

# Robustes histogrammbasiertes Farbmatching

Dirk Balthasar,  
Volker Rehrmann  
Universität Koblenz-Landau, Abteilung Koblenz  
Rheinau 1  
D 56075 Koblenz  
e-Mail: {duck, volker}@uni-koblenz.de  
URL: <http://www.uni-koblenz.de/~lb>

## 1 Einleitung

Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit welchem Farbbilder schnell und robust gematched werden können. Das Verfahren läßt sich in die Gruppe der histogrammbasierten Matchingverfahren einordnen.

Das Verfahren setzt auf segmentierten Objekten auf, kann jedoch prinzipiell auch auf unsegmentierte Bilder angewendet werden. Durch Verwendung des HSV-Farbraumes ist es robust gegen Änderungen der Beleuchtungsintensität [4] und bedingt durch den Matchingalgorithmus gegen leichte Schwankungen in der Farbtemperatur der Beleuchtung.

Wie bei allen histogrammbasierten Verfahren wirken sich moderate Teilverdeckungen und 3D Rotationen von Objekten nur leicht auf die Qualität der Matchergebnisse aus. Gegen 2D<sup>1</sup>- Rotationen von Objekten ist das Verfahren invariant.

Durch eine extreme Datenreduktion der zugrundeliegenden Farbbilder auf wenige Merkmale, die aus Histogrammen extrahiert werden, ist das Matchingverfahren extrem schnell, ohne etwa an Matchingqualität im Vergleich zu *Histogram Intersection (HI)* von Ballard und Swain [5] einzubüßen. Die Merkmale beschreiben die farbliche Zusammensetzung und die Grauwertverteilung der Objekte, wie z.B. ein Objekt besteht zu 30% aus roten, zu 60% aus blauen und 10% aus hellgrauen Punkten. Auf die Einteilung des Farbraumes in statische "Farbbehälter"<sup>2</sup> wird in diesem Verfahren verzichtet. Dadurch werden Effekte vermieden, die aus dem Überspringen einzelner Bildpunkte von einem Farbbehälter in einen anderen resultieren, bei verschiedenen Aufnahmen eines Objektes.

In der Praxis wird das Verfahren erfolgreich zum Wiedererkennen von Objekten in der automatischen, sortenreinen Wertstoffsortierung im VisionSort-System<sup>3</sup> eingesetzt.

Das Verfahren gliedert sich in zwei Stufen: In Kapitel 2 wird beschrieben, wie aus den Bildern der Objekte Farbwinkel- und Grauwertistogramme berechnet werden. Aus den Histogrammen werden Merkmale extrahiert, die in einer Tupelschreibweise kompakt notiert werden und die Informationen über die Farb- und Grauwertzusammensetzung des Objekts beinhalten. In Kapitel 3 wird eine Matchingfunktion vorgestellt, die auf den zuvor extrahierten Merkmalen arbeitet. In Kapitel 4 werden Matchergebnisse auf Swains Bilddatenbank präsentiert.

## 2 Berechnung der Objektmerkmale

### 2.1 Vorverarbeitung

Eingabe für das Verfahren ist das Farbbild eines Objektes im RGB-Farbraum. Zunächst werden alle Bildpunkte, die zu dem Objekt gehören, in den HSV-Farbraum umgerechnet<sup>4</sup>. Im HSV-Farbraum wird ein Bildpunkt durch ein Tripel (h,s,v) repräsentiert, wobei h der Farbwinkel (hue), s die

---

<sup>1</sup>Nur um eine Achse, welche die Kamera schneidet.

<sup>2</sup>Bei Swain: Bins

<sup>3</sup>Siehe: <http://www.real-vision-systems.de>

<sup>4</sup>Umrechnung siehe [4]

Sättigung (saturation) und  $v$  die Helligkeit (value) ist.

Da der HSV-Farbraum eine Singularität an der V-Achse besitzt, d.h. Bildpunkte mit wenig Sättigung bzw. Helligkeit haben einen unzuverlässigen Farbwinkel, wird das Bild in einen bunten und einen unbunten Bereich aufgespalten. Um zu entscheiden, ob ein Bildpunkt bunt oder unbunt ist, wird ein Schwellwertgebirge verwendet, welches in Abhängigkeit von der Sättigung und der Helligkeit eines Bildpunktes im HSV-Farbraum einen Wert für die Buntheit des Punktes liefert. Null bedeutet der Bildpunkt ist unbunt. Bunte Bildpunkte erkennt man an Werten über Null.

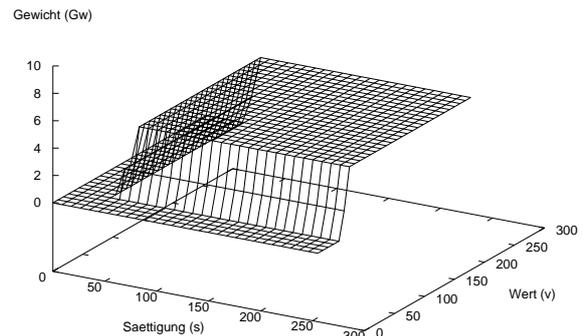


Abbildung 1: "Buntheit" eines Bildpunktes

Von dem bunten Bereich wird der Farbwinkel jedes Bildpunktes in ein gewichtetes Farbwinkelhistogramm eingetragen<sup>5</sup>. Die Gewichtung eines Bildpunktes im Histogramm hängt von seiner Sättigung und seiner Helligkeit ab. Bildpunkte mit hoher Sättigung und hoher Helligkeit erhalten ein hohes Gewicht, Bildpunkte mit geringer Sättigung und geringer Helligkeit erhalten ein niedriges Gewicht. Dadurch wird das Farbwinkelhistogramm stark durch Bildpunkte mit hoher Sättigung und hohem Wert geprägt, welche in bezug auf ihren Farbwinkel äußerst stabil sind, wenn man sie über mehrere Bildaufnahmen mit variierenden Beleuchtungsintensitäten betrachtet. Die Gewichtung dient zusätzlich dazu, das Springen von Punkten zwischen "Bunt" und "Unbunt" aufgrund eines festen Schwellwertes zu vermeiden. Da in das Farbwinkelhistogramm nur die Buntheit eines Bildpunktes als Gewichtung eingeht, geht die Information über die genaue Sättigung und Helligkeit der Bildpunkte eines Objektes an dieser Stelle verloren.

Um nicht die Information aus unbunten Bildbereichen zu verlieren, wird bei unbunten Bildpunkten der Grauwert, der sich aus dem Mittelwert der drei Kanäle (R,G,B) ergibt, in einem Grauerthistogramm eingetragen. Das Grauerthistogramm ist anfällig gegen Beleuchtungsintensitätsänderungen. Dieses Problem wird später im Matching durch eine höhere Toleranz gemildert. Die so berechneten Farbwinkel- und Grauerthistogramme werden im nächsten Schritt zunächst geglättet, da sie häufig extrem "ausgefranst" erscheinen und für eine Clusterung nicht gut geeignet sind. Um beim Farbwinkelhistogramm feine Strukturen möglichst zu erhalten, wird es mit einem relativ kleinen Gaußfilter<sup>6</sup> geglättet. Im Grauerthistogramm sind eher die groben Strukturen von Interesse. Daher wird dieses mit einem großen, dafür aber sehr effizient berechenbaren Mittelwertfilter<sup>7</sup> geglättet.

## 2.2 Histogrammclustering

Aus dem geglätteten Farbwinkel- und Grauerthistogramm wird nun die relevante Information über die farbliche Zusammensetzung und die Zusammensetzung der Grauwerte extrahiert. Ziel ist es, eine wie oben skizzierte Beschreibung der Objekte zu erhalten. Etwa: "Das Objekt besteht zu 30% aus roten, zu 60% aus blauen und 10% aus hellgrauen Punkten." Hierfür werden die geglätteten Histogramme geclustert. Die Clusterung ergibt sich dynamisch aus den Daten, die in den Histogrammen enthalten sind. Es wird keine statische Einteilung vorgegeben. Dadurch können keine Werte von einem Behälter in einen anderen überspringen, wie es bei Swain der Fall sein kann. Ein weiterer Vorteil gegenüber einer statischen Einteilung besteht darin, daß dicht beieinander liegende Maxima differenziert betrachtet werden können. Sie fallen nicht, wie bei Swain möglich, in einen Farbbehälter.

<sup>5</sup>vgl. auch Farbabbildung 1,2

<sup>6</sup>Filtergröße 9 liefert gute Ergebnisse

<sup>7</sup>Filtergröße 20

Für die Histogrammclustering wurde ein Verfahren entwickelt, welches durch das "Graph-theoretical clustering" von J. Matas [3] motiviert ist.

Die Grundidee ist, daß jeder Wert im Histogramm auf den Nachbarn zeigt, der in einer vorgegebenen Nachbarschaft am größten ist. Lokale Maxima sind dann Werte, die größer als Null sind und auf sich selbst zeigen. Liegen mehrere lokale "Maxima" unmittelbar nebeneinander, so wird der am weitesten "links"<sup>8</sup> liegende Wert als Maximum angenommen.

An der Position des Maximums läßt sich die Farbe bzw. der Grauwert ablesen.

Eine wichtiges Merkmal eines Maximums ist zusätzlich die Fläche, die zu ihm gehört. Diese wird ebenfalls über die "größter Nachbar" Relation definiert: Alle Werte, die direkt oder indirekt auf ein Maximum zeigen, gehören zu diesem. Die Fläche eines Maximums ist also die Summe aller Werte, die als größten Nachbarn direkt oder indirekt das Maximum haben.

Der Algorithmus hat linearen Aufwand und ist im Ergebnis nur von einem einzigen Parameter, nämlich der Größe der Nachbarschaft, abhängig. Sie bestimmt, ob eher mit einem globalen Fokus oder mit einer sehr lokalen Sichtweise geclustert wird. So erhält man bei einer kleinen Nachbarschaft viele lokale Maxima, bei einer größeren Nachbarschaft wenige lokale Maxima.

Bei der Nachbarschaftsbeziehung ist noch zu beachten, daß bei Histogrammen über den Farbwinkel die kleinste und die größte Position im Histogramm benachbart sind, bei Grauerthistogrammen jedoch nicht.

Wendet man die Histogrammclustering auf das Farbwinkel- und Grauerthistogramm an, so erhält man jeweils eine Menge lokaler Maxima und die dazugehörige Fläche. Diese Werte kann man als zwei Tupelmengen ( $TS^9$ ) in folgender Form notieren:

$$TS_{\{hue, grey\}} = \{(Max_1, Pixel_1), \dots, (Max_n, Pixel_n)\} \quad (1)$$

In den Tupelmengen sind die gesuchten Objektmerkmale kompakt enthalten.

### 3 Matching von Objektmerkmalen zweier Objekte

Gegeben sind nun die Objektmerkmale zweier Objekte  $O_1$  und  $O_2$  mit  $TS_{hue}[1], TS_{grey}[1]$  und  $TS_{hue}[2], TS_{grey}[2]$ . Gesucht ist eine Matchingfunktion  $M$ , die aufgrund der Objektmerkmale entscheidet, ob sich die Objekte ähnlich sind oder nicht:

$$M(TS_{hue}[1], TS_{grey}[1], TS_{hue}[2], TS_{grey}[2]) \mapsto [0..1] \quad (2)$$

Als erster Schritt wird eine Abstandsfunktion  $TupelDistance(...) \mapsto [0..1]$  auf Tupeln definiert. Sie liefert zu zwei Tupeln einen Wert nahe 0, falls die Tupel nah beieinander liegen und den Wert 1, wenn die Tupel maximal voneinander entfernt sind. Hierbei geht sowohl der Abstand in der Histogrammposition als auch der Abstand in der Fläche ein, die zu dem lokalen Maximum

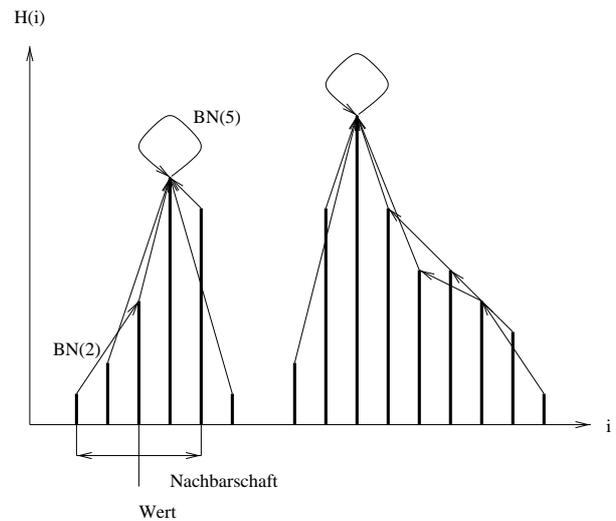


Abbildung 2: Berechnung lokaler Maxima

<sup>8</sup>also der Wert mit dem kleinsten Histogramm-Index

<sup>9</sup>TS: Tupel Set

gehört. Von beiden Tupeln wird die Position<sup>10</sup> und die Fläche<sup>11</sup> auf einen Wert zwischen 0 und 1 normiert. Zwischen den normierten Tupeln wird der euklidische Abstand berechnet. Dabei wird noch ein Faktor (PW<sup>12</sup>), der das Gewicht der Positionsdifferenzen steuert, eingerechnet. Ist PW hoch, so lassen schon kleine Positionsdifferenzen den Abstand zweier Tupel stark ansteigen. Die Abstandsfunktion für Farbtupel wird zusätzlich noch derart modifiziert, daß die kleinste und die größte Position im Farbwinkelhistogramm benachbart sind.

Durch die Abstandsfunktion zwischen zwei Tupeln wird es möglich, zu einem gegebenen Tupel aus der einen Tupelmenge das Tupel mit geringstem Abstand aus der anderen Tupelmenge zu berechnen. Dazu müssen alle Abstände zwischen dem gegebenen Tupel und den Tupeln der anderen Menge berechnet werden. Das Tupel mit dem geringsten Abstand ist das Ergebnis; es wird von der Funktion  $MinDistantTupel(...) \mapsto (t_x, t_y)$  berechnet.

Mit Hilfe der Funktion  $MinDistantTupel(...)$  kann man eine Tupelpaar-Relation  $Pair(...) \mapsto [true, false]$  definieren. Die Tupelpaar-Relation bestimmt, ob zwei Tupel miteinander gematched werden oder nicht. Sie ist notwendig, da im Gegensatz zu *HI* keine statische Einteilung der Histogramme in Behälter vorliegt. Zwei Tupel  $t_1, t_2$  aus verschiedenen Tupelmengen sind genau dann ein Tupelpaar, wenn zu  $t_1$  das Tupel  $t_2$  geringsten Abstand hat und umgekehrt. Damit nicht zu weit voneinander entfernte Tupel, die stark unterschiedliche Farben oder Grauwerte besitzen, miteinander gematched werden, dürfen Tupelpaare nur eine maximale Entfernung ( $MaxDist^{13}$ ) in der Histogrammposition haben.

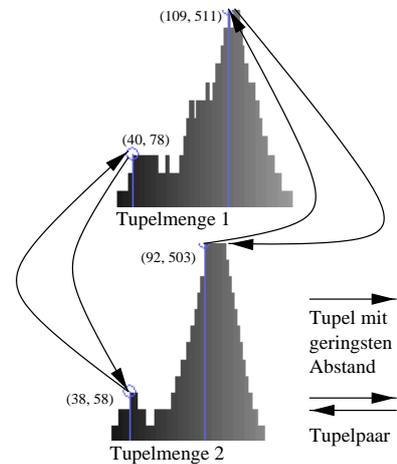


Abbildung 3: Tupelpaare

Das Matching von Tupelmengen funktioniert ähnlich wie *HI* bei Swain: Bei Swain wird die Schnittfläche zwischen zwei Histogrammen über Behälter berechnet, die jeweils bestimmte Bereiche eines Histogramms repräsentieren. Die Schnittfläche zweier Histogramme bezüglich eines Behälters ist bei Swain das Minimum der Punkte, die in den betrachteten Behälter fallen. Die gesamte Schnittfläche zweier Histogramme ist die Summe der Schnittflächen aller Behälter  $\sum_{j=1}^n \min(I_j, M_j)$ .

Die Tupel beim Tupelmatching entsprechen den Behältern bei *HI*. Ob zwei Tupel miteinander gematched werden können, wird über die Tupelpaar-Relation entschieden.

Tupelpaare bilden das zentrale Konzept beim Matching von Tupelmengen. Mit ihnen läßt sich leicht die gemeinsame Fläche von zwei Tupelmengen berechnen: Man zieht aus den Tupelmengen ein Tupelpaar. Die Fläche beider Tupel im Tupelpaar wird um den gemeinsamen Anteil - die gematchte Fläche - erniedrigt. Die gematchte Fläche merkt man sich. Diesen Vorgang wiederholt man so lange, bis sich keine Tupelpaare mehr bilden lassen. Anschließend teilt man die insgesamt gematchte Fläche durch das Maximum der Summen der ursprünglichen Flächen. Dieser Wert ist

Eingabe:

$$TS[1] \in TS_{\{hue, grey\}}[1],$$

$$TS[2] \in TS_{\{hue, grey\}}[2]$$

$$F_1 = \sum_{\forall(x,y) \in TS[1]} y$$

$$F_2 = \sum_{\forall(x,y) \in TS[2]} y$$

$$TS'_1 = TS[1], TS'_2 = TS[2]$$

$$TS[1] = 0, TS[2] = 0, F_{ges} = 0$$

$$t_1 = (x_1, y_1) \in TS'[1]$$

$$t_2 = (x_2, y_2) \in TS'[2]$$

while(( $TS'_1 \neq TS[1]$ )  $\vee$  ( $TS'_2 \neq TS[2]$ ))

  if( $Pair(t_1, t_2, TS'_1, TS'_2, ..)$ )

$F = \min(y_1, y_2)$

$TS'_1 = TS[1] \setminus t_1 \cup (x_1, y_1 - F)$

$TS'_2 = TS[2] \setminus t_2 \cup (x_2, y_2 - F)$

$F_{ges} = F_{ges} + F$

Ausgabe: Tupel-Matchwert  $\frac{F_{ges}}{\max(F_1, F_2)}$

Abbildung 4: Tupel-Matching

<sup>10</sup>Mittels Teilen durch die maximale Histogrammposition

<sup>11</sup>Mittels Teilen durch die maximal auftretende Fläche in beiden Tupelmengen

<sup>12</sup>PW: Position weight

<sup>13</sup>Bei Farbwinkeln 20 Grad und bei Grauwerten 50 Graustufen

der gesuchte Tupel-Matchwert<sup>14</sup> ( $TupelMatch(...) \mapsto [0..1]$ ).

Der Tupel-Matchwert wird für die Farbtupelmengen und für die Grauwerttupelmengen berechnet. Man erhält zwei Matchwerte: Den Farb- und den Graumatchwert. Diese müssen anschließend zu einem einheitlichen Matchwert, dem Histogrammmatchwert kombiniert werden. Dabei wird berücksichtigt, daß bei einem Match, in dem die bunten Regionen in den beteiligten Objekten überwiegen, der Farbmatchwert stärker als der Graumatchwert zu gewichten ist. Überwiegen die unbunten Flächen in den Objekten, ist dagegen der Graumatchwert stärker zu berücksichtigen. Es ergibt sich folgende Formel zur Berechnung des Histogrammmatchwertes ( $HM$ ):

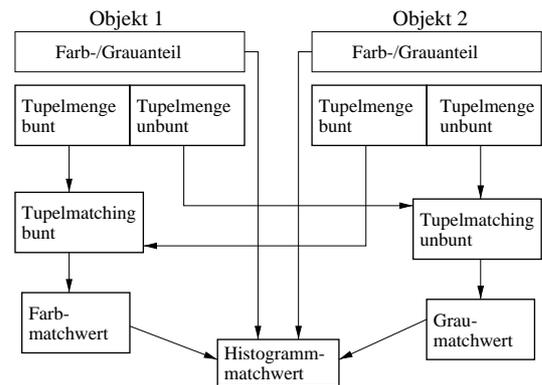


Abbildung 5: Datenfluß

$$HM = (CM * CF + GM * GF) \quad (3)$$

Hierbei ist  $CM$  der Farbmachwert,  $GM$  der Graumachwert,  $CF$  der Farbanteil und  $GF$  der Grauteil,  $\{HM, CM, GM, CF, GF\} \in [0, 1]$  und es gilt  $CF = 1 - GF$ .

Eigenschaften des Matchingverfahrens:

- Das Verfahren ist robust gegen das Zerfallen von größeren Peaks im Histogramm zu mehreren kleinen Peaks, da ein Tupel mit mehreren anderen Tupeln während des Matchingvorgangs Paarungen bilden kann.
- Im Grauwertbereich toleriert das Verfahren Änderungen<sup>15</sup> in der Beleuchtungsintensität und damit auch in der Farbtemperatur.
- Im bunten Bereich toleriert das Verfahren Änderungen in der Farbtemperatur der Beleuchtung.
- Im bunten Bereich ist das Verfahren gegen Intensitätsänderungen weitgehend invariant. Probleme können nur dann auftreten, wenn Bildpunkte zwischen Bunt und Grau migrieren.
- Das Verfahren ist robust gegen Teilverdeckungen und 3D-Rotationen.
- Das Verfahren ist invariant bei 2D-Drehungen<sup>16</sup>.

## 4 Ergebnis

Zur Analyse und zum Vergleich der Matchingqualität wurden einige Messungen mit der Datenbank von Swain durchgeführt<sup>17</sup>. Die Datenbank besteht aus insgesamt 98 Bildern im Format 128x90 Bildpunkte. Die Bilder gliedern sich in 32 "unbekannte" und 66 "bekannte" Objekte.

Die Berechnung der Matchattribute dauerte für die 98 Bilder 1070 ms<sup>18</sup>, also etwa 10.9 ms pro Objekt. Anschließend wurden alle "unbekannten" gegen alle "bekannten" Objekte gematched. Diese  $32 * 64 = 2048$  Matches dauerten 168 ms, also etwa 0.079 ms pro Match.

Anschließend wurde die Matchqualität untersucht<sup>19</sup>: 31 der unbekannt Objekte hatten als bestes Matchergebnis das dazugehörige bekannte Objekt<sup>20</sup>. Bei einem Match war das zweitbeste Ergebnis das dazugehörige Objekt. Es ergibt sich also ein "Percentile"-Wert<sup>21</sup> von 0.9995. Damit ist die

<sup>14</sup>Der Algorithmus in Pseudocode ist in [1] zu finden

<sup>15</sup>Im Rahmen der Einstellungen von *MaxDist*

<sup>16</sup>Um Rotationsachse, die durch Kamera geht

<sup>17</sup>Die Files finden sich bei <http://cs-www.uchicago.edu/users/swain/color-indexing.tar.Z>

<sup>18</sup>Alle Laufzeitmessungen wurden auf einem Pentium II mit 233MHz durchgeführt.

<sup>19</sup>Die dabei verwendeten Parameter und das genaue Matchingverfahren ist in [1] dokumentiert

<sup>20</sup>Rang  $r = 1$

<sup>21</sup> $Percentile = \frac{N-r}{N-1}$  [2] ( $N = 64$ ,  $r = \text{Rang}$ )

Qualität des hier vorgestellten Verfahrens und die Qualität von  $Hf^{22}$  ähnlich.

In einem Versuch wurde die Auswirkung von extremen Änderungen der Beleuchtungsintensität auf das Verfahren untersucht. Alle "unbekannten" Objekte wurden rechnerisch so weit aufgehellt, daß sie gerade nicht überstrahlen<sup>23</sup>, die "bekannten" Objekte wurden im Original belassen. Anschließend wurden die Objekte gegeneinander gematched. Selbst unter diesen extremen, wenn auch simulierten Beleuchtungsbedingungen lieferte das Verfahren akzeptable Ergebnisse: 27 Objekte belegten Rang 1, 3 Objekte Rang 2 und 2 Objekte Rang 3 oder schlechter. Der "Percentile"-Wert war 0.9885. Unter diesen Beleuchtungsbedingungen würde die Matchingqualität von  $Hf$  mit Sicherheit extrem einbrechen [2].

## 5 Formeln

Größte auftretende Fläche in zwei Tupelmengen

$$BiggestPeak(TS_{grey/hue}[1], TS[2]_{grey/hue}) = \max_{\forall (Pos, Area) \in TS_{grey/hue}[1] \cup TS_{grey/hue}[2]} (Area) \quad (4)$$

Abstand zweier unbunter Tupel:

$$TupelDistance(x_1, y_1, x_2, y_2, TS_{grey}[1], TS_{grey}[2], PositionWeight) = \sqrt{\left( abs(x_1 - x_2) * \frac{1}{MaxGreyIndex * PositionWeight} \right)^2 + \left( abs(y_1 - y_2) * \frac{1}{BP * (1 - PositionWeight)} \right)^2}$$

mit  $BP = BiggestPeak(TS_{grey}[1], TS_{grey}[2])$  und  $(x_1, y_1) \in TS_{grey}[1] \wedge (x_2, y_2) \in TS_{grey}[2]$  (5)

Abstand zweier bunter Tupel:

$$TupelDistance(x_1, y_1, x_2, y_2, TS_{hue}[1], TS_{hue}[2], PositionWeight) = \sqrt{\left( \min(abs(x_1 - x_2), abs(abs(x_1 - x_2) - MaxHueIndex)) * \frac{1}{MaxHueIn * PeakWeight} \right)^2 + \left( abs(y_1 - y_2) * \frac{1}{BP * (1 - PositionWeight)} \right)^2}$$

mit  $BP = BiggestPeak(TS_{hue}[1], TS_{hue}[2])$  und  $(x_1, y_1) \in TS_{hue}[1] \wedge (x_2, y_2) \in TS_{hue}[2]$  (6)

Tupel mit geringstem Abstand:

$$MinDistantTupel((x, y), TS) = (t_x, t_y)$$

mit  $d_t = TupelDistance(x, y, t_x, t_y, TS, TSC)$   
und  $d_t \leq TupelDistance(x, y, t'_x, t'_y, TS, TSC) \forall (t'_x, t'_y) \in TSC$  (7)

$TSC^{24}$  bezeichnet hierbei das Gegenstück zu einer Tupelmengen.  $TSC(TS_{hue/grey}[1]) = TS_{hue/grey}[2]$  und  $TSC(TS_{hue/grey}[2]) = TS_{hue/grey}[1]$ .

Tupelpaare:

$$Pair((x_1, y_1), (x_2, y_2), TS, TSC, MaxDist) = \begin{cases} false & (y_1 = 0) \vee (y_2 = 0) \\ false & abs(x_1 - x_2) > MaxDist \\ true & (x_1, y_1) = MinDistantTupel(MinDistantTupel(x_1, y_1, TSC), TS) \\ false & sonst \end{cases} \quad (8)$$

## Literatur

- [1] Dirk Balthasar. *Matching und Lokalisation von Objekten in Echtzeit*. Diplomarbeit, 1999.
- [2] Bian Funt and Graham Finlayson. Color constant color indexing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol 17, No 5, May 1995.
- [3] J. Matas. *Colour-based Object Recognition*. PhD thesis, University of Surrey, 1996.
- [4] Volker Rehrmann. *Stabile, echtzeitfähige Farbbildauswertung*. PhD thesis, Universität Koblenz, 1994.
- [5] Michael Swain and Dana Ballard. Color indexing. *International Journal of Computer Vision*, 1991.

<sup>22</sup>Bester "Percentile"-Wert bei Swain: 0.9985

<sup>23</sup> $(r, g, b) \mapsto (\alpha * r, \alpha * g, \alpha * b)$  mit  $\alpha = \frac{255}{\max(r, g, b)}$ , wobei Hintergrundpunkte mit  $\max(r, g, b) < 100$  nicht verändert wurden.

<sup>24</sup>Tupelset Complementary

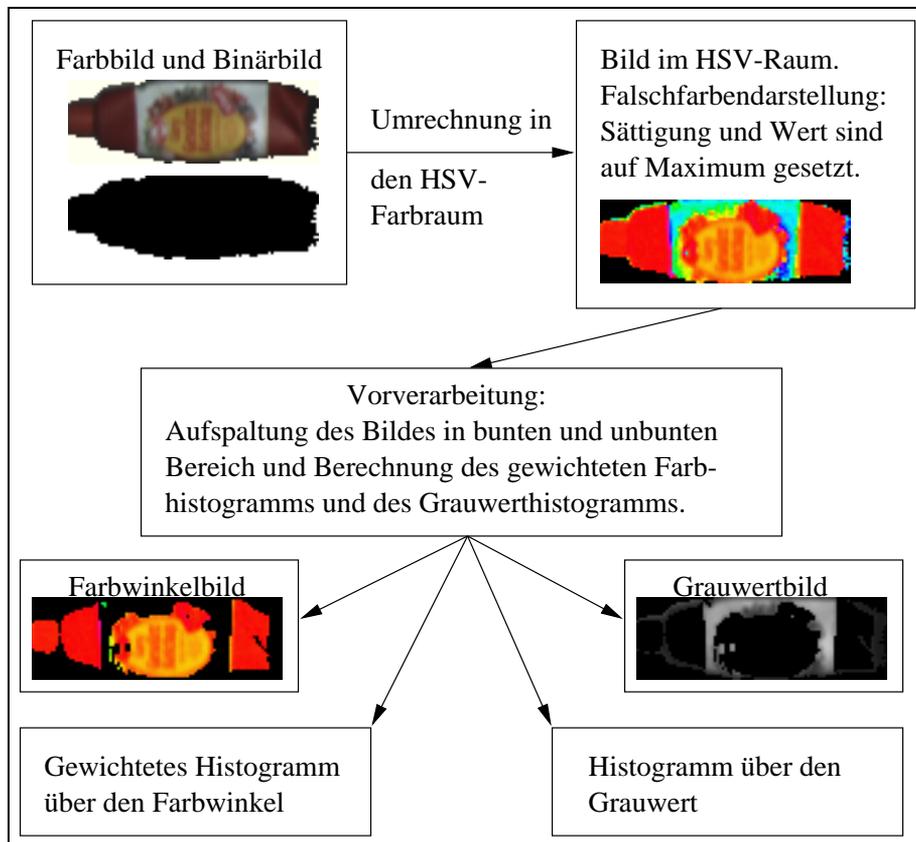


Abbildung 1: Vorverarbeitung und Histogrammberechnung

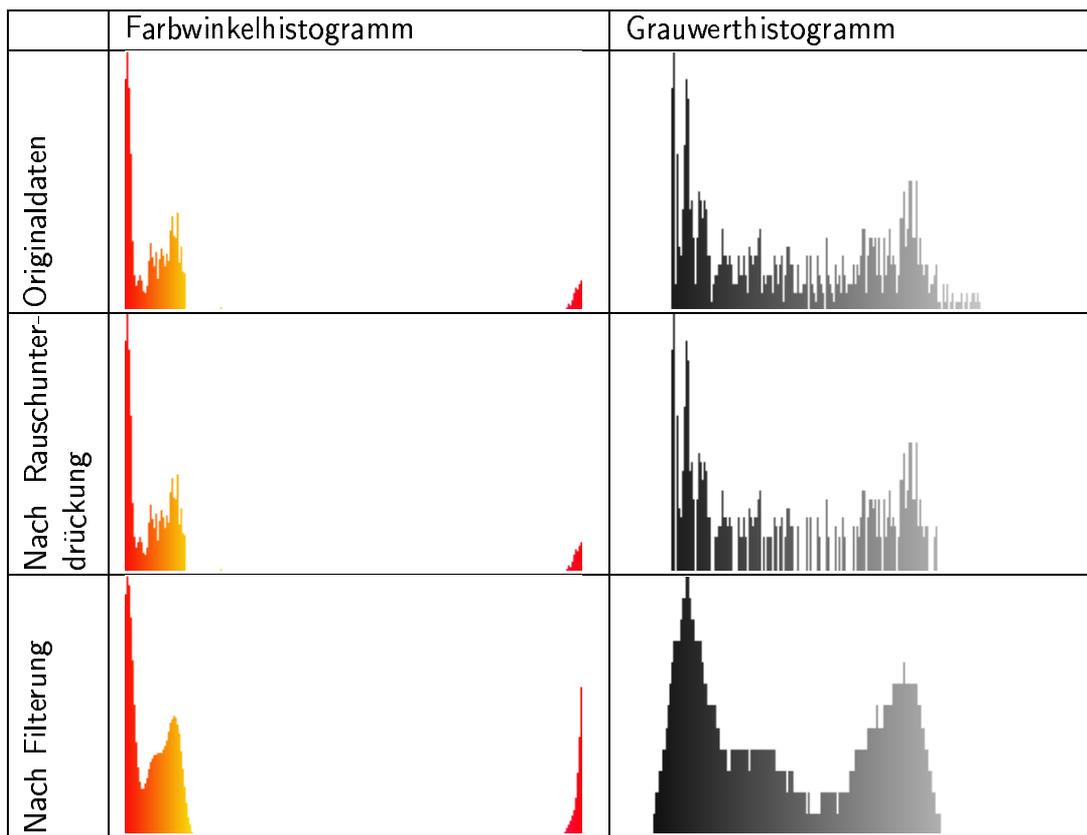


Abbildung 2: Histogrammaufbereitung

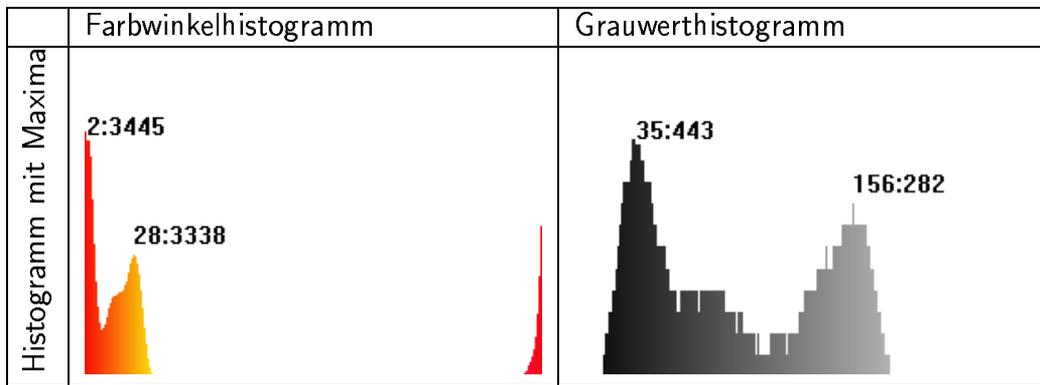


Abbildung 3: Histogrammclustering

Tupelmengen:

$$TS_{hue} = \{(2, 3445), (28, 3338)\} \quad (1)$$

$$TS_{grey} = \{(35, 443), (156, 282)\} \quad (2)$$

Aufnahme		Farbwinkelhistogramm	Grauerthistogramm
	Farb-, Grauwert-, Binär-, Farbwinkelbild in der Reihenfolge: Links oben, rechts oben, links unten, rechts unten.		
1		$TS_{hue}[1] = \{(16, 1051), (59, 3959), (156, 3729)\}$	$TS_{grey}[1] = \{(40, 78), (109, 511)\}$
2		$TS_{hue}[1] = \{(16, 1148), (65, 3989), (154, 3967)\}$	$TS_{grey}[1] = \{(38, 58), (92, 503)\}$

Abbildung 4: Histogrammbasiertes Matching