

# Einsatz von Fuzzy-Klassifikation und Farbreduktion zur Farbbildverarbeitung im Entwicklungssystem Cassandra<sup>®</sup>

J. Richardt (GFal e.V.), C. Gruner (Aglaia GmbH), G. Pankratz (Imtronic GmbH), H. Winter (Aglaia GmbH)

## 1. Ausgangssituation

Häufig steht die Bildanalyse vor der Aufgabe, dass Bildobjekte anhand ihrer Farbe erkannt werden sollen. Ein typisches Problem ist dabei, dass die Farbe, die eine Sorte von Bildobjekten charakterisiert, nicht genau, sondern nur unscharf definiert werden kann. Dies gilt insbesondere bei Bildinhalten aus der Materialanalyse oder Biologie (z. B. Bakterienkulturen in Mikroskopbildern). Hierbei schwankt die Farbe eines Objekttypes innerhalb eines Bildes und auch beim Übergang von Bild zu Bild kann nicht vorausgesetzt werden, dass die Farbe eines Objekttypes konstant bleibt.

Die Unschärfe der Farbdefinition stellt also eine Schwierigkeit dar, die bei der automatischen Erkennung der Bildobjekte anhand ihrer Farbe zu bewältigen ist. Um mit Problemen dieser Art umzugehen, eignen sich die Fuzzy-Methoden, die in diesem Beitrag vorgestellt werden. Dabei sind zwei miteinander verbundene Teilschritte zu unterscheiden: Erstens geht es um eine Analyse der im konkreten Bild vorhandenen Farben bzw. Farbnuancierungen, zweitens sind diese Farben so zu Gruppen zusammenzufassen, dass in einer Gruppe die Farben vertreten sind, die einem bestimmten Objekttyp entsprechen.

## 2. FCM-Algorithmus zur Defuzzifizierung der Bildfarben

Der Fuzzy-C-Means-Algorithmus (FCM) entstammt der Fuzzy-Clusteranalyse und ist dort eines der bekanntesten Verfahren [1]. Mit ihm detektiert man Cluster auf Basis von gegebenen Merkmalsvektoren eines beliebigen Datentyps und einer beliebigen Dimension. Um alle Datentypen und Dimensionen abzudecken, wurde der FCM als C++-Template implementiert. Zur Anwendung auf die Farbbildverarbeitung wurden diese Templates spezialisiert (instanziiert) auf die hierbei wichtigsten Daten:

- die dreidimensionalen RGB-Vektoren eines True-Color- oder Palettenbildes und
- die eindimensionalen Intensitätswerte eines Intensitätsbildes. Grauwertbilder werden also als Sonderfall eines Farbbildes mit behandelt.

Die Cluster, die der FCM bildet stellen dabei dann Farbklassen dar, wobei eine Farbklass eine Menge ähnlicher RGB-Vektoren umfasst. Charakteristisch für den FCM ist es, die Merkmalsvektoren (im konkreten Fall die RGB-Vektoren) einer Klassen durch den mittleren Vektor dieser Klasse zu repräsentieren. In Formeln ergibt sich dieser Mittelpunktvektor  $m(k)$  einer Klasse  $k$  (Repräsentant der Klasse  $k$ ) ausgehend von den Merkmalsvektoren  $v(i)$  und den Zugehörigkeitswerten  $z(i,k)$  der Vektoren  $i$  zur Klasse  $k$  wie folgt:

$$m(k) = \frac{\sum_i z(i,k) \cdot v(i)}{\sum_i z(i,k)}$$

Die Zugehörigkeitswerte  $z(i,k)$  resultieren dabei aus dem Abstand des konkreten Merkmalsvektors  $v(i)$  vom Klassenmittelpunkt  $m(k)$ . Je näher der Vektor  $v(i)$  am Klassenmittelpunkt  $m(k)$  liegt, desto höher wird der Zugehörigkeitswert  $z(i,k)$  sein. Für dessen konkrete Berechnung kommen mehrere mathematische Formalismen in Frage [2][3]. Die Fuzziness dieser graduierten Zugehörigkeitswerte lässt sich dabei steuern. Auch eindeutige Zugehörigkeiten (in dem Fall nehmen die Zugehörigkeiten  $z(i,k)$  nur die Werte 0 und 1 an) können bei Bedarf erzwungen werden.

Die Anwendung des FCM führt zu zwei Ergebnissen. Erstens werden die im konkreten Farbbild vorhandenen Farbklassen detektiert. Zweitens lässt sich das Farbbild entsprechend der gebildeten Farbklassen transformieren, wobei eine Farbreduktion entsteht. Hierzu wird der Farbvektor  $v(i)$  eines Pixels ersetzt durch die mittlere Farbe der zugeordneten Farbklassen. Die Farbtransformation wird entsprechend folgender Formel ausgeführt:

$$V(i) = \sum_k m(k) \cdot z(i,k)$$

Dabei bezeichnet  $V(i)$  die neue Farbe eines Pixels, das im Ursprungsbild mit dem (alten) Farbvektor  $v(i)$  auftrat und diesem entsprechend die Zugehörigkeiten  $z(i,k)$  zu den Farbklassen  $k$  erhielt.

Sobald diese Zugehörigkeiten eindeutig sind, stellt die neue Farbe  $V(i)$  eine Auswahl aus den Mittelwerts-Farben  $m(k)$  der Farbklassen dar. In diesem Fall liegt eine Farbreduktion vor, wobei alle ursprüngliche Farben im Bild in eine der Mittelwerts-Farben  $m(k)$  der Farbklassen umgewandelt werden. Die Abbildungen 1-3 geben eine anschauliche Vorstellung von der erzielten Farbreduktion.

Bei der Farbreduktion wird die Vielfalt aller Farben des Bildes reduziert auf eine kleine Anzahl typischer Farben. Dieser Schritt kann als eine Defuzzifizierung der Bildfarben aufgefasst werden. Die klassische Binarisierung stellt sich als Spezialfall dar, bei dem die Bildfarben auf nur zwei Farben reduziert werden. Wie auch die Binarisierung kann man die Farbreduktion als ein Bildverarbeitungsschritt nutzen, der im Rahmen einer umfassenderen Bildverarbeitungsaufgabe zum Einsatz kommt.

Eine typische Anwendung besteht darin, mit Hilfe der Defuzzifizierung der Bildfarben klare, scharf definierte Objektkonturen zu erhalten. Dies ist ein nützlicher Schritt, wenn im Bildmaterial Objekte zu detektieren sind, deren Grenzen sich durch einen sehr unscharfen Farbverlauf auszeichnen (Beispiele treten in mikrobiologischem Bildmaterial auf), so daß ohne Vorverarbeitung der Bildfarbe scharfe Konturen nicht erkennbar sind.

Bei unserer Zielstellung, die Bildobjekte anhand ihrer Farbe zu erkennen, zeigte sich in verschiedenen Anwendungen, dass die mit dem FCM detektierten Farbklassen zwar eine gute Analyse der im Bild vorhandenen Farben darstellen, diese Farbklassen aber noch nicht mit der Objektfarbe identisch sind. Häufig setzt sich die Objektfarbe aus einer Gruppe von Farbklassen zusammen. Das heißt, eine in sich nicht homogene Objektfarbe ist sozusagen eine Vereinigung verschiedener Farbtöne. Im Rahmen des RGB-Farbraumes bedeutet dieses Modell, dass eine Objektfarbe repräsentiert wird durch mehrere Farbmuster, die eine Punktwolke im RGB-Raum bilden.

### 3. Zuordnung der detektierten Bildfarben zur Objektfarbe

Aus dem genannten Grund wurde neben der Detektion der Farbklassen mit dem FCM-Verfahren ein zweiter Bearbeitungsschritt eingeführt, dessen Aufgabe es ist, Farbklassen zusammenzufassen, indem mehrere Farbklassen (z. B. mehrere Rot- und Braun-Töne) auf eine Objektklasse abgebildet werden. Durch dieses Herangehen besteht die Möglichkeit, im Rahmen des FCM-Verfahrens hinreichend viele Farbtöne zu detektieren, die danach erst den Bildobjekten zugeordnet werden. In Anwendungsfällen, wo von Natur aus sehr viele Farbtöne vorliegen, kam es oft erst durch die Detektion vieler Farbtöne zu guten Resultaten. Das Zusammenfassen mehrerer Farbklassen zu einer Objektfarbe bedeutet, dass im RGB-Raum ein komplizierteres Modell für die Objektfarbe möglich wird. Dies besteht aus einer Art Punktwolke, die durch mehrere Muster-Vektoren des FCM-Verfahrens beschrieben wird.

Für jeden anhand von Farbe zu erkennenden Objekttyp wurde eine Label  $o$  eingeführt (was das Label bedeutet und welchen Zahlenwert im Bereich  $0 \dots 255$  es annimmt, entscheidet der Endnutzer), so daß die in diesem Bearbeitungsschritt auszuführende Zuordnung sich wie folgt notieren läßt

$$o = \text{label}(m(k))$$

wobei die Farben  $m(k)$  die im FCM-Verfahren detektierten Farbtöne sind.

Das Klassifikationskriterium für die Zuordnung eines beliebigen Farbvektors  $v(i)$  zu einer Objektklasse  $o$  ergibt sich dann als minimale Distanz zwischen dem Farbvektor  $v(i)$  und irgendeiner Muster-Farbe  $m(k)$ , die dem Objekt  $o$  zugeordnet ist:

$$\text{distance}(v(i), o) = \text{MIN} \{ \text{distance}(v(i), m(k)) \mid \text{MIN über alle } k \text{ mit } o = \text{label}(m(k)) \}$$

Wie die Zuordnung  $o = \text{label}(m(k))$  von Farbe zu Objekt zustande kommt, ist eine diffizile Frage, die sehr viele Möglichkeiten zuläßt. Einerseits handelt es sich hierbei um ein Partitionierungsproblem, das sich mit den Methoden des Simulated Annealing lösen läßt. Andererseits können aber rein mathematisch definierte Optimierungsziele nicht genügen, um zu definieren, was eine sinnvolle Gruppierung der Farben darstellt. Daher wurde die interaktive Zusammenstellung der Farben, die einem Objekttyp zuzuordnen sind, die in der Praxis wichtigste Methode. Es handelt sich hierbei um einen Anlernprozeß, in dem der Endnutzer seine Objektfarben so definiert, wie sie für einen konkreten Anwendungsfall typisch sind. Nach Beendigung eines solchen interaktiven Anlernens der Objektfarben werden die vom Nutzer festgelegten Farben und deren Zuordnung zu den Objektklassen in einer Farbdefinitionsdatei gespeichert. Diese Datei wird danach in der Arbeitsphase zur Initialisierung des FCM-Verfahrens und zur Zuordnung von Pixelfarbe zu Objektfarbe genutzt.

Sowohl die Lern- als auch die Arbeitsphase lassen sich robuster gestalten durch Einbeziehung von Nähe- bzw. Distanzbewertungen im Farbraum und auch im Ortsraum. Die Nähe zwischen Farben werden mathematisch mit einer Similarity-Matrix modelliert; darauf läßt sich das Verfahren des Deterministic Annealing (eine Version des Simulated Annealing) anwenden, um eine Gruppierung der Farbklassen automatisch zu erreichen bzw. um mit diesem Verfahren die Trainingsphase intelligenter zu gestalten.

### 4. Softwaretechnische Implementierung auf Basis von Cassandra<sup>®</sup>

Bei der Implementierung der genannten Verfahren im Rahmen des Systems Cassandra<sup>®</sup> der Aglaia GmbH wurde Wert gelegt auf eine möglichst hohe Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten, wozu unter anderem auch eine hohe softwaretechnische Portierbarkeit gehört. So existiert auch eine Einbeziehung der beschriebenen Verfahren im Rahmen des Systems ImageC<sup>®</sup> der IMTRONIC GmbH. Zum Zuge kamen hierbei soft-

Systems ImageC<sup>®</sup> der IMTRONIC GmbH. Zum Zuge kamen hierbei softwaretechnische Möglichkeiten, die im Rahmen von Cassandra verfügbar sind:

- Durch Techniken der ereignisgesteuerten Programmierung ließ sich die GUI-Arbeit mit nichtmodalen Dialogen gestalten, wobei dem Endanwender keine Serien festdefinierter Kommandos aufgezwungen werden, sondern das Programm reagiert auch in der Lernphase ereignisabhängig mit einem automatischen Updaten von Einstellungen und Visualisierungen, die abhängig vom konkreten Ereignis eine logische Folge darstellen. Aktionen wie Änderung der Trennschärfe, interaktives Löschen oder Hinzufügen von Farbklassen, Veränderung der maximalen Klassenanzahl sowie Auswahl einer anderen Farbdefinitionsdatei führen unmittelbar zu einer erneuten Abarbeitung des FCM-Algorithmus und der Aktualisierung des farbreduzierten Bildes, des Objektklassenbildes und der Zuordnungstabelle.
- Die Techniken der ereignisgesteuerten Programmierung erlauben eine zeitsynchrone Verarbeitung von Bewegtbildern.
- Durch die Entwicklung von portierbaren Schnittstellen zur Übergabe von Kommandos (nur unter anderem Menü-Kommandos) wurde es möglich, die beschriebenen Schritte der Farbbildverarbeitung in verschiedenartigen Anwendungen als ein Teilschritt unter anderen einzufügen.
- Die Kommandos und damit verbundene Steuerdaten erlauben auch die Ausführung der Arbeitsphase durch Makroaufrufe aus einem fremden Anwendungssystem heraus.
- Durch die Technik der Cassandra<sup>®</sup>-Attribute wurde eine hohe Persistenz von Einstellungen der Workbench erreicht, so dass der Anwender beim Beginn einer neuen Sitzung das Programm in dem Zustand wiederfindet, wie er es bei der letzten Benutzung verlassen hat.

## 5. Anwendungsbeispiele

Grundsätzlich ist festzustellen, dass das beschriebene Farbklassifikationsverfahren ein relativ allgemeines Verfahren darstellt, für das verschiedenartige Anwendungen in Frage kommen. Eine Eignung liegt meist dann vor, wenn die Defuzzifizierung von Objektfarben wichtig ist, die einen sehr unscharfen Farbverlauf haben bzw. bei denen sich die Objektfarbe aus verschiedenen Farbtönen zusammensetzt.

In der Aglaia GmbH wird das Verfahren im Bereich der Lebensmittelhygiene eingesetzt. Die Bilder 1, 2 und 3 zeigen Fleischproben auf einem Agar zum Nachweis von Salmonellen. Die Bilder 4, 5 und 6 sind das Ergebnis von einer Farbreduktion auf 12 Farbklassen und deren Zuordnung zu vier in Falschfarbendarstellung wiedergegebenen Objektklassen auf Basis einer einheitlichen Farbdefinitionsdatei. Das Größenverhältnis der beiden grauen Objektklassen zur roten Fleischprobe lässt eine Klassifikation in "unverdächtig", "Verdacht auf Salmonelle" und "Schwerer Verdacht auf Salmonellen" zu.

Die Anwendungen im Rahmen der IMTRONIC GmbH betreffen rechnergestützte Auswertungs- und Überwachungsprozesse in der Materialanalyse. So werden bei der Untersuchung von Materialschliffen zur Bestimmung von Korngrößen und Phasenanteilen auch farbliche Unterscheidungsmerkmale herangezogen.

Bild 7 zeigt ein Duplexgefüge. Das kontinuierliche Farbspektrum wurde mit Hilfe der Fuzzy-Farbreduktion auf 11 Farben reduziert (Bild 8). Durch die anschließende Zuordnung der Farben zu den beiden Phasen entstand ein für die Vermessung der Flächenanteile geeignetes Binärbild (Bild 9).

Die Kornbildung in einem einphasigen Gefüge wurde durch polarisiertes Licht farbig sichtbar gemacht (Bild 10). Die Größenverteilung der farblich verschiedenen erscheinenden Körner erlaubt Rückschlüsse auf das Materialverhalten. Das kontinuierliche Farbspektrum wurde mittels Fuzzy-Farbreduktion auf 14 Farben reduziert (Bild 11), die dann 9 Kornklassen zugeordnet wurden (Bild 12).

## **6. Literatur:**

- [1] J. C. Bezdek, S. K. Pal (eds.): Fuzzy Models for Pattern Recognition. IEEE Press, New York, 1992.
- [2] Richardt, J.; Nicklisch-Franken, J.; Klette, R.: A Generalized Fuzzy C-Means Algorithm with Applications to Contrast Modification and Binarization of Images. Computers and AI 15, 1996, 483-507.
- [3] Richardt, J.; Karl, F.; Müller: Connections between Fuzzy Theory, Simulated Annealing, and Convex Duality. Fuzzy Sets and Systems 96, 1998, 307-334.

## Bildbeispiel für die Farbreduktion



### Farbbild im Original

Die RGB-Vektoren der Pixel wurden als Input-Merkmale mit dem FCM-Verfahren bearbeitet.



### Reduktion auf 5 Farben

Das hier gezeigte Bild entstand beim Bilden von 5 Farbklassen. Dabei erfolgt eine Zuordnung eines jeden RGB-Farbvektors zu einer der 5 Farbklassen. Nebenstehendes Bild zeigt pro Pixel die mittlere Farbe der zugeordneten Farbklasse.



### Reduktion auf 13 Farben

Das hier gezeigte Bild entstand beim Bilden von 13 Farbklassen. Trotz der drastischen Reduktion der Farbzahl besteht bereits eine hohe Ähnlichkeit zum Originalbild.



### Zuordnung der 13 Farben

Dieses Bild entstand beim Zuordnen der 13 Farbklassen des vorigen Bildes zu 5 Gruppen. Dabei wird jede Gruppe durch ein Label repräsentiert. Pro Label wird die mittlere Farbe angezeigt.

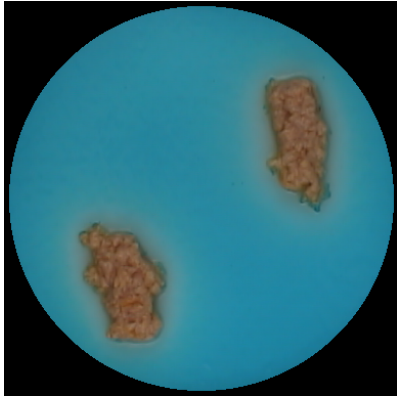


Bild 1

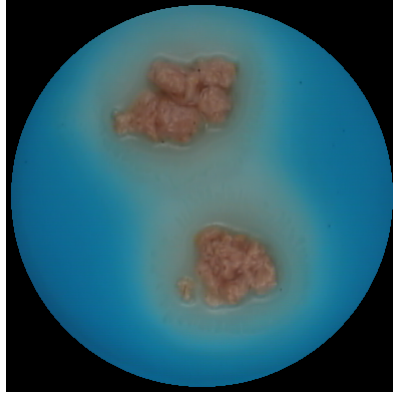


Bild 2

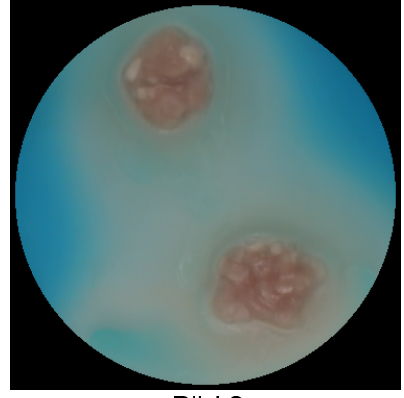


Bild 3

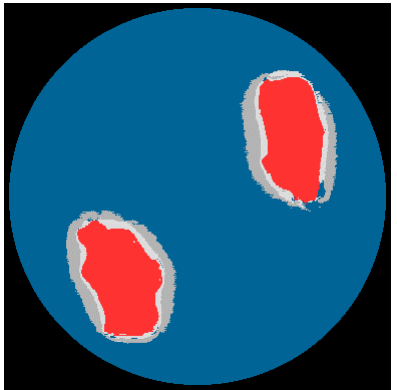


Bild 4

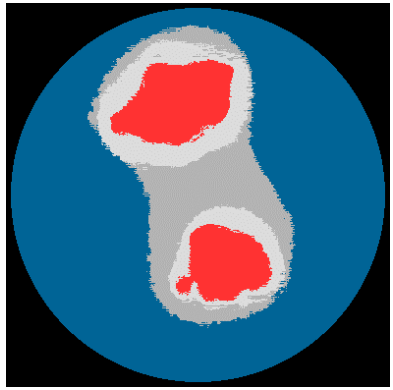


Bild 5

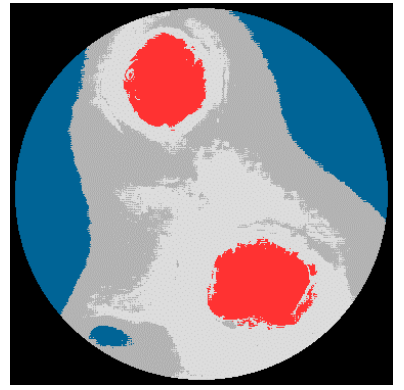


Bild 6

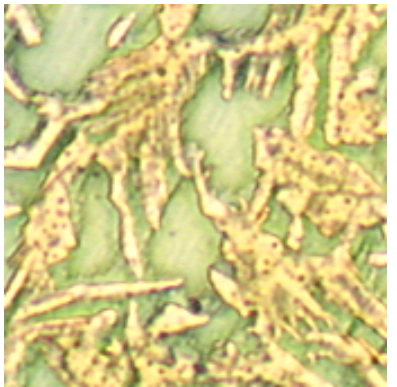


Bild 7

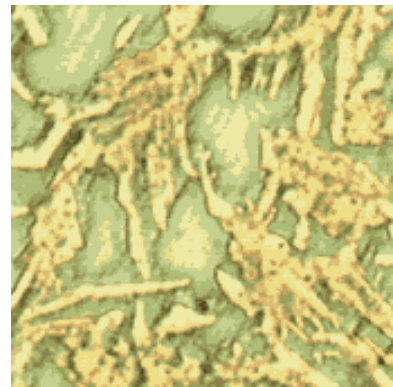


Bild 8

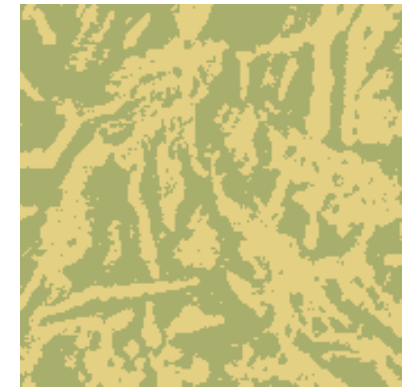


Bild 9

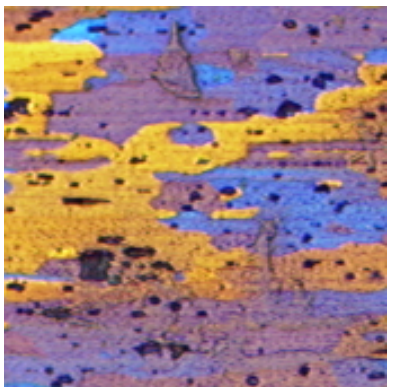


Bild 10

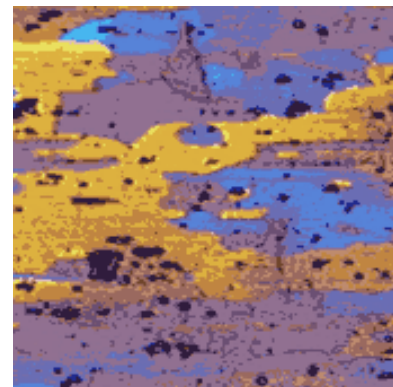


Bild 11

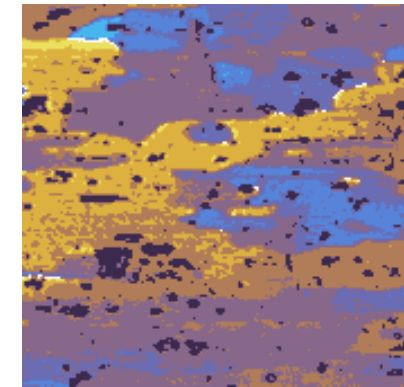


Bild 12