer-Instituts Informations- und Datenverarbeitung IITB - www.iitb.fraunhofer.de, Karlsruhe, 2004
- (HDM 2004) Heidelberger Druckmaschinen AG: "100 Jahre Offsetdruck", in: www.heidelberg.com, World Wide Web, 2004
- (Hecht 2001) Thomas Hecht: "Bewertung von Unterschieden digitaler Farbbilder", in: FOGRA-Mitteilungen, Nr. 160 2001, München, FOGRA Forschungsgesellschaft Druck e.V., 2001
- (Heinsohn 1999) Heinsohn, Socher-Ambrosius: "Wissensverarbeitung: Eine Einführung", Heidelberg, 1999

- (Helbig 1980) T. Helbig, G. Conrad: "Zum Begriff der Druckqualität und Aspekte seiner Bestimmung", in: Papier und Druck (Druck und Verarbeitung), 29. Jahrgang, Nr. 2 1980, S. 17..19
- (Helbig 1993) T. Helbig, R. Bosse: "Druckqualität", Frankfurt am Main, Polygraph Verlag GmbH, 1993
- (Hering 1995) E. Hering, J. Gutkunst, U. Dyllong: "Informatik für Ingenieure", Düsseldorf, VDI-Verlag, 1995
- (Holland 1975) J.H. Holland: "Adaption in natural and artificial systems - Ann Arbor", Michigan, The University of Michigan Press, 1975
- (Hopfield 1982) J.P. Hopfield: "Neural Networks and physical systems with emergent collective computational abilities", in: Proceedings of the National Academy of Sciences 79, 1982
- (Hough 1962) P.V.C. Hough: "Methods and Means for Recognizing Complex Patterns", in: U.S. Patent 3069654, 1962
- (IfaDo 2001) Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund: "Visuelle Qualitätsprüfung und mentale Beanspruchung", in: <http://next.arb-phys.uni-dortmund.de/projekt-04/projekt4.html>, Dortmund, World Wide Web, 2001
- (Inform 2001) Inform GmbH: "fuzzyTECH 5.5 Benutzerhandbuch", in: <http://www.fuzzyTECH.com>, 2001
- (Institut für grafische Technik Leipzig 1977) Institut für grafische Technik Leipzig: "Lexikon der grafischen Technik", 4. Aufl., Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1977
- (Jackson 1987) P. Jackson: "Experten Systeme", Bonn, Addison-Wesley, 1987
- (Joereßen 1998) Anton Joereßen, Prof. Dr. Hans-Jürgen Sebastian: "Problemlösung mit Modellen und Algorithmen", 1. Aufl., Stuttgart, Leipzig, Teubner, 1998
- (Kahlert 1993) J. Kahlert, H. Frank: "Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control", Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg Verlag, 1993
- (Kanizsa 1979) G. Kanizsa: "Organization in Vision", Praeger Publishers, 1979
- (Keller 2000) Hubert B. Keller: "Maschinelle Intelligenz", Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg Verlag, 2000
- (Kinzel 2001) Heiko Kinzel: "Stereobild-Auswertung durch neuronale Netze zum überwachten Einlegen von deformierbaren linearen Objekten", in: Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe, 2001
- (Kippahn 2000) Helmut Kippahn: "Handbuch der Printmedien", Berlin, Springer Verlag, 2000
- (Klien 1962) H. Klien (Gesamtleitung): "Fremdwörterbuch", 9. Aufl., Leipzig, VEB Leipziger Druckhaus, 1962

- (Koenig & Bauer AG 2004) Koenig & Bauer AG: "Inline-Bogeninspektionssystem Qualitronic II", in: Veröffentlichung der Firma Koenig & Bauer AG - www.kba-print.de, Würzburg, Radebeul, 2004
- (Kohonen 1977) T. Kohonen: "Associative memory: a System theoretic approach", Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1977
- (Koller 1999) Andreas Koller: "Hybride Wissensverarbeitung in der präventivmedizinischen Diagnostik", in: Dissertationsschrift an der Universität-GH Paderborn, 1999
- (Köster 2002) Andreas Köster: "Modellbildung und Simulation unter Verwendung wissensbasierter Konzepte", in: ITIS-Studie zum Thema "Zukunftsfelder der Modellbildung und Simulation" an der Universität der Bundeswehr München, 2002
- (Kotani 1995) K. Kotani, Q. Gan, M. Mirahara, V.R. Algazi: "Objective Picture Quality Scale for Color Image Coding", JAIST, CIPIC, Davis USA, Ishikawa Japan, 1995
- (Kratzer 1990) K.P. Kratzer: "Neuronale Netze - Grundlagen und Anwendungen", München, Wien, Carl Hanser Verlag, 1990
- (Kruse 1993) Rudolf Kruse, Jörg Gebhardt, Frank Klawonn: "Fuzzy-Systeme", Stuttgart, Teubner, 1993
- (Kurbel 1989) K. Kurbel: "Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen", Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1989
- (Lohweg 2003) Volker Lohweg: "Ein Beitrag zur effektiven Implementierung adaptiver Spektraltransformationen in applikationsspezifische integrierte Schaltkreise", in: Dissertationsschrift an der Technischen Universität Chemnitz, 2003
- (MacAulay 1955) D. MacAulay: in: TAGA Proc., Nr. 7 1955, S. 96-100
- (Madey 1994) G.R. Madey, J. Weinroth, V. Shah: "Hybrid Intelligent Systems - Artificial Neural Networks for Intelligent Manufacturing", London, Chapman & Hall, 1994
- (Mayer 1995) M. Mayer: "Untersuchung von Bildqualitätsveränderungen in der digitalen Bildverarbeitung", in: Diplomarbeit, Institut für Informatik der TU München, 1995
- (Mazzetti 1992) Alessandro Mazzetti: "Praktische Einführung in Neuronale Netze", Hannover, Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG, 1992
- (McCarthy 1968) John McCarthy: "Situations, Actions and Causal Laws", in: Marvin Minsky (Hrsg.): "Semantic Information Processing", Cambridge, MIT Press 1968
- (Meier 2002) Manuel Meier, Christian Rüegg: "Digitale Ecken- und Objekterkennung", in: Studienarbeit an der Hochschule Rapperswil HSR, 2002
- (Messing 1952) H. Messing: "Die Gütesicherung", Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1952

- (Metzger 1975) W. Metzger: "Gesetze des Sehens", in: Senkenberg-Buch 53, Frankfurt am Main, Verlag Waldemar Kramer, 1975
- (Meyer 2000) Karl-Heinz Meyer: "Verpackungsdruck: Markt mit hohen Qualitätsforderungen", in: Deutscher Drucker, Nr. 4 Januar, 2000
- (Michel 1998) R. Michel: "Modellierung des Verhaltens von Papier und Gummituch im Druckspalt von Offsetdruckmaschinen", in: Dissertation an der TU Chemnitz, 1998
- (Minsky 1969) M.L. Minsky, S.A. Papert: "Perceptrons", MIT Press, 1969
- (Miyahara 1998) M. Miyahara, K. Kotani, V.R. Algazi: "Objective Picture Quality Scale (PQS) For Image Coding", in: Technical report Center for Image Processing and Integrated Computing CIPIC, CIPIC report 98-01, Davis USA, 1998
- (Moros 1999) Ralf Moros: "Genetische Algorithmen - Grundlagen", in: techni.chemie.uni-leipzig.de/jsaga/gakurz.html, World Wide Web, 1999
- (Nauck 1996) Nauck, Klawonn, Kruse: "Neuronale Netze aus besonderer Perspektive", 2. Auflage, Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg Verlag, 1996
- (Nawrath 2001) Reiner Nawrath: "Industrielle Bildverarbeitung in Schleswig-Holstein", in: Studien der Technologiestiftung Schleswig-Holstein, 20. Band, Heide, Fachhochschule Westküste, 2001
- (Passino 1998) Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich: "Fuzzy Control", Massachusetts, Addison-Wesley, 1998
- (Patent 1997) "US Patent 5, 629, 780 Prion May 13", Watson, 1997
- (Philosophisches Wörterbuch 1971) keine Autoren: "Philosophisches Wörterbuch", 2. Band, VEB Bibliographisches Wörterbuch, 1971
- (PITSID 2005) PITSID GmbH: "Produktpräsentation Produktkontrollsystem PKS", in: www.PITSIDLeipzig.com, Leipzig, 2005
- (Pohlheim 1997) Hartmut Pohlheim: "Entwicklung und systemtechnische Anwendung Evolutionärer Algorithmen", in: Dissertation von Hartmut Pohlheim, pohlheim.com/diss/Dissertation_H_Pohlheim_german.html, World Wide Web, 1997
- (Popovic 1994) D. Popovic, V. Bhatkar: "Methods and Rools for Applied Artificial Intelligence", New York, 1994
- (Poulter 1968) S.R.U. Poulter: "Measurement of Print Unevenness", in: Tappi, 51. Jahrgang, Nr. 8 1968, S. 87 A
- (Procyk 1979) T.J. Procyk, E.H. Mamdani: "A Linguistic Self-Organizing Process Controller", in: Automatica, Nr. 15 1979, S. 15-30
- (Rechenberg 1973) I. Rechenberg: "Evolutionstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution", Stuttgart, Frommann-Holzboog Verlag, 1973

- (Rogers 1958) M.C. Rogers: "Estimation of Multicolor Printing Quality", in: International Bulletin, Nr. 80 1958, , S. 83-88
- (Rumelhart 1988) D.E. Rumelhart, J.L. McClelland: "Parallel Distributed Processing", ohne Ort, MIT Press, 1988
- (Scharf 1985) E.M. Scharf, N.J. Mandve: "The Application of a Fuzzy Controller to the Control of a Multi-Degree-Freedom Arm", in: M. Sugeno, Industrial Applications of Fuzzy Control, Amsterdam, 1985, S. 41-62
- (Schmid 1995) Reiner Schmid: "Industrielle Bildverarbeitung", 1. Aufl., Braunschweig, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1995
- (Schmidt 1995) R.F. Schmidt, G. Thews: "Physiologie des Menschen", 26. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1995
- (Schulte 1993) H. Schulte: "Einführung in Fuzzy Logik", München, Franzis Verlag GmbH, 1993
- (Schwefel 1991) H.-P. Schwefel, R. Männer: "Parallel Problem Solving from Nature - PPSN1", in: volume 496 of Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1991
- (Schwefel 1995) H.-P. Schwefel: "Evolution and Optimum Seeking", New York, John Wiley & Sohn, 1995
- (Sohnrey 2004) Jens Sohnrey: "Druckverfahren", in: Die Druckseiten, http://www.sohnrey.de/druckseiten/index_f.htm, World Wide Web, 2004
- (Spiegel 1999) Klaus Spiegel in: "Die Faltschachtelindustrie befindet sich im Umbruch", in: Deutscher Drucker, Nr. 41 November, 1999
- (Steinbrecher 1993) Rainer Steinbrecher: "Bildverarbeitung in der Praxis", 1. Aufl., München, Wien, Oldenbourg, 1993
- (Straßer 2003) Christian Straßer: "Kantendetektion in der Bildverarbeitung", in: Elaboration zum Seminar Bildverarbeitung der Universität Passau, 2003
- (Stumpner 1990) M. Stumpner, G. Friedrich: "Einführung", in: Expertensysteme, Springers Angewandte Informatik, Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1990
- (Teschner 1997) Helmut Teschner: "Offsetdrucktechnik - Technologien und Werkstoffe in der Druckindustrie", 10. Aufl., Fellbach, Fachschriften-Verlag GmbH & Co. KG, 1997
- (Teschner 2003) Helmut Teschner: "Druck & Medien Technik", 11. Aufl., Fellbach, Fachschriften-Verlag GmbH & Co. KG, 2003
- (Tilli 1993a) T. Tilli: "Mustererkennung mit Fuzzy-Logik - Analysieren, klassifizieren, erkennen und diagnostizieren", München, Franzis Verlag GmbH, 1993

- (Tilli 1993b) T. Tilli: "Fuzzy-Logik", 3. Aufl., München, Franzis Verlag GmbH, 1993
- (VDI01) VDI/VDE: "VDI/VDE 2632, Industrielle Bildverarbeitung, Definition von Anforderungen an Bildverarbeitungssysteme", in: VDI/VDE-Richtlinien, Berlin, Beuth Verlag, 2001
- (Vision&Control 2001) Vision&Control GmbH (V & C): "Internetpräsentation", in: www.vision-control.com, 2001
- (Visions Experts 2004) Vision Experts GmbH: "Carton Inspection", in: Veröffentlichung der Firma Vision Experts GmbH - www.vision-experts.de, Karlsruhe, 2004
- (Walenski 1991) Wolfgang Walenski: "Der Offsetdruck - Eine Einführung in die Theorie und Praxis", Köln, DuMont, 1991
- (Wikipedia 2005) Spezialisten entsprechender Fachgebiete: "Wikipedia, die freie Enzyklopädie", in: <http://de.wikipedia.org>, 2005
- (Wilde 1996) M. Wilde: "Entwicklung eines dem menschlichen Sehempfinden angepassten Qualitätsmaßstabes zur Beurteilung decodierter Bilder sowie dessen Implementierung in Khoros", in: Diplomarbeit, Darmstadt, TH Darmstadt, 1996
- (Yager 1992) R.R. Yager, L.A. Zadeh: "An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems", Boston, Kluwer Academic Publishers, 1992
- (Zadeh 1965) L. A. Zadeh: "Fuzzy Sets", in: Information and Control, 8. Band, New York, Academic Press, 1965, S. 338-353
- (Zakharian 1998) S. Zakharian, P. Ladewig-Riebler, S. Thoer: "Neuronale Netze für Ingenieure", Braunschweig, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1998
- (Zhang 1998) X. Zhang, D.A. Silverstein, J.E. Farrel, B.A. Wandell: "Color Image Quality Metric S-CIELAB and 1st Application on Halftone Texture Visibility", in: References to S-CIELAB, Compton 97 Symposium Digest, 1998, IEEE,
- (Zimmermann 1993) H.-J. Zimmermann (Hrsg.), J. Angstenberger, K. Lieven, R. Weber: "Fuzzy Technologien - Prinzipien, Werkzeuge, Potenziale", Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Weitere Personen waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Die Promotionsordnung wird von mir anerkannt.

Ich versichere, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Radebeul, Juli 2005

Steven Flemming

Anhang

A Begriffserklärungen und Definitionen

Abliegen

Als Abliegen (Abziehen, Abschmieren) wird das Abfärben frischer Drucke auf der Rückseite des darauffliegenden Bogens bezeichnet (Institut für grafische Technik Leipzig 1977).

Doppelbogen

Als Doppelbogen werden Bogen bezeichnet, die auf Grund fehlerhafter Vereinzelnung fälschlicherweise gleichzeitig der Maschine zugeführt werden. Die saubere Trennung der Bogen wird im Anlagebereich mit einer Doppelbogenkontrolle überwacht (Kippahn 2000).

Dublieren

In der Drucktechnik bezeichnet Dublieren eine Fehlerscheinung im Druckprodukt, die sich als doppelte oder mehrfache (schattenartige) Kontur der Druckbildelemente zeigt. Ursache dafür können mechanische Schwingungen und Passerschwankungen während des Druckprozesses sein (Kippahn 2000).

Kombinierte Linienfelder

Kombinierte Linienfelder sind Mess- und Kontrollelemente, die aus einer Vielzahl an Linien unterschiedlicher Ausrichtung, Dicke und Abstand bestehen. In der Druckplattenherstellung werden diese Felder zur visuellen Kontrolle der Plattenkopie verwendet. Im Druckprozess dienen sie der Visualisierung von Schieben und Dublieren (Helbig 1993).

Optische Dichte

Die optische Dichte bezeichnet das Reflexionsvermögen von Oberflächen. Sie wird aus dem negativen dekadischen Logarithmus des Remissionsgrades β beziehungsweise aus dem dekadischen Logarithmus des Kehrwertes des Remissionsgrades bestimmt.

$$D = -\lg \beta = \lg \frac{1}{\beta}$$

Für eine definierte Druckfarben/Bedruckstoff-Kombination ist die optische Dichte im Wesentlichen von der Farbschichtdicke und von den Druckbedingungen abhängig (Helbig 1993).

Passer

Als Passer wird die Lagegenauigkeit der Teilfarbendrucke auf dem Druckprodukt zueinander bezeichnet. Es wird unterschieden zwischen Passer in Maschinenlaufrichtung (Umfangspasser) und quer zur Maschinenlaufrichtung (Seitenpasser) (Kippahn 2000).

Proof

Der Proof ist ein Prüfdruck zur Qualitätskontrolle in Druckvorstufe und Druck bezüglich Farbwiedergabe, Text- und Bildanordnung. Des Weiteren kann ein Proof als Vorlage für den Auflagendruck dienen (Kippahn 2000).

Rastertonfeld

Rastertonfelder sind Mess- und Kontrollelemente zum Beispiel mit einem Flächendeckungsgrad (Film) von 40 % und 80 %. Sie dienen vorzugsweise zur densitometrischen Ermittlung des optisch wirksamen Rastertonwertes und damit der Kontrolle der Tonwertzunahme im Druck (Helbig 1993).

Rastertonwert

Der Rastertonwert (oder Tonwert) gibt bei gerasterten Flächen das prozentuale Flächenverhältnis von Rasterpunkten zur Gesamtfläche an. Er ist ein Maß für den optischen Eindruck einer gerasterten Fläche. Die unbedruckte Fläche hat den Tonwert 0 %, die Volltonfläche den Tonwert 100 % (Kippahn 2000).

Rupfen

Rupfen ist eine Fehlerscheinung im Druckprozess, bei der Papierfasern, Teile des Füllstoffs oder des Strichs aus der Bedruckstoffoberfläche abgehoben oder herausgerissen werden (Institut für grafische Technik Leipzig 1977).

Schieben

Schieben bezeichnet in der Drucktechnik eine Fehlerscheinung, die sich durch Veränderung der Geometrie der Druckbildelemente (Rasterpunkte) zeigt. Schieben in Druckrichtung wird als Umfangsschieben und Schieben quer dazu als Seitenschieben bezeichnet. Die Entstehung dieser Fehlerscheinung hängt im Offsetdruck mit den Abwicklungsverhältnissen innerhalb der Zylindergruppe Platten-, Gummi- und Druckzylinder sowie mit Materialeinflüssen zusammen (Kippahn 2000).

Schimmelbogen

Ein Schimmelbogen ist ein Druckbogen, der auf beiden Seiten bedruckt werden sollte, jedoch durch Störungen beim Fortdruck auf einer Seite keinen Druck erhielt (Institut für grafische Technik Leipzig 1977).

Tonen

Das Einfärben/Bedrucken von außerhalb des Druckbildes liegenden und nicht dem Druckbild entsprechenden Stellen wird als Tönen bezeichnet (Kippahn 2000).

Tonwertzuwachs

Der Tonwertzuwachs (oder Tonwertzunahme) bezeichnet die prozessbedingte Differenz zwischen dem Tonwert des Drucks und dem dazugehörigen Tonwert des Films, der der Druckform zu Grunde liegt. Im Computer-to-Plate-Verfahren oder beim Druck ohne Druckform bezieht sich der Tonwertzuwachs auf die Tonwerte der zu Grunde liegenden Daten für den Farbauszug (Kippahn 2000).

Volltonfeld

Volltonfelder sind Mess- und Kontrollelemente mit dem Tonwert 100 %. Sie werden zur Bestimmung der Volltondichte genutzt. In den einzelnen Farben können Volltonfelder unter anderem der visuellen und der densitometrischen Kontrolle der Übereinstimmung mit Vorgabewerten, der Gleichmäßigkeit der Färbung über die Formatbreite und der Gleichmäßigkeit der Farbhaltung während des Auflagedrucks dienen (Helbig 1993).

B Projektbeschreibung – „unscharfe“ Beobachtungspunkte

Dieses Projekt beschreibt die Systemstruktur, Variablen- und Termdefinitionen sowie die Regelbasis zur Berechnung von der Zugehörigkeit einzelner Beobachtungspunkte zur korrekten Bogenlage.

Verwendete Abkürzungen:

Berechne MBF	Berechne Membership Function (Fuzzifizierungsmethode)
CoM	Center of Maximum (Defuzzifizierungsmethode)
BSUM	Bounded Sum - Operator zur Berechnung der Ergebnisaggregation
MIN	Minimum-Operator (UND-Aggregation)
MAX	Maximum-Operator (ODER-Aggregation)
GAMMA	Kompensatorischer Operator für die Aggregation
PROD	Fuzzy Operator für die Komposition
LV	Linguistische Variable
MBF	Zugehörigkeitsfunktion (Membership Function)
RB	Regelblock

Projektbeschreibung:

Eingangsvariablen	3
Ausgangsvariablen	1
Regelblöcke	1
Regeln	24
Zugehörigkeitsfunktionen	9

Tabelle 10: Projektstatistik

Systemstruktur:

Die Systemstruktur beschreibt den Datenfluss in dem Fuzzy-System. Eingangsinterfaces fuzzifizieren die Eingangsgrößen. Hierbei werden Analogwerte in Zugehörigkeitsgrade umgesetzt. Dem Fuzzifizieren schließt sich die Fuzzy-Inferenz an: Mit in Regelblöcken festgelegten "wenn-dann" Regeln werden durch die Eingangsgrößen sprachlich beschriebene Ausgangsgrößen festgelegt. Diese werden in den Ausgangsinterfaces durch eine Defuzzifizierung in analoge Größen umgewandelt. Die folgende Abbildung 33 zeigt die Struktur für dieses Fuzzy-System mit Eingangsinterfaces, Regelblöcken und Ausgangsinterfaces. Die Verbindungslinien symbolisieren hierbei den Datenfluss.

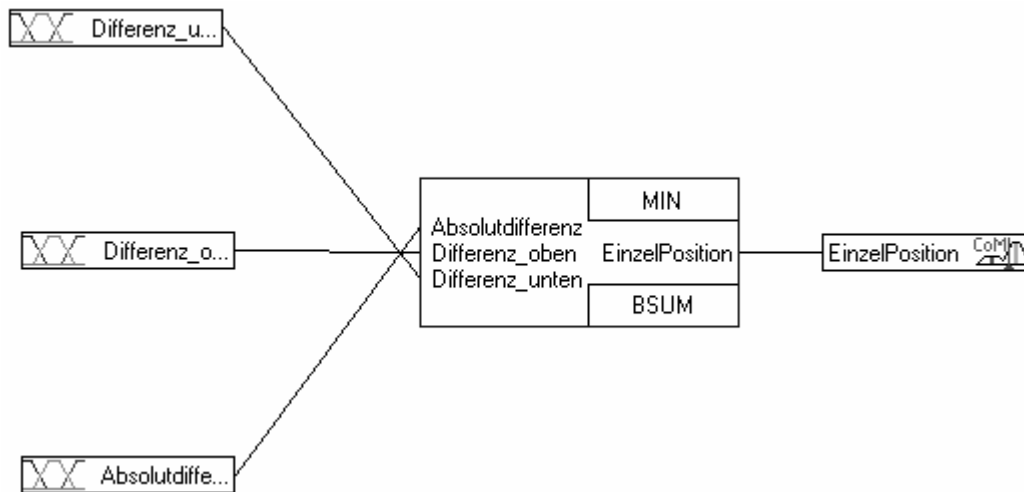


Abbildung 33: Struktur des Fuzzy Logic-Systems

Definition der Variablen:

Dieser Absatz enthält die Definition aller linguistischen Variablen und aller Zugehörigkeitsfunktionen des Fuzzy-Systems. Linguistische Variablen dienen in einem Fuzzy-System dazu, die Werte kontinuierlicher Größen durch sprachliche Begriffe zu beschreiben. Die möglichen Werte einer linguistischen Variablen sind keine Zahlen, sondern sprachliche Begriffe, auch Terme genannt. Für alle Eingangs-, Ausgangs- und Zwischengrößen des Fuzzy-Systems werden linguistische Variablen definiert. Die Zugehörigkeitsfunktionen der Terme sind durch Stützstellen, die sogenannten Definitionspunkte, eindeutig festgelegt. Die folgenden Tabellen listen alle Variablen zusammen mit ihrer Fuzzifizierungs- bzw. Defuzzifizierungsmethode, den Eigenschaften der Basisvariable und den Termnamen auf.

Eingänge:

	Variablenname	Typ	Min	Max	Default	Termnamen
1	'Absolutdifferenz'	XX	-30	30	0	klein nah groß
2	'Differenz_oben'	XX	-10	30	15	nah weit
3	'Differenz_unten'	XX	-10	30	15	nah weit

Tabelle 11: Variablen der Gruppe "Eingänge" (Fuzzifizierungsmethode XX Berechne MBF)

Ausgänge:


	Variablenname	Typ	Min	Max	Default	Termnamen
4	'EinzelPosition'		0	1	0.5	falsch wahr

Tabelle 12: Variablen der Gruppe "Ausgänge" (Defuzzifizierungsmethode  Center of Maximum (CoM))

Der Defaultwert wird von der Ausgangsvariable angenommen, wenn für diese Variable keine Regel „feuert“ (Einfluss nimmt). Für die Defuzzifizierung können unterschiedliche Methoden eingesetzt werden, die entweder das 'plausibelste Resultat' oder den 'besten' Kompromiss liefern.

Zu den kompromissbildenden Verfahren gehören:

- CoM (Center of Maximum)
- CoA (Center of Area)

Das 'plausibelste Resultat' liefert:

- MoM (Mean of Maximum)

Eingangsvariable 'Absolutdifferenz':

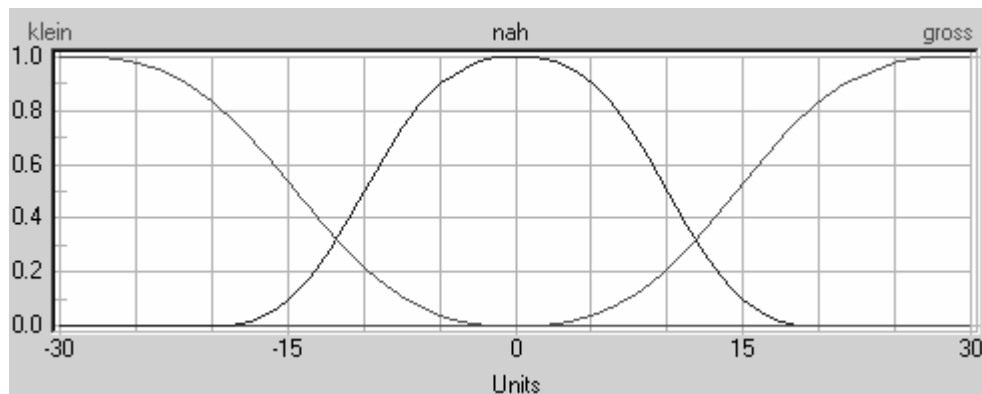


Abbildung 34: Zugehörigkeitsfunktion der Variable 'Absolutdifferenz'

Terminame	Form/Par.	Definitionspunkte (x, y)		
klein	S-Form/0.50	(-30, 1)	(-29, 1)	(0, 0)
		(30, 0)		
nah	S-Form/0.50	(-30, 0)	(-20, 0)	(0, 1)
		(20, 0)	(30, 0)	
groß	S-Form/0.50	(-30, 0)	(0, 0)	(29, 1)
		(30, 1)		

Tabelle 13: Definitionspunkte der Zugehörigkeitsfunktion 'Absolutdifferenz'

Eingangsvariable 'Differenz_oben':

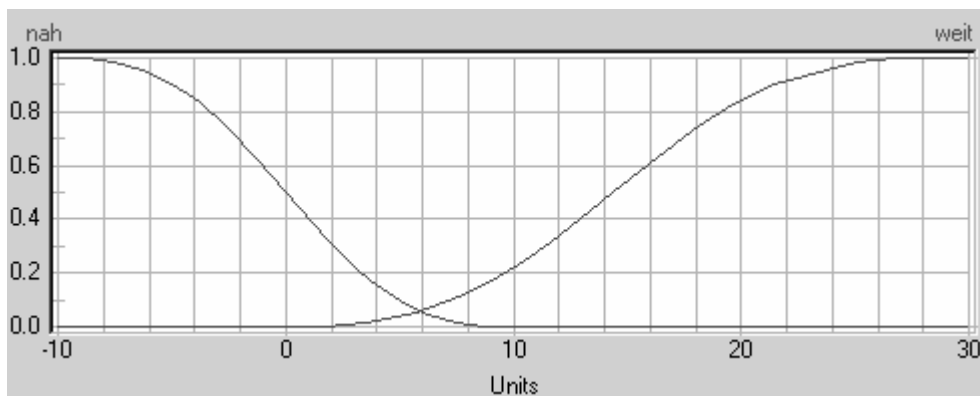


Abbildung 35: Zugehörigkeitsfunktion der Variable 'Differenz_oben'

Terminame	Form/Par.	Definitionspunkte (x, y)		
nah	S-Form/0.50	(-10, 1)	(10, 0)	(16.667, 0)
		(30, 0)		
weit	S-Form/0.50	(-10, 0)	(0, 0)	(28.667, 1)
		(30, 1)		

Tabelle 14: Definitionspunkte der Zugehörigkeitsfunktion 'Differenz_oben'

Eingangsvariable 'Differenz_unten':

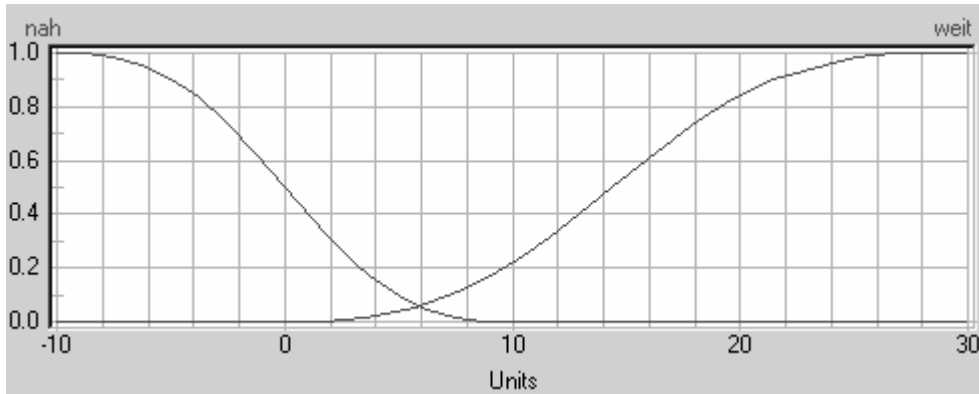


Abbildung 36: Zugehörigkeitsfunktion der Variable 'Differenz_unten'

Terminame	Form/Par.	Definitionspunkte (x, y)		
nah	S-Form/0.50	(-10, 1)	(10, 0)	(16.667, 0)
		(30, 0)		
weit	S-Form/0.50	(-10, 0)	(0, 0)	(28.667, 1)
		(30, 1)		

Tabelle 15: Definitionspunkte der Zugehörigkeitsfunktion 'Differenz_unten'

Ausgangsvariable 'EinzelPosition':

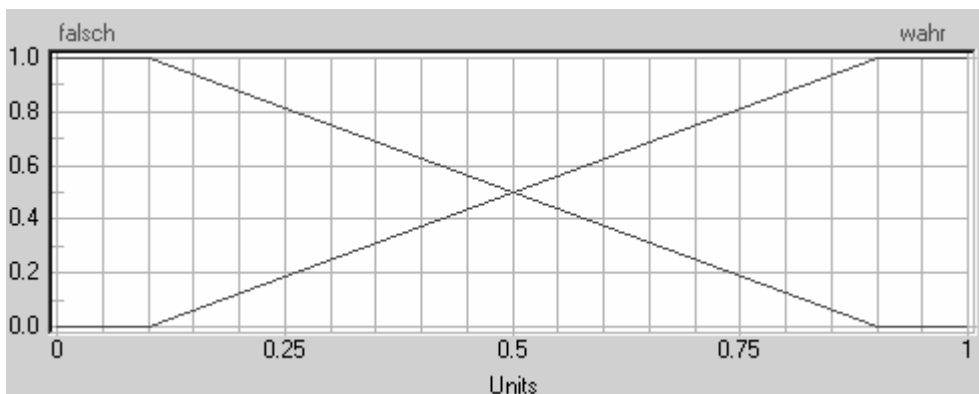


Abbildung 37: Zugehörigkeitsfunktion der Variable 'EinzelPosition'

Terminname	Form/Par.	Definitionspunkte (x, y)		
falsch	L-Form	(0, 1)	(0.1, 1)	(0.9, 0)
		(1, 0)		
wahr	L-Form	(0, 0)	(0.1, 0)	(0.9, 1)
		(1, 1)		

Tabelle 16: Definitionspunkte der Zugehörigkeitsfunktion 'EinzelPosition'

Regelblock:

Das Verhalten des Reglers in den verschiedenen Prozesssituationen wird durch die Regelblöcke festgelegt. Jeder einzelne Regelblock enthält Regeln für einen festen Satz von Eingangs- und Ausgangsvariablen.

Der "wenn"-Teil der Regeln beschreibt dabei die Situation, in der die Regel gelten soll, der "dann"-Teil die Reaktion hierauf. Durch den "Degree of Support" (DoS) kann hierbei den einzelnen Regeln ein unterschiedliches Gewicht gegeben werden.

Zur Auswertung der Regeln wird zuerst der "wenn"-Teil berechnet. Hierbei können verschiedene Verfahren eingesetzt werden, die durch den Operatortyp des Regelblocks festgelegt sind. Der Operator kann vom Typ MIN-MAX, MIN-AVG oder GAMMA sein. Das Verhalten des Operators wird zusätzlich durch eine Parametrierung beeinflusst.

Beispielsweise:

- MIN-MAX, mit dem Parameterwert 0 = Minimum-Operator (MIN).
- MIN-MAX, mit dem Parameterwert 1 = Maximum-Operator (MAX).
- GAMMA, mit dem Parameterwert 0 = Produkt-Operator (PROD).

Der Minimum-Operator ist die Verallgemeinerung des booleschen 'und' und der Maximum-Operator ist die Verallgemeinerung des booleschen 'oder'.

Die Ergebnisse der einzelnen Regeln werden bei der anschließenden Fuzzy-Composition zu Gesamtschlussfolgerungen zusammengefasst. Die BSUM-Methode betrachtet hierbei alle für einen Zustand feuernden Regeln, während die MAX-Methode nur dominante Regeln berücksichtigt.

Regelblock "RB1":

Operator:	MINMAX
Ergebnisoperator:	BSUM
Anzahl der Eingänge:	3
Anzahl der Ausgänge:	1
Anzahl der Regeln:	24

WENN			DANN	
'Absolutdifferenz'	'Differenz_oben'	'Differenz_unten'	DoS	'EinzelPosition'
klein	nah	nah	1.00	falsch
klein	weit	nah	1.00	falsch
klein	nah	weit	1.00	falsch
klein	weit	weit	0.50	falsch
klein	weit	nah	0.00	wahr
klein	nah	weit	0.00	wahr
klein	weit	weit	0.50	wahr
klein	nah	nah	0.00	wahr
nah	weit	weit	1.00	wahr
nah	nah	nah	1.00	falsch
nah	weit	nah	1.00	falsch
nah	nah	weit	1.00	falsch
nah	weit	nah	0.00	wahr
nah	nah	weit	0.00	wahr
nah	nah	nah	0.00	wahr
nah	weit	weit	0.00	falsch
groß	nah	nah	1.00	falsch
groß	weit	nah	1.00	falsch
groß	nah	weit	1.00	falsch
groß	weit	weit	0.50	falsch
groß	weit	weit	0.50	wahr
groß	weit	nah	0.00	wahr
groß	nah	weit	0.00	wahr
groß	nah	nah	0.00	wahr

Tabelle 17: Regeln des Regelblocks "RB1"

C Lernmethode zum Bilden von Beobachtungspunkten

Die Gesamtfunktion zur Bildung der Beobachtungspunkte besteht aus folgenden nacheinander ablaufenden Funktionen:

	Funktion	Ergebnisbild
Eingangsgröße: Kamerabild		Abbildung 38
1. Bild glätten	GlaettenInZielPicture	Abbildung 39
2. lokaler Hochpassfilter	HochPassInZielPicture	Abbildung 40
3. Binärer Schwellwertfilter	BinaerInZielPicture	Abbildung 41
4. Lokaler Sobelfilter	SobelInZielPicture	Abbildung 42
5. Binärer Schwellwertfilter	BinaerInZielPicture	Abbildung 41
6. Flankendetektion	FlankenInZielPicture1	Abbildung 43
7. Eingrenzen	EingrenzenInZielPicture	Abbildung 44
8. Flankendetektion	FlankenInZielPicture2	
9. Positionsmerkmale speichern	Positionsmerkmale_Lernen	Abbildung 45
10. Positionsmerkmale prüfen	Punkt_Prüfen	

Tabelle 18: Einzelfunktionen zum Finden von Beobachtungspunkten

Anschließende Funktionen können das Kontrollergebnis durch Bewertungen der Merkmale verbessern, durch Reduzierung der Anzahl der Merkmale die Rechenzeit optimieren und eine Schnittstelle zum Fuzzy-System beinhalten. Im Weiteren sind die Einzelfunktionen zum Finden von Beobachtungspunkten als Quelltext der objektorientierten Programmiersprache Delphi und jeweilige Ergebnisbilder dargestellt.



Abbildung 38: Ausgangsbild

```

Procedure OBJECT.GlaettenInZielPicture (var Picture:Array [0..400000]);
var
  RingBuffer:Array[1..3]of integer;
  r,c,i:integer;
begin
  RingBuffer[1]:= (Picture[((0)*XX)+0])+(Picture[((1)*XX)+0])+(Picture[((2)*XX)+0]);
  RingBuffer[2]:= (Picture[((0)*XX)+1])+(Picture[((1)*XX)+1])+(Picture[((2)*XX)+1]);
  RingBuffer[3]:= (Picture[((0)*XX)+2])+(Picture[((1)*XX)+2])+(Picture[((2)*XX)+2]);
  i:=1;
  for r:=1 to YY-1 do
    for c:=1 to XX-2 do begin
      ZielPicture[(r*XX)+c] := (RingBuffer[1]+RingBuffer[2]+RingBuffer[3]) div 9;
      RingBuffer[i] := (Picture[((r-1)*XX)+c+2]) +
        (Picture[((r)*XX)+c+2]) + (Picture[((r+1)*XX)+c+2]);
      inc(i);
      if i>3 then i:=1;
    end;
  end;
end;

```



Abbildung 39: Ergebnisbild nach Glättfunktion

```

Procedure OBJECT.HochPassInZielPicture (var Picture:Array [0..400000];Faktor:real);
var
  RingBuffer:Array[1..3]of integer;
  r,c,i:integer;
  realwert:real;
begin
  if Faktor<=0 then Faktor:=0.1; if Faktor>1 then Faktor:=0.9;
  RingBuffer[1]:= (Picture[((0)*XX)+0]) + (Picture[((1)*XX)+0]) +
    (Picture[((2)*XX)+0]);
  RingBuffer[2]:= (Picture[((0)*XX)+1]) + (Picture[((1)*XX)+1]) +

```

```

        (Picture[((2)*XX)+1]);
RingBuffer[3]:= (Picture[((0)*XX)+2]) + (Picture[((1)*XX)+2]) +
        (Picture[((2)*XX)+2]);
i:=1;
for r:=1 to YY-1 do
  for c:=1 to XX-2 do begin
    realwert:=abs( Picture[(r*XX)+c]-(Faktor*
      ( (RingBuffer[1]+RingBuffer[2]+RingBuffer[3])div 9 )
      ) )/(1-Faktor);
    if realwert>255 then ZielPicture[(r*XX)+c]:=255 else
      ZielPicture[(r*XX)+c]:=Byte(round(RealWert));
    RingBuffer[i]:= (Picture[((r-1)*XX)+c+2]) + (Picture[((r)*XX)+c+2]) +
      (Picture[((r+1)*XX)+c+2]);
    inc(i);
    if i>3 then i:=1;
  end;
end;
end;

```



Abbildung 40: Ergebnisbild nach Hochpassfilterung

```

Procedure OBJECT.BinaerInZielPicture(var Picture:Array [0..400000]);
var
  r,c:integer;
  summe,anz:int64;
  wert:byte;
begin
  summe:=0;anz:=0;
  for r:=0 to yy do
    for c:=0 to xx do begin
      inc(anz);summe:=summe+Picture[((r)*XX)+c];
    end;
  if anz>0 then wert:=summe div anz else wert:=125;
  for r:=0 to yy do
    for c:=0 to xx do
      if Picture[(r*XX)+c]<wert then ZielPicture[(r*XX)+c]:=0 else
        ZielPicture[(r*XX)+c]:=255;
  end;
end;

```



Abbildung 41: Ergebnisbild nach Binarisierung

```

Procedure OBJECT.SobelInZielPicture (var Picture:Array [0..400000]);
var
  Sobel3:Array[1..3,1..3]of integer;
  c,r:integer;
  wert:longint;
begin
  Sobel3[1,2]:=-1;
  Sobel3[2,1]:=-1; Sobel3[2,2]:=4; Sobel3[2,3]:=-1;
  Sobel3[3,2]:=-1;
  for r:=1 to YY-1 do
    for c:=1 to XX-1 do begin
      wert:=abs (
        ((Picture[((r-1)*XX)+c]*Sobel3[1,2])+
         (Picture[((r )*XX)+c+1]*Sobel3[2,1]))+
         (Picture[((r )*XX)+c]*Sobel3[2,2])+
         (Picture[((r )*XX)+c-1]*Sobel3[2,3])+
         (Picture[((r+1)*XX)+c]*Sobel3[3,2])
        ));
      if wert>255 then ZielPicture[(r*XX)+c]:=0 else
        ZielPicture[(r*XX)+c]:=255-Byte(Wert);
    end;
  end;
end;

```



Abbildung 42: Ergebnisbild nach Sobel-Operator

```

Procedure OBJECT.FlankenInZielPicture1 (var Picture:Array [0..400000]);
var
  c,r,rr,cc:integer;
begin
  r:=1;
  repeat
    c:=1;
    rr:=r*xx;

```



```

repeat
  cc:=rr+c;
  if Picture[cc-1] >Picture[cc]then ZielPicture[cc]:=1 else
    ZielPicture[cc]:=255;
  if Picture[cc-xx]>Picture[cc]then if ZielPicture[cc]=1 then
    ZielPicture[cc]:=3 else
    ZielPicture[cc]:=2;
  inc(c);
until c=xx-1;
inc(r);
until r=yy;
end;

```

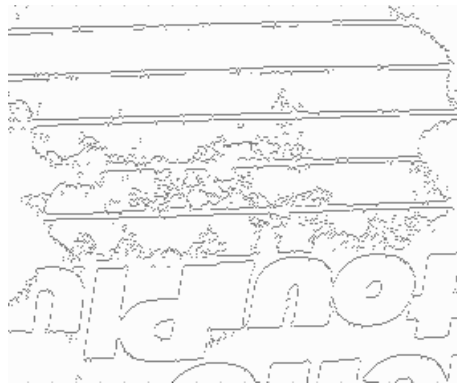


Abbildung 43: Ergebnisbild nach Flankensuche

```

rocedure OBJECT.EingrenzenInZielPicture(var Picture:Array [0..400000]);
var
  c,r:longint;
  cc,rr:longint;
  cs,rs,ce,re:longint;

begin
  rxx:longint;
  ce:=Quertoleranz+1;    cs:=-1*ce;
  re:=Längstoleranz+1;  rs:=-1*re;
  c:=ce+1;
  repeat
    r:=re+1;
    repeat
      rxx:=r*xx;
      if (Picture[(rxx)+c]<>255)then
        if Picture[(rxx)+c-1]<>255 then begin
          rr:=((rs+r)*xx)+c;
          repeat ZielPicture[rr]:=1; rr:=rr+xx; until rr=((re+r)*xx)+c;
        end else
          if Picture[((r-1)*xx)+c]<>255 then begin
            cc:=(r*xx)+c+cs;
            repeat ZielPicture[cc]:=1; inc(cc); until cc=(r*xx)+c+ce;
          end else //also ein neuer punkt
            begin
              rr:=(rs+r)*xx;
              repeat
                for cc:=cs+c to ce+c do ZielPicture[rr+cc]:=1;
                rr:=rr+xx;
              until rr=(re+r)*xx;
            end;
            inc(r);
            until r=yy+rs;
            inc(c);
            until c=xx+cs;
          end;

```



Abbildung 44: Ergebnisbild nach Eingrenzen

```

Procedure OBJECT.FlankenInZielPicture2(var Picture:Array [0..400000]);
var
  c,r,rr,cc:integer;
begin
  r:=1;
  repeat
    rr:=r*xx;
    c:=1;
    repeat
      cc:=rr+c;
      if abs((Picture[cc-1])-(Picture[cc]))>125 then ZielPicture[cc]:=1 else
        ZielPicture[cc]:=255;
      if abs((Picture[((r-1)*xx)+c])-(Picture[cc]))>125 then
        if ZielPicture[cc]=1 then
          ZielPicture[cc]:=3 else ZielPicture[cc]:=2;
        inc(c);
      until c=xx;
      inc(r);
    until r=yy;
  end;

Procedure Positionsmerkmale_Lernen(Var Picture:Array [0..400000];
Var Pfad:Array [0..400000];Var Maske:Array [0..400000];var xx,yy:integer);
var
  c,r,i,adr:longint;
  rs,re,cs,ce:longint;
  rxx:longint;
  o1,o2,o3:longint;

function Punkt_Prüfen(rr,cc:integer;var Wert,unterer,oberer:byte):boolean;
var
  ca,anz,cas,ras,rar:integer; summe:int64; pix,u,o:byte;
begin
  u:=255; o:=0; summe:=0; anz:=0;
  cas:=Quertoleranz-1; ras:=Längstoleranz-1;
  rar:=((rr-ras)*xx)+cc;
  repeat
    for ca:=-cas to cas do begin
      pix:=OPicture[rar+ca];
      if pix<u then u:=pix;
      if pix>o then o:=pix;
      summe:=summe+pix; inc(anz);
    end;
    rar:=rar+xx;
  until rar=((rr+ras)*xx)+cc;
  unterer:=u; oberer:=o;
  if anz>0 then wert:=summe div anz;
  result:=true;
end;

begin
  o1:=0;o2:=0;o3:=0;
  rs:=Längstoleranz+1;

```

```

re:=yy-Längstoleranz-1;
cs:=Quertoleranz+1;
ce:=xx-(Quertoleranz+5);
r:=rs;
i:=0;
repeat
  c:=cs;
  rxx:=r*xx;
  repeat
    adr:=rxx+c;
    if Pfad[adr]<>255 then
      if Maske[adr]<>0 then
        if i<C_PosArrayEnde then
          with feld[i]do begin
            Punkt_Prüfen(r,c,gray,UnterWert,ObererWert);
            if ObererWert-UnterWert<C_PosRausschmiss then begin
              if ObererWert-UnterWert<Ldata.Position.P_all.LernToleranz.get then
                begin
                  if ObererWert<(255-Ldata.Position.P_all.MessToleranz.get) then
                    ObererWert:=ObererWert+Ldata.Position.P_all.MessToleranz.get
                  else ObererWert:=255;
                  if UnterWert<Ldata.Position.P_all.MessToleranz.get then
                    UnterWert:=0 else
                    UnterWert:=UnterWert-Ldata.Position.P_all.MessToleranz.get;
                end;
                orie:=Pfad[adr];
                if orie=1 then inc(o1)else
                  if orie=2 then inc(o2)else
                    if orie=3 then inc(o3);
                adresse:=adr;
                cpos:=c;
                rpos:=r;
                quadrantc:=c div C_QuadrantenAbstandQuer;
                quadrantr:=r div C_QuadrantenAbstandLaen;
                last:=false;
                inc(i);inc(c);
              end;
            end;
            inc(c,2);
          until c>ce;
          inc(r,1);
        until r=re;
      =i;
    end;
  end;
end;

```

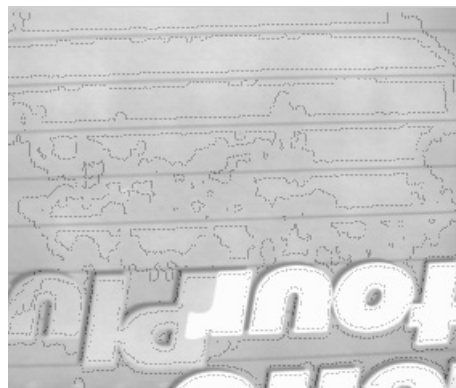


Abbildung 45: Ergebnisbild nach der Funktion „Positionsmerkmale lernen“

D Einführung in die Fuzzy Logic

Die Fuzzy-Set-Theorie wurde von Lofti A. Zadeh 1965 an der University of Berkeley, USA, begründet, um eine mathematische Beschreibung für nicht exakte und unvollständige Datensätze, wie sie in der Praxis häufig auftreten, z.B. in der Sprach- und Bildverarbeitung, zu erhalten. Dabei bedeutet Fuzzy soviel wie "undeutlich", "verschwommen" oder "unscharf". Fuzzy Logic ist aber nicht, wie man vielleicht annehmen könnte, etwas Ungenaues. Sie ist eine exakte Theorie und kann als eine Erweiterung der gewöhnlichen Mengenlehre angesehen werden. Zur genaueren Unterscheidung gewöhnlicher Mengen der klassischen Theorie von unscharfen Mengen (Fuzzy-Sets), werden diese als scharfe Mengen (Crisp-Sets) beschrieben. Eine scharfe Menge ist dadurch gekennzeichnet, dass für alle Elemente eindeutige Aussagen der Form richtig/falsch, wahr/unwahr, ja/nein, high/low oder 1/0 gemacht werden. Bei unscharfen Mengen werden eindeutige Zugehörigkeitsaussagen nicht mehr getroffen. Es erfolgt eine qualitative Beschreibung von Objekten, z.B. in der Form: kalt, lauwarm, warm, heiß. Im Gegensatz zur klassischen Mengenlehre gibt es bei unscharfen Mengen keine scharfe Schwelle. Soll beispielsweise eine Raumtemperatur von 18°C zwischen den Wertungen "kalt" und "warm" eingestuft werden, so lässt sich die Temperatur 18°C beispielsweise mit 20 % zur Menge "kalt" und mit 80 % zur Menge "warm" rechnen. Es ist bereits zu erkennen, dass hierdurch linguistisch formulierte Ausdrücke technisch verarbeitbar werden. Fuzzy-Regelung (Fuzzy-Control) ist dabei nur ein mögliches Anwendungsgebiet, linguistisch formuliertes Wissen zu nutzen.

Multiplikation von Mengen

Sind A und B zwei Mengen, so heißt die Menge aller möglichen geordneten Paare der Form (a, b), wo a ein Element von A und b eines von B ist, das kartesische Produkt von A und B, häufig als $A \times B$ geschrieben. Ist z. B. $A = \{1, 2\}$, $B = \{x, y, z\}$, so ist $A \times B = \{(1, x), (1, y), (1, z), (2, x), (2, y), (2, z)\}$. $B \times A = \{(x, 1), (y, 1), (z, 1), (x, 2), (y, 2), (z, 2)\}$. Hier ist $A \times B \neq B \times A$, weil das Paar (1, x) von dem Paar (x, 1) unterschieden werden muss.

Beziehungen zwischen Mengen

Die Elemente der Menge $A = \{1, 2, 3\}$ können auf sechs verschiedene Weisen mit den Elementen der Menge $B = \{x, y, z\}$ so gepaart werden, dass jedem Element von B ein Element von A, jedem Element von A ein Element von B und verschiedenen Elementen der einen Menge verschiedene Elemente der anderen zugeordnet werden. Beispielsweise können die Elemente wie folgt gepaart werden: (1, y), (2, z), (3, x). Eine Zuordnung dieser Art heißt eine eineindeutige (1-1) Relation zwischen den Elementen von A und denen von B. Von zwei Mengen, deren Elemente eineindeutig einander zugeordnet werden können, sagt man, dass sie dieselbe Mächtigkeit besitzen – in diesem Zusammenhang bedeutet eineindeutig, dass man die Elemente der einen Menge mit denen der anderen Menge zu Paaren koppeln kann. Die

Elemente der Menge $A = \{1, 2, 3\}$ können nicht eindeutig auf die Elemente irgendeiner ihrer echten Teilmengen abgebildet werden; in diesem Fall handelt es sich um eine endliche Menge oder eine Menge endlicher Mächtigkeit. Die Elemente der Menge $B = \{1, 2, 3, \dots\}$ hingegen können eineindeutig auf die Elemente ihrer echten Teilmenge $C = \{3, 4, 5, \dots\}$ abgebildet werden, indem man beispielsweise dem Element n aus B das Element $n + 2$ aus C für $n = 1, 2, 3, \dots$ zuordnet. Eine Menge mit dieser Eigenschaft heißt eine unendliche Menge oder eine Menge unendlicher Mächtigkeit.

Fuzzy-Systeme

Die Theorie unscharfer Mengen – Fuzzy-Set-Theorie - kann sowohl als Verallgemeinerung der klassischen Mengenlehre als auch als Verallgemeinerung der zweiwertigen, dualen Logik angesehen werden (Zimmermann 1993).

Eine klassische Menge fasst Elemente zusammen, die mindestens eine gemeinsame Eigenschaft haben. Ist diese Eigenschaft vorhanden, so gehört das Element zur Menge. Ist diese Eigenschaft nicht vorhanden, so gehört das Element nicht zur Menge. Der in der Theorie unscharfer Mengen benutzte Mengenbegriff spannt den Bogen von dieser zweiwertigen (ja/nein) Mengenzugehörigkeit zu einem graduellen Zugehörigkeitsbegriff. Mit diesem kann für jedes Element angegeben werden, zu welchem Grade es zu einer unscharfen Menge gehört. Grundlegende Definitionen aus dem Bereich der Theorie unscharfer Mengen und weiterführende Entwicklungen stellt beispielsweise Zimmermann (Zimmermann 1993) dar. Im Folgenden werden ausschließlich die Begriffe wiedergegeben, die für das Verständnis der weiteren Ausführungen notwendig sind.

Eine unscharfe Menge ist gegeben durch den folgenden Ausdruck: $\tilde{A} := \{(x, \mu_{\tilde{A}}) : x \in X\}$

Dabei ist X eine scharfe (konventionelle) Menge von Objekten, die hinsichtlich einer unscharfen Aussage bewertet ist. Der Ausdruck \tilde{A} heißt Zugehörigkeitsfunktion und $\mu_{\tilde{A}}(x)$ gibt den Zugehörigkeitsgrad des Elements x zu der unscharfen Menge \tilde{A} an.

Bei regelbasierten Ansätzen werden unscharfe Mengen primär zur inhaltsdefinierten, formalen Abbildung menschlichen Wissens benutzt. Damit wird es möglich, menschliches Erfahrungswissen auf elektronischen Datenverarbeitungsanlagen zu verwenden. Bei regelbasierten Ansätzen wird ein fehlender oder ineffizienter algorithmischer Ansatz durch die Verwendung menschlichen Wissens in Form von "Wenn ... Dann ..." Regeln ersetzt.

In vielen Aufgaben, bei denen Daten ausgewertet werden müssen, gibt es Experten, die Wissen über die in den Daten enthaltenen Ursache-Wirkungszusammenhänge besitzen. Da Experten bei der Formulierung ihres Wissens in vielen Fällen unscharfe Formulierungen verwenden, bieten sich Methoden aus dem Bereich der Fuzzy-Technologien zur Wissens-erfassung und -verarbeitung an.

E Einführung in Genetische Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen zählen wie die Neuronalen Netze zu den naturanalogen Verfahren. Die ihnen zu Grunde liegenden Ideen orientieren sich an den Theorien von C. Darwin und G. Mendel, die sich mit der Evolution von lebenden Organismen beschäftigten. Die Prinzipien der Evolution und Genetik sind die bestimmenden Merkmale für eine Optimierung mit Evolutionären Algorithmen (Joereßen 1998) (Grauel 1995).

Der Darwinismus ist die durch Charles Darwin begründete Lehre von der stammesgeschichtlichen Entwicklung durch Auslese. Darwin erkannte auf seiner Weltreise, dass die geografische Verteilung der Organismen, die Besetzung ozeanischer Inseln und auch die paläontologischen Daten die allgemeine Evolution nahe legt. Darwin hatte noch keinen Einblick in das Wesen der Variabilität und keine Kenntnis bezüglich des Vererbungsmechanismus. Die Selektionstheorie, die die Kausalität der organischen Evolution analysiert und grundsätzlich klärt, nimmt keine Abänderungen im Genotypus der Organismen an, die die Eignung der Lebewesen positiv oder negativ beeinflussen. Im statistischen Durchschnitt sind die besten geeigneten Lebewesen im Vorteil, das heißt diejenigen, die jeweils die größten Fortpflanzungsraten besitzen. Durch die Wirkung der natürlichen Auslese bleiben sie im Ringen um die Existenz erhalten (Joereßen 1998) (Pohlheim 1997) (Darwin 1859).

Gregor Mendel entdeckte die grundlegenden Prinzipien der Übertragung von Erbinformationen von Eltern auf ihre Kinder und ist Begründer der Mendelschen Vererbungslehre. Er stellte fest, dass Erbinformationen in diskreten Einheiten in Form von Genen abgelegt sind. Diese Gene sind in Chromosomen organisiert, die als hauptsächliche Träger der Erbinformationen gelten. Im Wesentlichen wird bei der Weitergabe von Erbinformationen an eine neue Generation die Erbinformationen der Eltern durch Cross-over und Mutation verändert. Mit Cross-over bezeichnet man in der Biologie den Austausch von Erbfaktoren zwischen homologen Chromosomen. Mutation nennt man eine spontane oder künstlich erzeugte Veränderung im Erbgefüge (Joereßen 1998).

Um 1960 wurden die bisher nur im biologischen Kontext untersuchten Evolutionsprozesse abstrahiert und für die Lösung von praktischen Aufgabenstellungen verwendet. Diese ersten Arbeiten mit und an Evolutionären Algorithmen begannen weltweit etwa zur gleichen Zeit an verschiedenen Stellen. Auf Grundlage dieser Arbeiten entwickelten sich zunächst drei Richtungen der Evolutionären Algorithmen.

- Evolutionäre Programmierung
- Evolutionsstrategien
- Genetische Algorithmen

Alle diese Verfahren verwenden die Grundelemente des Evolutionsprozesses: Selektion und Variation, Unterschiede ergeben sich in der Ausprägung dieser Elemente.

Von Fogel, Owens und Walsh wurde 1966 die Entwicklung und Anwendung der Evolutionären Programmierung beschrieben (Fogel 1966). Mutation wurde als der hauptsächlich evolutionäre Faktor angesehen, es wurde aber auch die Möglichkeit der Rekombination erwähnt. Wesentlich später um 1980 wurden Entwicklungen zur Evolutionären Programmierung fortgeführt (Fogel 1992) (Fogel 1995).

Die Anfänge der Entwicklung der Evolutionsstrategien begannen um 1960 an der Technischen Universität Berlin durch Bienert, Rechenberg und Schwefel. Der von ihnen entwickelte Algorithmus basierte auf zufälligen Veränderungen der Individuen, kleinere Veränderungen an den Individuen waren wahrscheinlicher als große Veränderungen (Rechenberg 1973) (Schwefel 1968). Dabei wurde in den ersten Arbeiten mit einem Individuum gearbeitet. Der Nachkomme entstand durch Mutation, der bessere von Elter und Nachkomme wurde als Elter der nächsten Generation verwendet. Um 1980 verwendete dann Schwefel eine vollständige Population für Evolutionsstrategien und bezog wichtige Parameter des Suchverfahrens in den Optimierungsprozess ein (Schwefel 1975) (Schwefel 1995).

Genetische Algorithmen ist der am weitesten bekannte Typ Evolutionärer Algorithmen. Der Begriff Genetischer Algorithmus geht auf eine Arbeit von Bagley zurück (Bagley 1967). In ihrer heute bekannten Form wurde sie aber von J.H. Holland entwickelt. Eines seiner wichtigsten Ergebnisse seiner Arbeit war die Formulierung des Schema-Theorems. Damit wurde der Versuch einer Erklärung unternommen, wie und warum Genetische Algorithmen arbeiten und funktionieren (Holland 1975).

Entwickelten sich bis 1990 bzw. 1991 die drei Schulen Evolutionärer Algorithmen, Evolutionäre Programmierung, Evolutionsstrategien und Genetische Algorithmen unabhängig voneinander, so wird heute der Begriff Evolutionäre Algorithmen als gemeinsame Bezeichnung verwendet (Schwefel 1991).

Aufbau Evolutionärer Algorithmen

Grundsätze der Evolution und Genetik sind die ausschlaggebenden Merkmale für eine Optimierung mit Evolutionären Algorithmen. Qualitativ ist die Evolution als kollektiver Lernprozess erklärbar mit elementaren Prinzipien: Erfolgreiche Innovation wird „gespeichert“ und erfolglose wird „vergessen“. Das Prinzip Evolution basiert auf der natürlichen Selektion und der Vererbung von Merkmalen und Eigenschaften. Unter Selektion versteht man das Weiterbestehen der Individuen mit besserer Anpassung an die Gegebenheiten der Umwelt und das Aussterben von Spezies mit schlechter Anpassung. Damit ist grundlegend die Möglichkeit gegeben, dass die Individuen mit den besten Anpassungswerten sich fortpflanzen und ihre Merkmale an die nächste Generation weitergeben. Eine Eigenschaft Evolutionärer Algorithmen ist die Tatsache, dass das Wissen über ein zu lösendes Problem in Populationen verteilt ist. Hauptanwendungsgebiete sind bisher mathematische Optimierungen und speziell

nichtlineare Optimierungsprobleme. Ist ein Problem formuliert, so wird mit einer Menge von zulässigen Lösungen (Population) gearbeitet. Vorteile der Arbeit mit mehreren Lösungen ergeben sich durch die Möglichkeit der parallelen Verarbeitung (Grauel 1995).

Die meisten Begriffe im Zusammenhang mit Evolutionären Algorithmen sind aus der Biologie übernommen und in ihrer Bedeutung adaptiert worden. In einer Iteration eines Evolutionären Algorithmus wird eine Anzahl von Individuen betrachtet. Ein Individuum wird auch als potentielle Lösung, Genotyp, Struktur oder String bezeichnet. Die Gesamtheit dieser Individuen zu einem Zeitpunkt bezeichnet man als Population. Ein Individuum besitzt in der Natur in der Regel mehrere Chromosomen, bei Evolutionären Algorithmen in ihrer ursprünglichen Form jedoch beschränkt man sich auf genau ein Chromosom je Individuum. Man spricht daher auch von Ein-Chromosomen-Individuen. Die Chromosomen bestehen aus Genen. Die Position eines Gens bezeichnet man als Locus. Den Wert eines Gens nennt man Allel. Die Allele sind bei Genetischen Algorithmen binär, das heißt jedes Gen kann entweder den Wert „0“ oder „1“ annehmen (Joereßen 1998) (EducETH 1999). Die Allele von Evolutionären Algorithmen sind realwertig (Grauel 1995).

Komponenten Evolutionärer Algorithmen

Nach einer Initialisierungsphase zu Beginn wird in einem Prozess über mehrere Generationen eine Suche durchgeführt. In jeder Generation wird eine Anzahl neuer Generationen erstellt. Dies erfolgt durch die Auswahl von Individuen entsprechend ihrer Fitness, aus denen nachfolgend durch die Anwendung von evolutionären Reproduktionsoperatoren neue Individuen erzeugt werden. Diese werden in die Population eingefügt, wodurch eine neue Population entsteht. Die neue Population dient als Ausgangspunkt für die Erstellung neuer Individuen in der nächsten Generation. Dieser Prozess führt zur Evolution (Entwicklung) von Populationen von Individuen, die immer besser an die jeweilige Zielstellung angepasst sind, als die Individuen, von denen sie erzeugt wurden. Dies entspricht der natürlichen Anpassung. Da Evolutionäre Algorithmen mit Populationen von Individuen arbeiten, wird die Suche im Problemraum in einer parallelen Art durchgeführt. Evolutionäre Algorithmen modellieren verschiedene natürliche Prozesse, wie Selektion, Reproduktion, Rekombination, Mutation, Migration, Lokalität, Nachbarschaft, Parallelität und Konkurrenz. Jeder dieser Prozesse kann in einer Vielzahl von Varianten auftreten (Pohlheim 1997) (Hering 1995).

Der folgende Ablaufplan fasst das Vorgehen von Evolutionären Algorithmen zusammen. Unter Benutzung eines Zählers, der mit 0 initialisiert wird, startet man mit einer Anfangspopulation $P(0)$. In einer Schleife, die durch ein Abbruchkriterium terminiert ist, werden nach der Inkrementierung des Zählers durch Selektion, Cross-over und Mutation Folgegenerationen $P(t)$ erzeugt.

Ausgangspopulation und Codierung

Um einen Evolutionären Algorithmus zur Lösung eines Problems anwenden zu können, müssen zunächst die zu verarbeitenden Informationen in binärer Form aufgearbeitet werden. Dies ist je nach dem zu Grunde liegenden Problem unterschiedlich schwierig. Liegt ein Rucksackproblem (einfache binäre Optimierung) vor, so sind die Auswahlvariablen binär und man kann jedes Gen als eine Auswahlvariable und jedes Allel als Wert einer Auswahlvariablen definieren, und es genügt die Loci der einzelnen Gene festzulegen. Liegt zum Beispiel ein Traveling Salesman Problem (Suche nach der optimalen Reiseroute) zugrunde, so stellt sich die Codierung bereits wesentlich schwieriger dar. Um die Mechanismen der Fortpflanzung anwenden zu können, ist es erforderlich, eine anfängliche Population von Individuen oder potentiellen Lösungen zu haben. Es gibt ein breites Spektrum an Möglichkeiten, eine initiale Population zu erzeugen. Eine einfache Möglichkeit ist die vollkommene zufällige Generierung der zugehörigen Individuen oder die Verwendung von verschiedenen guten, bereits bekannten Lösungen, die der Algorithmus in die Suche nach noch besseren Lösungen einbeziehen soll (Joereßen 1998) (EducETH 1999) (EfiTrading 2001) (Moros 1999) (Grauel 1995).

Für die Repräsentation (Codierung) von Individuen werden Binärstrings der Länge l verwendet. Für Probleme einer booleschen Optimierung ist diese Repräsentation gut angepasst. Für numerische Optimierungsprobleme ist es erforderlich, den Parametervektor x digital zu codieren, das heißt einen Übergang in den Binärraum zu vollziehen:

$$x_j^* = \sum_{i=1}^{l_j} b_{i-1} 2^{i-1}$$

b_{i-1} : (i-1)-te Bitposition, l_j : Länge des Bitstrings.

Für die Decodierung benötigt man eine Decodierfunktion:

$$x_j = u_j + \frac{(o_j - u_j)}{2^{l_j} - 1} \cdot x_j^*$$

u_j : untere Schranke, o_j : obere Schranke.

Eine andere Möglichkeit der Codierung besteht in der Umwandlung in einen zyklischen Gray-Code. Dieser wurde von E. Gray realisiert und durch die Modifikation durch Glixon im Übergang von den dezimalen Zahlen 0 bis 9 zyklisch. Dabei wird die binäre Ausgangszahl um eine Stelle nach links geschoben und anschließend mit sich selbst modulo 2 addiert.

Durch die Zurückschiebung des Ergebnisses um eine nach Stelle rechts erhält man den Gray-Code:

$$x_{Gray} = shr(shl(x_{Binär}) + (x_{Binär} \bmod 2))$$

Der Vorteil liegt beim Übergang von einer Dualzahl zur nächsten, es ändert sich jeweils nur ein Bit. Damit sind Veränderungen der Individuen, z.B. durch Mutation, nicht von der Position des Bits abhängig.

Selektion

Der Schritt von einer Generation zur nächsten wird durch die Selektion zur Reproduktion eingeleitet. Selektion bedeutet im Zusammenhang mit Genetischen Algorithmen, die Zielerreichung für jede potentielle Lösung zu bewerten. Die Wahrscheinlichkeit der Reproduktion jedes Individuums orientiert sich an seinem Beitrag zur Gesamtzielerreichung der Population. Hierbei spricht man von „survival of the fittest“, was beinhaltet, dass die Individuen, die eine höhere Zielerreichung haben als andere Individuen, mit einer größeren Wahrscheinlichkeit reproduziert werden. Ein einfaches Verfahren ist das Roulettewheel-Verfahren, bei dem die Reproduktion zufallsgesteuert unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeiten erfolgt, oder das Binäre Wettkampfselektionsverfahren, bei dem eine neue Population durch den Gewinner des Vergleichs zweier zufällig gewählter Individuen erzeugt wird (Joereßen 1998) (EducETH 1999).

Kreuzung und Mutation

Um aus bekannten potentiellen Lösungen neue zu generieren, die es ermöglichen, noch unbekannte potentielle Lösungen zu untersuchen, bedarf es der genetischen Operatoren. Sie dienen dazu, das Erbgut von Individuen zu verändern. Die elementaren genetischen Operatoren sind Cross-over (Kreuzung) und Mutation. Das Cross-over ist ein Operator, der zwei homologe Chromosomen als Argumente benötigt. Die beiden Chromosomen werden an einer zufällig ausgewählten Position geteilt. Die vier so entstandenen Teilstücke werden über Kreuz zusammengeführt (Rekombination).

Bei der Mutation handelt es sich um eine spontane Veränderung im Erbgefüge. Zufällig ändert eine geringe Anzahl von Genen bei einem Vererbungsschritt als Schritt von einer Population zu einer anderen Population zu einem Zeitpunkt ihre Allele.

Schließlich wird ein genetischer Algorithmus konkret durch eine Anzahl von Werten für unterschiedliche Parameter festgelegt, die den Algorithmus steuern. Dazu gehören neben der Populationsgröße insbesondere die Wahrscheinlichkeit für das Cross-over und die Wahrscheinlichkeit für die Mutation eines Gens (Joereßen 1998) (EducETH 1999).

Modifikationen und Erweiterungen

Neben dem bereits genannten Roulettewheel-Verfahren und dem binären Wettkampfselektionsverfahren haben sich noch eine Anzahl weiterer Verfahren bewährt.

- Bei der elitären Selektion wird immer das beste Individuum in die nächste Generation übernommen. Dieses Verfahren ist bei Problemen mit wenigen lokalen Optima geeignet, sonst führt es eher zu schlechteren Ergebnissen als das Roulettewheel-Verfahren.
- Bei der Erwartungswert-Selektion wird zunächst die erwartete Anzahl der Nachkommen für jedes Individuum berechnet. Diesen Wert dekrementiert man jedes Mal um 0.5, wenn das Individuum zur Reproduktion selektiert wurde. Ist dieser Wert kleiner als Null wird dieses Individuum nicht mehr selektiert.
- Crowding-factor-Modell: Bevölkert eine Population einen Bereich des Lösungsraums sehr dicht, so führt das zu einem erhöhten Selektionsdruck, das heißt weniger Individuen überleben den nächsten Fortpflanzungsschritt unverändert. Diese Selektion wird über einen sogenannten crowding-factor gesteuert. Dieser gibt an, welcher Anteil einer Population die Fortpflanzung nicht überlebt. Ausgehend von der Population $P(t)$ wird zunächst durch Selektion und Reproduktion ein neues Individuum in die Folgepopulation $P(t+1)$ geboren. Dann bestimmt man eine Teilmenge von $P(t)$ mit der Größe $|P(t)| \cdot \text{crowding-factor}$ und wählt daraus das Individuum, welches dem zuletzt Geborenen am ähnlichsten ist, zum Sterben aus, das heißt, man eliminiert es aus $P(t)$. Das Verfahren liefert hervorragende Ergebnisse bei der Optimierung von Funktionen mit vielen Optima.
- Bei der Rang-Selektion ist die Wahrscheinlichkeit für das Überleben eines Individuums von seiner Fitness, gemessen auf einem ordinalen Skalenniveau, abhängig. Die Wahrscheinlichkeit zwischen erstem und letztem Rang nimmt linear ab. Das Verfahren macht die Selektion unabhängig von der konkreten Ausprägung der Fitness und betont stattdessen die relative Ausprägung der Fitness von Individuen einer Population zueinander.

Die Codierung von Informationen für die Verarbeitung in Genetischen Algorithmen bietet ebenfalls die Möglichkeit, der speziellen Problemstruktur Rechnung zu tragen. Je nach dem zu bearbeitenden Problem ist es in Weiterentwicklungen möglich, die in klassischen Genetischen Algorithmen verwendete Codierung zu erweitern und ein größeres Alphabet (0, 1, 2... n) zu verwenden. Damit kann man die unzulässigen Lösungen im Suchraum reduzieren.

Eine weitere Modifikation Genetischer Algorithmen besteht in der Frage der Zulässigkeit und Unzulässigkeit potentieller Lösungen und damit in der Behandlung der Nebenbedingungen. Drei verschiedene Arten der Behandlung von Nebenbedingungen werden angewendet (Joereßen 1998) (EducETH 1999):

- Bei den Strafkosten-Algorithmen wird die Unzulässigkeit einer Lösung durch Strafkosten sanktioniert. Dieser Algorithmus ist zwar einfach zu implementieren, er ist jedoch schwierig in der Festlegung der geeigneten Parameter.
- In Reparaturalgorithmen werden unzulässige potentielle Lösungen, die durch Cross-over und Mutation entstanden sind, in möglichst ähnliche aber zulässige Lösungen umgeformt. Der Vorteil, dass in den weiteren Verarbeitungsschritten dann nur mit zulässigen Lösungen gearbeitet werden kann, erkauft man sich mit sehr aufwendiger Implementierung und nicht unerheblichem Rechenzeitbedarf.
- Bei der Verwendung und Entwicklung spezieller Genetischer Operatoren kann auch das Zustandekommen unzulässiger Lösungen verhindert werden. Diese sind jedoch schwierig zu entwickeln und bringen im Allgemeinen Laufzeitnachteile für den Algorithmus mit sich.

Verwendung der Merkmale in Bezug auf die Mustererkennung

Das Ziel der Zuordnung von Merkmalen zu den einzelnen Objekten ist die Unterteilung der Objekte in disjunktive Mengen (Klassen). Dies wird besonders deutlich bei der Zeichenerkennung. Hier sollte jeweils nur eine Zeichenart in einer Menge vorhanden sein. Ähnliche Zeichen wie „B“ und „8“ sollen aufgrund ihrer Merkmale getrennt, das heißt unterschieden, werden.

Gerade bei der Zeichenerkennung ist diese eindeutige Zuordnung auf Grund der Variationen der Zeichen und der vielen Schriftarten oft nicht möglich. In diesem speziellen Fall können fehlende Buchstaben durch die Suche des gefundenen Teilwortes in einem Wörterbuch oder Datenbank ergänzt werden.

Allgemein sollten jedoch immer so viele Merkmale zur Identifizierung herangezogen werden, dass eine eindeutige Aufteilung und Zuordnung gewährleistet ist. Dies sollte mindestens bei den Referenzobjekten in der Trainingsphase der Fall sein.

Die N -Merkmale aus einer Trainingsphase spannen einen N -dimensionalen Merkmalsraum auf. Es sollten dabei nicht alle möglichen Merkmale verwendet werden, sondern nur so viele und diejenigen, die eine eindeutige Unterscheidung ermöglichen.

Da bei der Klassifikation der Objekte auf Grund der berechneten Merkmale die einzelnen Merkmale nicht immer so ausgeprägt sind wie bei den Referenzobjekten in der Trainingsphase, muss in Zweifelsfällen eine Entscheidung darüber getroffen werden, zu welcher Klasse ein Objekt gehört. In der Regel wird in solchen Fällen eine geometrische

Klassifikation durchgeführt, das heißt ein Objekt wird der nächstgelegenen Klasse zugeordnet. Die Entfernung wird auch hier durch die Euklidische Distanz im Merkmalsraum bestimmt. Eine Gewichtung der einzelnen Entfernungen in Abhängigkeit der Relevanz eines Merkmales für eine genauere Klassifizierung ist denkbar (Steinbrecher 1993).

Genetische Neuronale Netze

Ausgehend von der Darwinschen Evolutionstheorie ist ein Netzmodell möglich, in dem das Lernen des Netzes das Ergebnis einer natürlichen Auslese in einer Population von sich vermehrenden Einzelwesen ist. Soll ein Netz aus einer gewissen Menge von Beispielen lernen, wird, statt eine Lernformel in der Form $\Delta W_{ij} =$ zu definieren, eine genetische Mutation definiert, die als eine kleine, zufällige Änderung einiger Gewichte W_{ij} des Netzes oder als Addition oder Subtraktion eines Elementes zu verstehen ist. Definiert wird außerdem ein Kriterium für das Vermehren und den Tod des Netzes, das System hält eine Population von Netzen am Leben, die geboren werden, sich fortpflanzen und sterben. Die Netze sind zwittrig und die Nachkommen sind eine durch Mutation leicht geänderte Kopie des Ausgangsindividuums. Ein Netz wiederholt während des Lebens die Beispiele mehrfach und vermehrt sich. Die Lebenszeit und die Möglichkeit der Reproduktion sind Funktionen des vom Netz während der Beispielausführung gemachten Fehlers, wer wenig Fehler macht, wird die Folgegeneration mit bestimmen. Es wird eine Grenze definiert für die Anzahl der Individuen (Netze), bei der die Population nicht mehr wächst. Bei der Entwicklung eines solchen Systems wird am Anfang eine sehr vielfältige Population entstehen, die zufällige und sehr unterschiedliche Netze enthält, die in weiteren Iterationen auf Grund der natürlichen Auslese zu einer Verbesserung der Individuen führt, die diejenigen Netze begünstigt, die weniger Fehler machen. Es wird asymptotisch die Situation erreicht, in der die Population aus gleichen und vollkommenen Netzen besteht, die sich nur durch kleine genetische Variationen unterscheiden (Mazzetti 1992).

Diese genetischen Modelle von Neuronalen Netzen haben trotz ihrer Faszination bisher auf Grund der immensen geforderten Speicher- und Rechenleistung keinen großen Erfolg gehabt. Derzeitige Forschungen auf diesem Gebiet beschäftigen sich mit dem Ziel, Netze zu entwickeln, die ihre eigene Topologie entwickeln (Mazzetti 1992).

F Einführung in die Mustererkennung

Überblick

Mustererkennung ist ein Spezialgebiet und rückt in letzter Zeit immer stärker in den Blickpunkt des Interesses auf dem Gebiet der Verarbeitung von Bildinformationen. Mustererkennung ist ein Bereich, wo herkömmliche mathematische Verfahren besonders schnell an ihre natürlichen Grenzen stoßen. Gerade bei der Mustererkennung fällt auf, mit welcher scheinbaren Leichtigkeit Lebewesen die komplexesten Mustererkennungsprobleme in Echtzeit lösen, wohingegen auch Hochleistungs-Computer an wesentlich simpleren Aufgabenstellungen scheitern (Tilli 1993a). Zu den besonders schwierigen, aber auch besonders interessanten Problemen der Mustererkennung zählen Sprach- und Bilderkennung in realer Umgebung. Diese Problemstellungen sind äußerst komplex.

Eine brauchbare Definition, was unter Mustererkennung zu verstehen ist, lautet: „Pattern recognition is the search for structure in data“ (Bezdek 1981).

Verarbeitungsmodell der Mustererkennung

Ein allgemeines prozessorientiertes Modell für die Vorgehensweise bei der Mustererkennung zeigt Abbildung 46: Allgemeines Blockbild der Mustererkennung (nach Tilli 1993a).

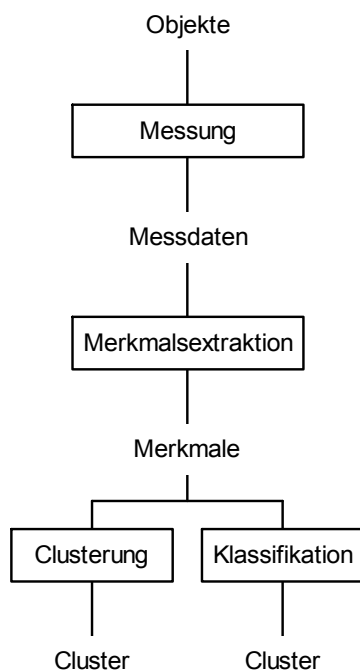


Abbildung 46: Allgemeines Blockbild der Mustererkennung (nach Tilli 1993a)

Der erste Verarbeitungsschritt besteht in der Erfassung der Daten. Dazu werden die Objekte der realen und physikalischen Welt abstrahiert und von geeigneten Sensoren in Messdaten überführt. Der nächste Verarbeitungsschritt besteht darin, aus den Daten charakteristische Merkmale zu extrahieren. Dies erfolgt durch Abstraktion der Objekte, das heißt durch Modellbildung. Bei diesem Prozess werden Merkmale im Merkmalsraum gewonnen, der im Allgemeinen eine wesentlich geringere Dimension aufweist als der Datenraum. Dies ist für eine effiziente Mustererkennung von großer Bedeutung (Tilli 1993a).

Falls nun feste Merkmalsklassen (Cluster) vorgegeben sind, können die Objekte klassifiziert werden (in bestimmte Merkmalsklassen einordnen). Die Merkmalsklassen definieren den Klassifizierungsraum. Diese Merkmalsklassen können mittels eines automatischen Prozesses gewonnen werden oder auch manuell definiert werden. Ein Verfahren, welches Merkmalsklassen automatisch findet, wird automatisches Clustern oder Cluster-Algorithmus genannt. Werden die Cluster auch während einer laufenden Klassifizierung modifiziert, spricht man von lernender Klassifizierung (Tilli 1993a).

Die einzelnen Verarbeitungsschritte lassen sich nicht so ohne weiteres von einander trennen, da sie ein hohes Maß an Interaktivität aufweisen. Sind optimale Merkmale vorgegeben, so ist die Clusterung und Klassifizierung trivial. Jedoch können besonders charakteristische Merkmale oft erst nach einer Clusterung entdeckt werden. Auch die Datenvorverarbeitung und geeignete Sensoren spielen eine große Rolle. Besteht beispielsweise die Aufgabe ein bewegtes Ziel zu verfolgen, so kann dies extrem aufwendig sein, wenn dies mittels einer Kamera und einem Bildanalyse- und Erkennungssystem erfolgt. Wird in diesem Fall ein Sensor eingesetzt, der nur Bewegungen direkt aufnimmt und damit nur die sich bewegenden Objekte aufnimmt, so lässt sich der Aufwand beträchtlich reduzieren. Dies verdeutlicht die immense Bedeutung von effektiven Datenreduktionsverfahren (Tilli 1993a).

Verfahren der Mustererkennung - Prozessbeschreibung

Der erste Schritt beim Entwurf eines Mustererkennungsverfahrens ist die Wahl einer geeigneten Prozessbeschreibung. Folgende Möglichkeiten stehen dafür zur Verfügung (Tilli 1993a):

- Syntaktische Mustererkennung,
- Kontextuelle, regelbasierte und konzeptionelle Mustererkennung und
- Numerische Mustererkennung.

Bei der Technik der syntaktischen Mustererkennung wird versucht, Muster auf Grund struktureller Beziehungen zwischen verschiedenen Teilen zu definieren und zu erkennen. Die geschieht in gleicher Weise wie beim Menschen, der Buchstabe „E“ kann beispielsweise durch drei waagerechte Linien und eine etwas längere senkrechte Linie

charakterisiert werden. Syntaktische Mustererkennung beschreibt Strukturen in Sätzen, Grammatiken und Automaten. Ein Beispiel für konventionelle syntaktische Mustererkennung sind Compiler und Interpreter in gängigen höheren Programmiersprachen (Tilli 1993a).

In die Kategorie der kontextuellen, regelbasierenden und konzeptionellen Mustererkennung fallen Mustererkennungssysteme, in denen versucht wird, Konzepte und Kontexte und Expertenwissen in den Mustererkennungsprozess einzubeziehen. Beispielsweise könnte ein Spracherkennungssystem Grammatikregeln beherrschen und mit dem Wissen über die menschlichen Bezüge in Gesprächsinhalten und Wortkontexten auch vollkommen unverständliche Worte verstehen. Solche Ansätze, die menschliche Kognitionen modellieren, erfordern Wissenserfahrung, Repräsentation und Manipulation aus dem Bereich der Expertensysteme (Tilli 1993a).

Die numerischen Mustererkennungsverfahren sind am weitesten verbreitet und werden als Low-Level-Systeme bezeichnet, da im Allgemeinen mit Daten gearbeitet wird, die direkt von Sensoren stammen. Meist werden in diesen Systemen Datenmatrizen oder Distanzmatrizen verwendet. In diesen Matrizen stecken Vektoren, für die die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse entweder bekannt ist oder erst entwickelt wird. Vor allem bei Expertenbefragungen entstehen Distanzmatrizen, da in vielen Fällen bekannt ist, wie ähnlich sich bestimmte Objekte sind, aber bestimmte Eigenschaften der Objekte nicht direkt numerisch erfasst werden können (Tilli 1993a).

Merkmalsgewinnung

Als nächstes muss ein Verfahren festgelegt werden, das aus den Rohdaten die Merkmale gewinnt und als Input für den eigentlichen Klassifikator oder für die Clusterung verwendet wird. Meistens bezieht sich dieser Schritt auf die Objektdaten. Der erste Teilschritt besteht in der Vorverarbeitung der Daten, das wäre beispielsweise Skalierung, Glätten oder Filtern. Dieser Vorverarbeitungsschritt ist sehr bedeutend, da durch diesen die Brauchbarkeit der Daten für die weiteren komplexen Verarbeitungsschritte wesentlich erhöht wird (Tilli 1993a).

Transformation

Im folgenden Teilschritt werden die aufbereiteten Rohdaten zu den Merkmalsvektoren transformiert. Wesentlich dabei ist mittels mathematischer Transformationen oder Eliminationsverfahren, unwesentliche und redundante Informationen und Eigenschaften zu eliminieren, um die Dimension des Datenraums so weit wie möglich zu reduzieren. Mögliche Methoden sind beispielsweise Faktorenanalyse, Hauptkomponentenanalyse oder Fouriertransformation. Bei der Entwicklung von Merkmalsextraktionsverfahren sind auch grafische Verfahren bedeutend, da sich mit deren Hilfe ein schneller Eindruck der Daten verschafft werden kann (Tilli 1993a).

Clusterung

Der letzte Verarbeitungsschritt beschäftigt sich mit der Clusterung. Besteht die Aufgabe lediglich darin, die Datensätze in Gruppen aufzuteilen, wird man ein Cluster-Verfahren anwenden. Es gibt eine Vielzahl von sehr unterschiedlichen Cluster-Verfahren, wie deterministische, statistische und Fuzzy-Cluster-Algorithmen oder das Clustern mit Neuronalen Netzwerken. Des Weiteren gibt es hierarchische Cluster-Verfahren und solche, bei denen eine Zielfunktion minimiert wird. In anderen Cluster-Algorithmen werden zunächst alle Daten in ein Cluster eingeordnet und dieses dann schrittweise unterteilt oder jeder Datensatz stellt zuerst ein eigenes Cluster dar und diese werden dann schrittweise verschmolzen (Tilli 1993a).

Konstruktion eines Klassifikators

Der letzte Verarbeitungsschritt kann statt des Clusters auch die Konstruktion eines Klassifikators beinhalten. Der Unterschied zwischen Clustern und Klassifizieren ist, dass ein Cluster-Algorithmus vorgegebene Datensätze in bestimmte Klassen einordnet, während ein Klassifikator, wenn er einmal konstruiert ist, in der Lage ist, jeden Datenpunkt im Datenraum in eine Klasse einzuordnen. Klassifikatoren werden in der Regel mit Daten konstruiert, deren Klassenzugehörigkeit bekannt ist, dies wird auch als überwachtes Lernen bezeichnet. Erfolgt die Konstruktion mit Daten, deren Klassenzugehörigkeit unbekannt ist, spricht man von nicht überwachtem Lernen und das stellt in der Regel ein wesentlich schwierigeres Problem dar. Werden unscharfe Grenzen zwischen den einzelnen Klassen zugelassen, so erhält man einen unscharfen Klassifikator (Tilli 1993a).

Ein klassisches Verfahren für die Konstruktion eines Klassifikators aus der multivariaten Statistik ist die Diskriminanzanalyse. In dieser Methode werden lineare Trennfunktionen aus Trainingsdaten erzeugt. Durch das Hineinlegen von Hyperebenen im Datenraum werden Trennflächen zwischen Datenpunkten unterschiedlicher Klassenzugehörigkeit gelegt. Offensichtlich sind die Grenzen eines solchen Klassifikators, wenn die Grenzen zwischen verschiedenen Klassen nicht einfache Ebenen sind, sondern gekrümmte Flächen. Ein ganz anderes Verfahren für die Konstruktion eines Klassifikators ist ein regelbasierendes Fuzzy-System, die Konstruktion eines unscharfen Klassifikators. Eine weitere wichtige Sorte von Klassifikatoren basiert auf künstlichen Neuronalen Netzen, beispielsweise einem verteilten Assoziativspeicher nach Kosko (Kosko 1987) (Tilli 1993a).

Mustererkennung in der Bildverarbeitung

In der Bildverarbeitung werden in der Bildvorverarbeitung und in der Segmentierung indirekt die unterschiedlichsten Merkmale berechnet. Diese Merkmale beschreiben verschiedene Eigenschaften von Objekten (Steinbrecher 1993). Zu den einfachen Merkmalen zählen:

Umschreibende Rechtecke sind das Objekt umschließende Rechtecke mit dem kleinsten Flächeninhalt.

Mittlerer Grauwert, wird schon bei der Kantendetektion und bei der Segmentierung zur Berechnung von Objektgrenzen oder als mittlerer Grauwert einer bestimmten Fläche verwendet.

Flächeninhalt als Anzahl der Bildpunkte innerhalb der Objektfläche. Dieser Wert fällt schon bei der Segmentierung durch Gebietswachstum oder beim Füllen von umschlossenen Gebieten an.

Schwerpunkt, als Größe im nicht physikalischen Sinn, sondern als Näherung des Mittelwertes der Koordinaten der Objekt-Bildpunkte. Möglich ist auch eine Gewichtung der Koordinaten der Objekt-Bildpunkte mit dem korrespondierenden Grauwert (Steinbrecher 1993).

Neben diesen einfachen Merkmalen können noch weitere Merkmale, in diesem Fall abgeleitete Merkmale, aus diesen Informationen berechnet werden. Bedeutend ist dabei immer, Merkmale möglichst einfach berechnen zu können und Ergebnisse unabhängig von der Objektlage und der Objektgröße zu gewinnen (Steinbrecher 1993). Als abgeleitete Merkmale sind folgende bedeutend:

Kompaktheit, als Kompaktheit 'K' wird das Verhältnis von Umfang zu ihrem Flächeninhalt bezeichnet (Bässmann 1995):

$$K = \frac{\text{Umfang}^2}{4\pi\text{Flächeninhalt}}$$

Bei der kompaktesten Figur, dem Kreis ist $K=1$, bei allen anderen Objekten ist der Wert $K>1$. Um den relativ aufwendigen Schritt der Umfangsberechnung zu umgehen, kann eine einfachere Definition verwendet werden (Steinbrecher 1993):

$$K_2 = \frac{\text{Fläche(umschließendes) Rechteck}}{\text{Objekt - Fläche}}$$

In dieser Berechnung ist $K_2 = 1$, falls es sich bei dem Objekt um ein Rechteck handelt, und bei einem Kreis ist $K_2 \approx 1,27$.

Polarer Abstand – mit seiner Hilfe wird eine lage- und größenunabhängige Beschreibung von Objekten möglich. Ausgehend vom Objektschwerpunkt wird in festen Winkelschritten $\Delta\alpha$ der Abstand vom Schwerpunkt zum Objektrand über die Euklidische Distanz berechnet (Gonzalez 1987). Dieser Abstand wird normiert auf den Bereich $[0,1]$ über den Winkel abgetragen. Durch die Normierung wird die Objektgrößenunabhängigkeit erreicht. Mittels einer zyklischen Verschiebung dieser Kurve über den Winkelbereich $[0,360^\circ]$ bis

zum Erreichen einer Normallage kann der Einfluss einer Objektdrehung beseitigt werden und damit eine Lageunabhängigkeit erzielt werden. Die Anzahl der Maxima in der Kurve entspricht der Anzahl der Ecken des Objektes. Über die Größe der lokalen Maxima kann die Auskunft der Ausprägung der Ecken als weiteres Merkmal verwendet werden (Steinbrecher 1993).

Lage und Orientierung kann über die Lage der lokalen Maxima beim polaren Abstand bestimmt werden und als Merkmal verwendet werden (Steinbrecher 1993).

Exzentrizität ist ein weiteres Merkmal, das aus polaren Abständen berechnet werden kann. Unter der Exzentrizität 'E' wird das Verhältnis zwischen maximalem und minimalem polaren Abstand verstanden. Ein Kreis beispielsweise besitzt die Exzentrizität von 1. An welchen Stellen und wie oft die Objektform von einem Kreis abweicht, wird durch den Wert 'E' nicht bestimmt (Steinbrecher 1993).

Auf jeden Fall existiert je nach Anwendungsfall der Mustererkennung in digitalen Bildern noch eine Vielzahl weiterer Merkmale. Beispielsweise lassen sich aus dem Bereich der Zeichenerkennung (OCR- Optical Character Recognition) eine Vielzahl von Merkmalen von Buchstaben nennen: Löcher, Endungen, Kreuzungen oder achsparallele Linien.

Hough-Transformation

Das Prinzip der Hough-Transformation beschreibt eine nach P.V.C. Hough benannte Transformation und ist in einer Patentschrift von 1962 niedergelegt (Hough 1962). Diese wurde 1972 von Duda und Hart (Duda 1972) zur Erkennung von Geraden und Kurven erweitert. 1982 wurde dann von Ballard und Brown (Ballard 1982) die verallgemeinerte Hough-Transformation erweitert und zur Erkennung von Kreisen, Ellipsen usw. verwendet.

Von einem binären und skelettierten Kantenbild ordnet die Hough-Transformation jedem Kantenpunkt in diesem Binärbild die Gerade (Geradenbüschel) zu, die durch diesen Punkt laufen. Jede Gerade wird durch zwei Parameter beschrieben, beispielsweise durch den Anstieg und den Ordinatenabschnitt, oder durch den Abstand zum Ursprung und dem Winkel zur X-Achse.

Zusammenfassung

Die Vielfalt der Möglichkeiten und Verfahren zeigt, dass es kein Verfahren gibt, mit dem sich jedes Problem standardmäßig lösen lässt. Ursache ist zum einen die Aufgabenstellung, die darin besteht, eine möglichst sinnvolle Struktur in einem mehr oder weniger großen Datensatz zu finden, wobei in dem einzelnen Datensatz nicht von vornherein die Zugehörigkeit zu einer Gruppe zu erkennen ist und zum anderen die rapide steigende Anzahl der Clusteraufteilungen mit zunehmender Anzahl der Objekte. Gibt es bei einem Objekt nur eine mögliche Clusteraufteilung, sind es bei zwei Objekten schon zwei

mögliche Aufteilungen in Cluster und bei drei Objekten sind es schon fünf mögliche Clusteraufteilungen. Um die geeignetste Aufteilung zu finden sollten im Prinzip alle bestimmt werden und miteinander verglichen werden. Um den schon bei einer geringen Zahl von Objekten nicht mehr vertretbaren Aufwand zu vermeiden, wurde eine Vielzahl verschiedener Verfahren entwickelt, um möglichst eine gute Aufteilung mit wenig Aufwand zu finden. Diese arbeiten je nach Problemstellung sehr gut oder können unter Umständen nur Unsinn produzieren (Tilli 1993a).

Eine weitere Schwierigkeit ist die Suche nach der besten Aufteilung oder die Beurteilung, was die beste Aufteilung ist. Um die beste Aufteilung zu finden, ist ein Maß notwendig, mit dem die gefundene Aufteilung beurteilt werden kann. Wird zu diesem Zweck ein Ähnlichkeitsmaß definiert, so geht man davon aus, dass die Objekte, die zu einer Gruppe gehören, sich möglichst ähnlich sind (Tilli 1993a).

Dass Objekte ausschließlich zu einer Klasse gehören, davon gehen herkömmliche Cluster-Verfahren aus, ist jedoch in der Praxis im Allgemeinen eine zu starke Einschränkung, die häufig zu Problemen führt. Fuzzy-Cluster-Verfahren heben diese Einschränkungen auf, und ein Objekt kann zu unterschiedlichen Graden zu verschiedenen Klassen gehören (Tilli 1993a).

Einfache Mustererkennung für digitale Bildverarbeitungssysteme können bekannte, eingelernte Muster mit unbekanntem Mustern vergleichen. Unter Verwendung eines Distanzmaßes für das unbekannte Muster zu jedem bekannten Muster können so relativ einfach und schnell Muster erkannt werden. Treten jedoch Lage- und Winkeldifferenzen auf, sind solche Verfahren ungeeignet oder die Daten müssen vor der Erkennung äußerst aufwendig gedreht und skaliert werden. Auf jeden Fall sind Musterverfahrensverfahren sehr rechenaufwendig und selten für alle Einsatzfälle in der Bilderkennung geeignet, spätestens aber unter den hohen Anforderungen an die Verarbeitungsgeschwindigkeit in einem online- oder Echtzeitsystem ungeeignet.

In der Realität ist es nur selten möglich, irgendein Objekt eindeutig einer bestimmten Kategorie zuzuordnen. Für die Modellierung realer Gegebenheiten ist ein mathematisches Verfahren notwendig, das auch vage und ungenaue Informationen, Objekte, Konzepte usw. adäquat darstellen kann und die Zuordnung zu mehr als einer Kategorie, eventuell auch einer widersprüchlichen, erlaubt.

Bilderkennungssysteme sind sehr komplexe Aufgabenstellungen, für die zurzeit nur eingeschränkt brauchbare Verfahren existieren, die sowohl die Vielfältigkeit der Einsatzmöglichkeiten als auch Bedingungen an hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten unterstützen.

G Thematische Literaturübersicht

Thematik Bildverarbeitung:

- (Budde 1991) Rainer Budde: "Scanning und Barcode, Datenerfassung mit optischen Methoden", 1. Aufl., Wiesbaden, Wirtschaftsverlag, 1991
- (Eins 1991) S. Eins: "Quantitative und strukturelle Bildanalyse in der Medizin", 1. Aufl., München, Franzis Verlag GmbH, 1991
- (Janser 1996) Achim Janser, Wolfram Luther, Werner Otten: "Computergrafik und Bildverarbeitung", 1. Aufl., Braunschweig, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1996
- (Lenz 1989) Reimar Lenz: "Digitale Kamera mit CCD-Flächensensor und programmierbarer Auflösung von bis zu 2994x2320 Bildpunkten pro Farbkanal", in: Mustererkennung, 1. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1989
- (Lucht 1999) C. Lucht, K.-H. Franke: "Qualitätskontrolle von bedruckter, textiler Bahnenware - ausgewählte Lösungsverfahren zur Farbmusterinspektion", in: Schriftenreihe des ZBS e.V. 1/99, Illmenau, 1999

Thematik Evolutionäre Algorithmen:

- (Droste 2000) Stefan Droste: "Zu Analyse und Entwurf evolutionärer Algorithmen", in: Dissertation an der Universität Dortmund, Dortmund, 2000
- (Jansen 2000) Thomas Jansen: "Theoretische Analyse evolutionärer Algorithmen unter dem Aspekt der Optimierung in diskreten Suchräumen", in: Dissertation an der Universität Dortmund, Dortmund, 2000
- (Klein 2000) Michael Klein: "Entwurfsaerodynamische Studien an der Tragflügelkonfiguration im Hochgeschwindigkeitsbereich mit evolutionären Algorithmen", in: Dissertation an der Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen, 2000
- (Krolzik 2001) Semjon Krolzik: "Genetische Algorithmen", in: www.fachpublikation.de/dokumente/01/19/01002.html, World Wide Web, 2001
- (Rosé 1998) Helge Rosé: "Evolutionäre Strategien und Multinome Optimierung", in: Dissertation an der Humboldt Universität zu Berlin, Berlin, 1998
- (Sprave 1999) J. Sprave : "Ein einheitliches Modell für Populationsstrukturen in Evolutionären Algorithmen", in: Dissertation an der Universität Dortmund, Dortmund, 1999
- (Frost 2000) Volker Jörg Frost: "Kalibrierungsoptimierung mittels Genetischer Algorithmen - Eine Methode zur automatischen Selektion von PCR-Faktoren in der NIR-Spektrometrie", in: Dissertationsschrift an der Gerhard Mercator Universität, Duisburg, 2000

- (Goldberg 1989) D. E. Goldberg: "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley Reading, 1989
- (Michalewicz 1996) Z. Michalewicz: "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", 3. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag, 1996
- (Schwefel 1968) H.-P. Schwefel: "Projekt MHD-Staustrahlrohr: Experimentelle Optimierung einer Zweiphasendüse", in: Teil 1 Technischer Bericht 11.034/68, 35, AEG Forschungsinstitut, Berlin, 1968
- (Schwefel 1975) H.-P. Schwefel: "Evolutionsstrategie und numerische Optimierung", in: Dissertationsschrift an der Technischen Universität Berlin, 1975
- (Schwefel 1981) H.-P. Schwefel: "Numerical optimization of computer models", Chichester, John Wiley & Sohn, 1981

Thematik Fuzzy Logic:

- (Aliev 1994) R. Aliev, K.W. Bonfig, F. Aliev: "Messen, Steuern und Regeln mit Fuzzy-Logik", München, Franzis Verlag GmbH, 1994
- (Altrock 1993) Constantin v. Altrock: "Fuzzy Logic", München, R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1993
- (Bonfig 1992) Karl Walter Bonfig und 7 Mitautoren: "Fuzzy Logik in der industriellen Automatisierung", Ehningen bei Böblingen, expert Verlag, 1992
- (Friedrich 1997) A. Friedrich: "Logik und Fuzzy-Logik - eine leichtverständliche Einführung mit Beispielen aus Technik und Wirtschaft", Renningen-Malmsheim, expert Verlag, 1997
- (Grauel 1995) Adolf Grauel: "Fuzzy Logik - Einführung in die Grundlagen mit Anwendungen", 1. Aufl., Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1995
- (Herzog 2002) Christof Herzog: "Das Methodenpaket IeMAX mit dem Fuzzy-Simulationsmodell FLUCS", in: Dissertation an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, 2002
- (Koller 1999) Andreas Koller: "Hybride Wissensverarbeitung in der präventivmedizinischen Diagnostik", in: Dissertation an der Universität-GH Paderborn, Paderborn, 1999
- (Kruse 1993) Rudolf Kruse, Jörg Gebhardt, Frank Klawonn: "Fuzzy-Systeme", Stuttgart, Teubner, 1993
- (Mayer 1993) Andreas Mayer, Bernhard Mechler, Andreas Schlindwein, Rainer Wolke: "Fuzzy Logic", Bonn, Paris, Addison Wesley, 1993
- (Schröder 1996) Boris Schröder: "Fuzzy-Logik und klassische Statistik - Habitateignungsmodelle für *Cnocephalus dorsalis*", in: Diplomarbeit an der TU Braunschweig, Braunschweig, 1996

- (Schulte 1993) H. Schulte: "Einführung in Fuzzy Logik", München, Franzis Verlag GmbH, 1993
- (Tilli 1993a) T. Tilli: "Mustererkennung mit Fuzzy-Logik - Analysieren, klassifizieren, erkennen und diagnostizieren", München, Franzis Verlag GmbH, 1993
- (Tilli 1993b) T. Tilli: "Fuzzy-Logik", 3. Aufl., München, Franzis Verlag GmbH, 1993
- (Tilli 1993c) T. Tilli: "Automatisieren mit Fuzzy-Logik", 2. Aufl., München, Franzis Verlag GmbH, 1993
- (Tilli 1993d) T. Tilli: "Fuzzy-Shell für Windows", München, Franzis Verlag GmbH, 1993
- (Zacher 2000) Serge Zacher: "Automatisierungstechnik", Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg Verlag, 2000
- (Zimmermann 1993) H.-J. Zimmermann(Hrsg.), J. Angstenberger, K. Lieven, R. Weber: "Fuzzy Technologien - Prinzipien, Werkzeuge, Potenziale", Düsseldorf, VDI-Verlag, 1993

Thematik Neuronale Netze:

- (Fausett 1994) L. Fausett: "Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications", Engelwood Cliffs, Prentice-Hall, 1994
- (Kinzel 2001) Heiko Kinzel: "Stereobild-Auswertung durch neuronale Netze zum überwachten Einlegen von deformierbaren linearen Objekten", in: Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2001
- (Kratzer 1990) K.P. Kratzer: "Neuronale Netze - Grundlagen und Anwendungen", München, Wien, Carl Hanser Verlag, 1990
- (Kursawe 1998) Patrick Kursawe: "Anwendung multivarianter Methoden und künstlicher neuronaler Netze zur Klassifizierung von Spirituosen mittels Headspace. GC/MS-Kopplung", in: Diplomarbeit an der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1998
- (Rehkugler 1994) H. Rehkugler, H.G. Zimmermann: "Neuronale Netze in der Ökonomie. Grundlagen finanzwirtschaftlicher Anwendungen", München, Vahlen, 1994
- (Rieger) A. Rieger: "Neuronale Netzwerke", in: LS-8 Report 2 der Universität Dortmund, Dortmund, kein Jahr
- (Rigoll 1994) Gerhard Rigoll: "Neuronale Netze", Renningen-Malmsheim, expert Verlag, 1994
- (Selle 1998) Stefan Selle: "Einsatz Künstlicher Neuronaler Netze auf dem Aktienmarkt", in: Diplomarbeit an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Heidelberg, 1998
- (Sturm 2000) Michael Sturm: "Neuronale Netze zur Modellbildung in der Regelungstechnik", in: Dissertation an der TU München, München, 2000

- (Tagscherer 2000) M. Tagscherer: "Dynamische Neuronale Netzarchitektur für Kontinuierliches Lernen", in: Dissertation an TU Chemnitz, Chemnitz, 2000
- (Zakharian 1998) S. Zakharian, P. Ladewig-Riebler, S. Thoer: "Neuronale Netze für Ingenieure", Braunschweig, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1998
- (Zell 1996) A. Zell: "Simulation Neuronaler Netze", Berlin, Addison Wesley, 1996

Thematik Expertensysteme und Lernverfahren:

- (Beierle 2000) Christoph Beierle, Gabriele Kern-Isberner: "Methoden wissenbasierter Systeme", Braunschweig, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2000
- (Keller 2000) Hubert B. Keller: "Maschinelle Intelligenz", Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg Verlag, 2000
- (Stucky 1993) W. Stucky (Hrsg.), Reinhard Richter, Peter Sander, Wolfried Stucky: "Problem- Algorithmus- Programm, Grundkurs angewandte Informatik II", 1. Aufl., Stuttgart, Teubner, 1993
- (Diederich) Joachim Diederich: "Konstruktives Konnektionistisches Lernen", in: Dissertation an der Universität Hamburg, Hamburg, kein Jahr
- (Lindner 1994) G. Lindner, U. Roberts: "Experimentelle Analyse zweier logik-basierter Lernverfahren", in: LS-8 Report 6 der Universität Dortmund, Dortmund, 1994