

## 9. Analyse von Bewegtbildern

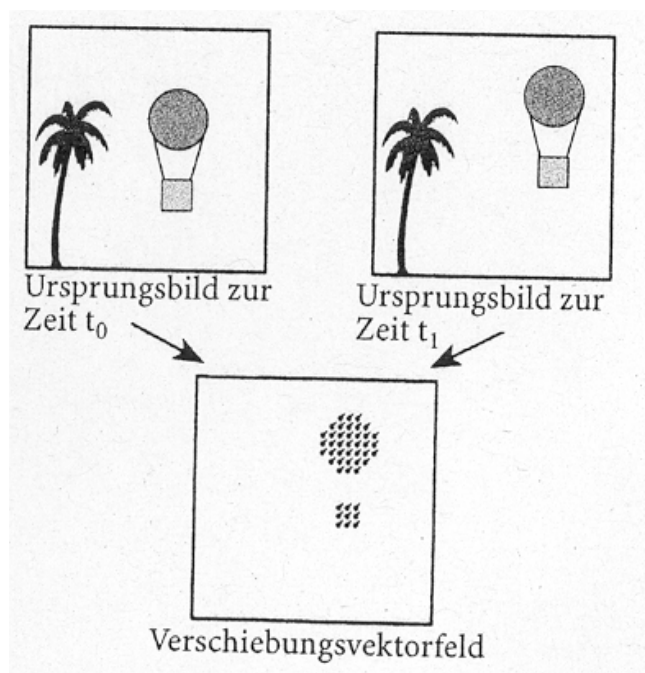
Problemstellung:

Analyse und Verstehen von Bewegung in Bildfolgen

Schwierigkeiten:

- Unterschiede zwischen Bildveränderung und Bewegung
- Rauschen soll nicht als Bewegung interpretiert werden
- ebenso Veränderung der Beleuchtungsbedingungen
- bewegte Teile eines Bildes müssen nicht notw. zusammenhängen (Beisp. Vogelschwarm) – Mensch erkennt dies trotzdem als zusammengehörig (Gestaltgesetz des "gemeinsamen Schicksals")
- Bewegung eines Objektes hinter einem Lattenzaun: ständig tauchen Bildelemente auf und verschwinden wieder
- Verformung von Objekten während der Bewegung: Beisp. Gehen eines Menschen, Aufprallen eines Balls, sich drehender Stein im Flug (nach Wurf) – auch Beleuchtung kann sich dabei ändern
- Eigenbewegung zu unterscheiden von Bewegung der beobachteten Objekte

Ziel der Bewegungsschätzung: Verschiebungsvektor für jeden Bildpunkt



## Bewegungsdetektion

Annahme: Kamera statisch (Überwachungsaufgaben)

Ziel: Detektion von Objekten in Bewegung gegenüber einem konstanten Hintergrund

Variante 1:

$$d(r, c) = \begin{cases} 1, & \text{falls } |f(r, c, t) - f(r, c, t - 1)| \geq \epsilon \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Variante 2:

$$d(r, c) = \begin{cases} 1, & \text{falls } |f(r, c, t) - f^r(r, c)| \geq \epsilon \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

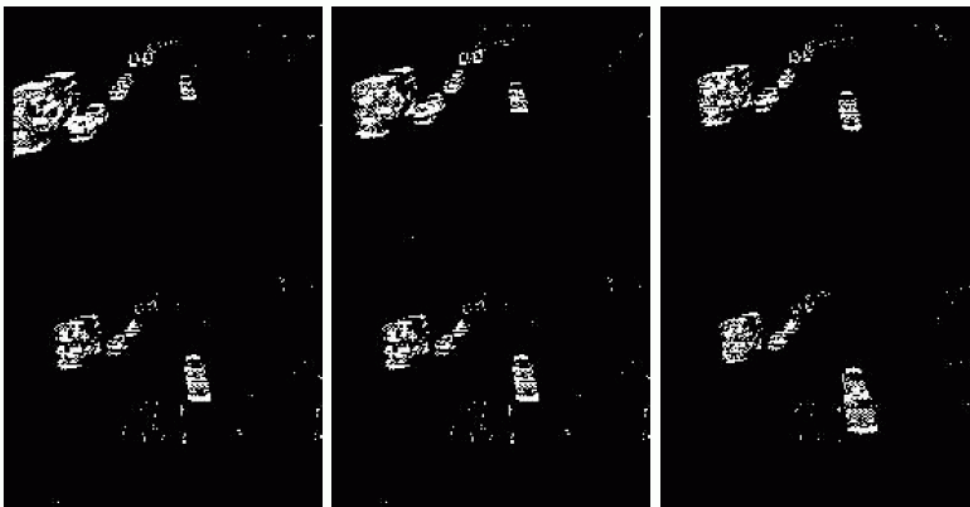
wobei  $f^r(r, c)$  ein Referenzbild nur mit dem Hintergrund

Beispiel: Ausgangs-Bildfolge:

Bildsequenz:  $\approx 5$  Bilder/s

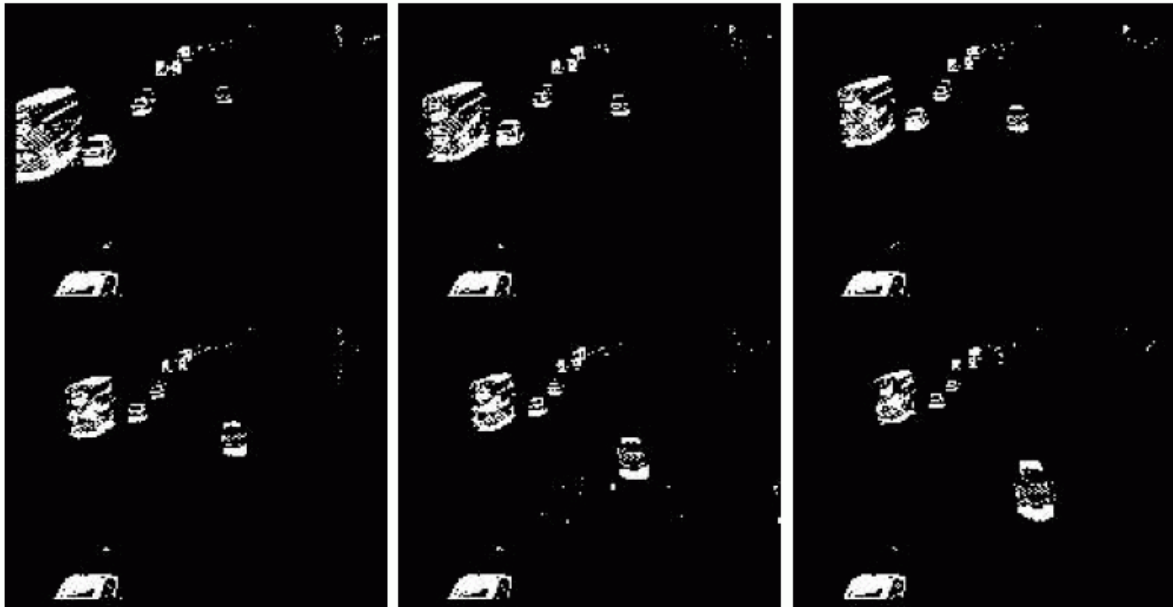


Bildsubtraktion: Variante 1



Schwäche: Doppelbild eines Fahrzeugs (aus dem letzten und aktuellen Bild); Aufteilung einer konstanten Fläche

## Bildsubtraktion: Variante 2



Generell: weitere Nachverarbeitungsschritte nötig, um die Objekte zu lokalisieren (Zusammenhangsanalyse, Entfernen kleiner Regionen, Fusion benachbarter Regionen, Berechnung von Bounding-Box)

Schwellwert  $\epsilon$ :

Aufnahme einer Reihe von Bildern nur mit dem Hintergrund. Histogramm aller Differenzwerte; sie sind auf Zufallsstörungen zurückzuführen und lassen sich als eine Gauss-Funktion modellieren. Der Schwellwert  $\epsilon$  wird auf ein Mehrfaches der entsprechenden Standardabweichung gesetzt.

Referenzbild  $f^r(r, c)$  :

Mittelung einer langen Sequenz von Bildern

(Jiang 2006)

## 2 Ansätze zur Abtastung bei Bewegungsdetektion:

- zeitdiskret: Abfolge von Einzelbildern zu verschiedenen Zeitpunkten ("frames") – abgetastete Bewegung (*apparent motion*)
- kontinuierliche Entwicklung des Grauwertes an einem festen Ort: entspricht eher dem biologischen Vorbild (rezeptive Felder der retinalen Ganglienzellen; Insektenauge)

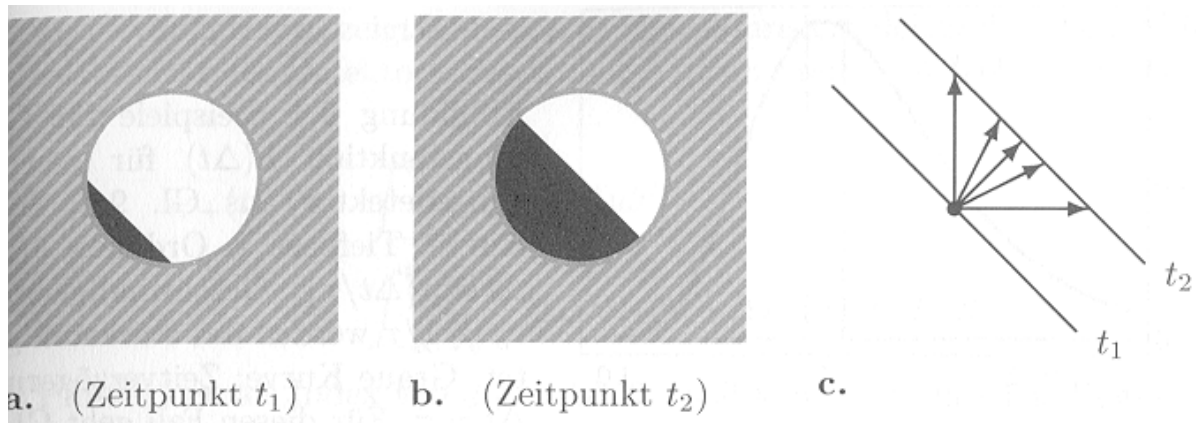
im zeitdiskreten Fall:

Bildelemente müssen von einem Bild zum nächsten verfolgt werden – *Korrespondenzproblem*

Problem beim 2. Ansatz (streng lokaler Detektor):

Helligkeitsänderungen an einem Punkt können auf ganz verschiedene Bewegungen zurückzuführen sein –

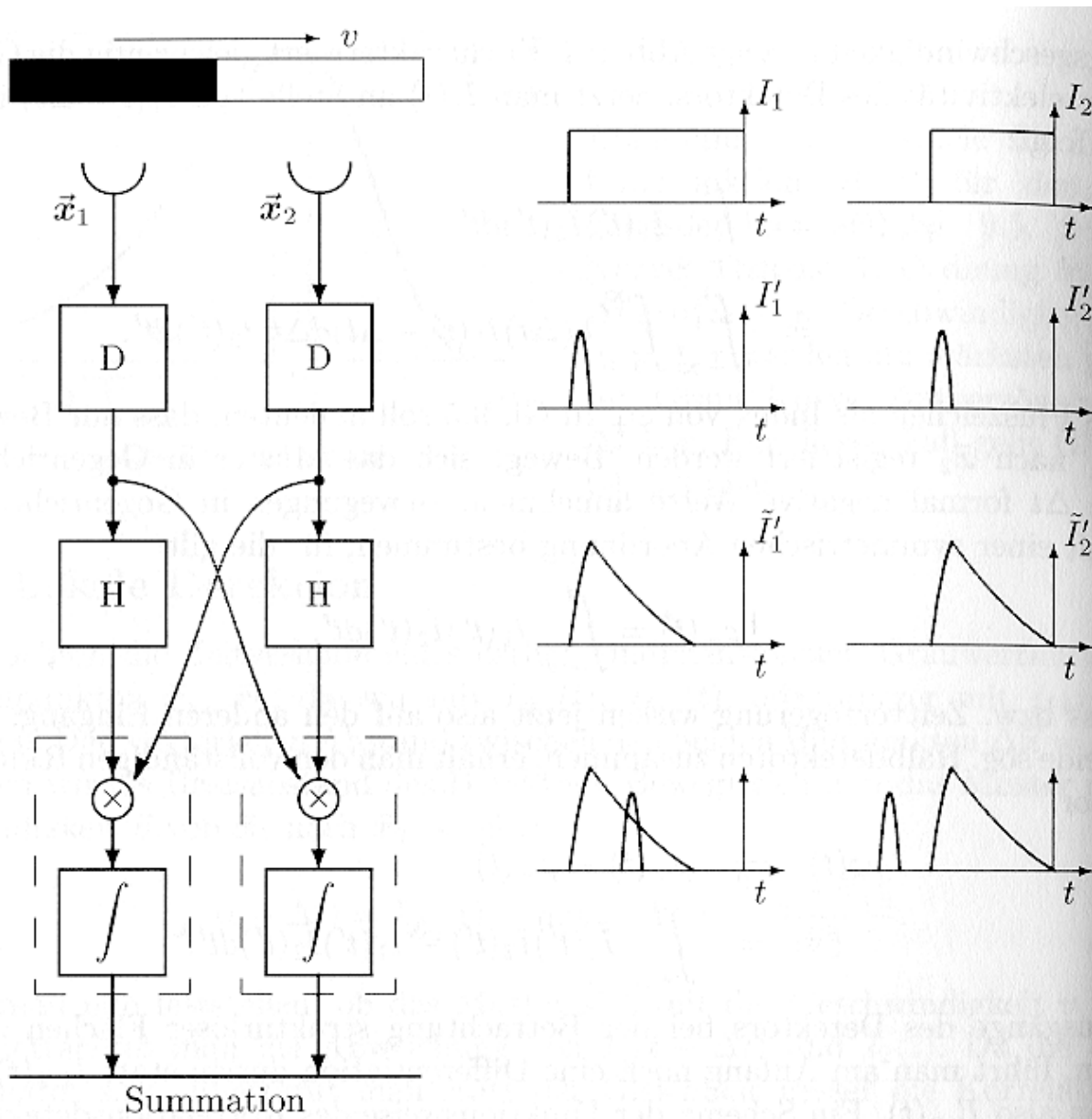
*Aperturproblem*



(aus Mallot 2000)

Korrelationsdetektor nach Hassenstein & Reichardt (in Anlehnung an das Bewegungssehen von Insekten):

- (nahezu) kontinuierliche Verfolgung der Bildintensitäten an zwei Bildpunkten
- durch Vergleich der Zeitverläufe der Grauwerte wird auf Verschiebungen des Musters geschlossen
- verwendet (zeitliche) Änderungsdetektion (Ableitung nach der Zeit,  $D$ ), Tiefpassfilter ( $H$ ), Produktbildung und Integration



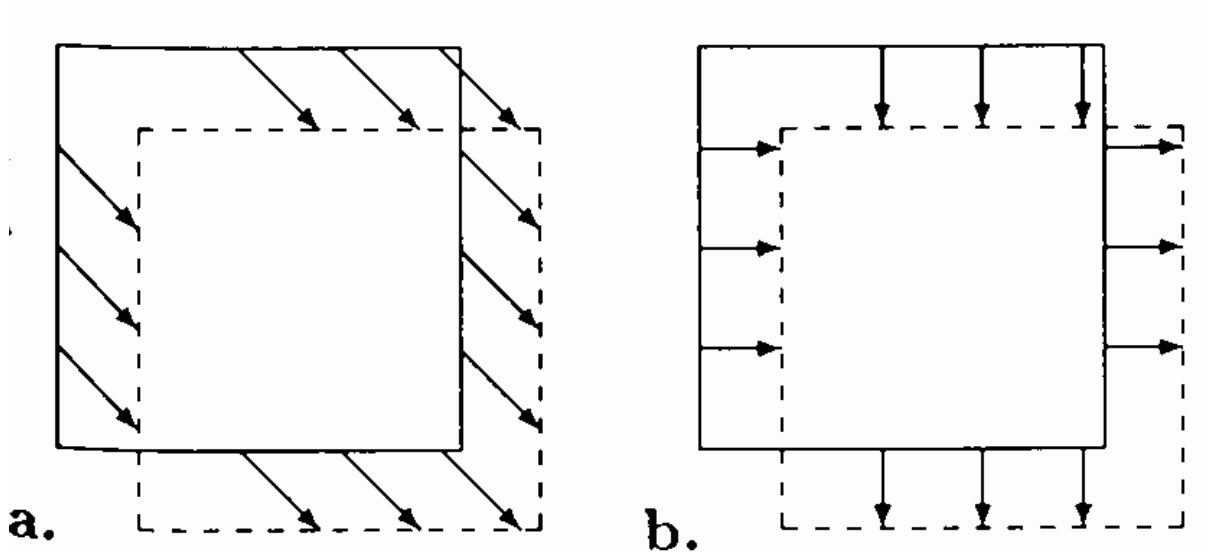
*Gradientenverfahren* messen für jeden Bildpunkt die zeitliche Änderung des Grauwertes  
 Aperturproblem: nur die Bewegungskomponente senkrecht zur Kontur (d.h. in Richtung des Grauwertgradienten) wird dabei erfasst  
 Hypothese: Bewegung findet (lokal) tatsächlich in diese Richtung statt:

$$\vec{v} = - \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} \frac{\text{grad } I(x, y)}{\|\text{grad } I(x, y)\|^2}$$

*Beispiel:* diagonale Bewegung eines Quadrats

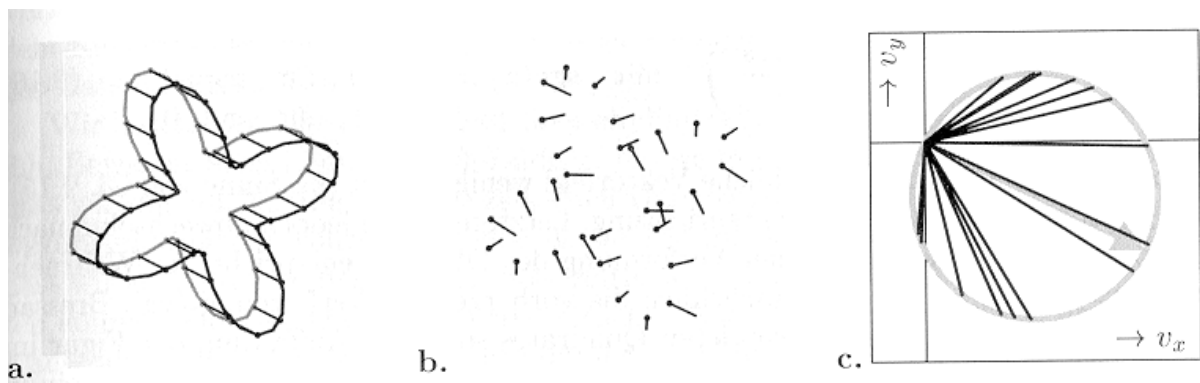
a. tatsächliche Bewegungsvektoren

b. nach obiger Gleichung errechnete Bewegungsvektoren



Bei konstantem Verschiebungsfeld (Bewegung = reine Translation) kann der tatsächliche Verschiebungsvektor dennoch aus diesen Daten geschätzt werden:

Ähnlich zur modifizierten Hough-Transformation von Geraden durch einen Fluchtpunkt (s. Übung, Aufg. U23) liegen alle Endpunkte von errechneten Verschiebungsvektoren auf einem Thales-Kreis durch den Nullpunkt. Der am Nullpunkt ansetzende Durchmesser dieses Kreises entspricht der tatsächlichen Verschiebung:



## Optischer Fluss

**Bewegungsfeld:** Projektion der Bewegungen der 3D-Szene auf die Bildebene. Diese Größe soll aus einer Bildsequenz extrahiert werden.

**Optischer Fluss:** beobachteter Grauwertfluss in der Bildebene (Objektbewegung bewirkt, dass Grauwerte über die Bildebene fließen)

**Annahme:** Optischer Fluss  $\equiv$  Bewegungsfeld

**Gegenbeispiel:**

- Bewegungsfeld  $\neq 0$ , optischer Fluss = 0
  - Fläche konstanter Helligkeit
  - Eine sich drehende Kugel mit einer beliebigen gleichmäßigen Oberfläche. Eine solche Kugel kann sich durch ihren Schwerpunkt um jede Achse drehen, ohne dass Grauwerveränderungen resultieren.
- Bewegungsfeld = 0, optischer Fluss  $\neq 0$ 

Die gleiche Kugel in Ruhe und beleuchtet von einer sich bewegenden Lichtquelle.

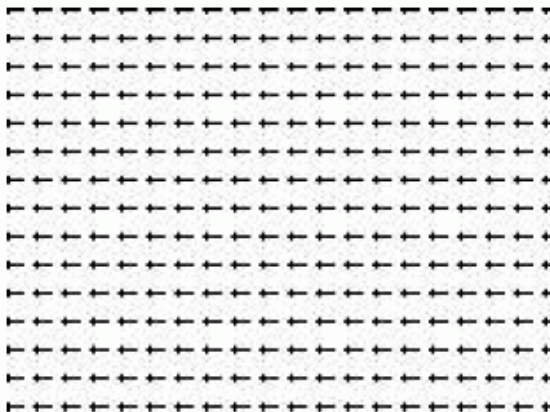
Obwohl diese Äquivalenz (Optischer Fluss  $\equiv$  Bewegungsfeld) zunächst plausibel erscheint, gilt sie bei genauerer Betrachtung tatsächlich in nur wenigen Fällen. In praktischen Anwendungen wird jedoch von einer ungefähren Äquivalenz ausgegangen.

**Annahmen zur Berechnung des optischen Flusses:**

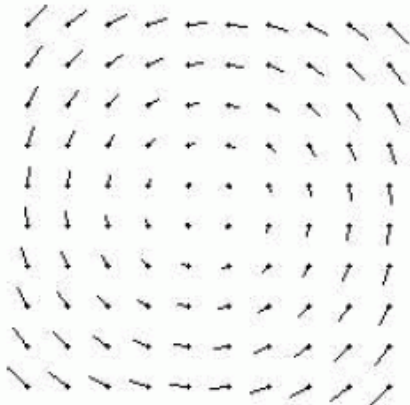
Der Grauwert eines Objektpunktes bleibt ungefähr unverändert

- keine (gravierende) Änderung der Beleuchtung von Bild zu Bild
- keine (gravierende) Änderung der Entfernung der Kamera und Lichtquelle(n) zu Objekten von Bild zu Bild

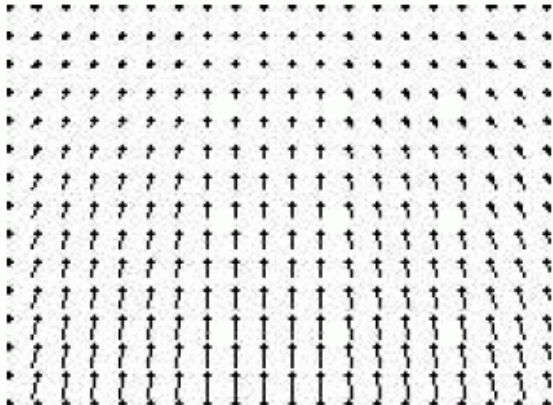
Beispiele für optischen Fluss:



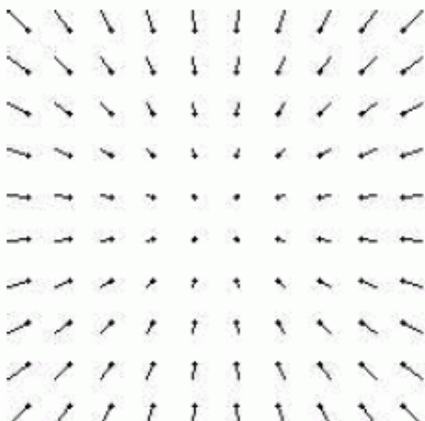
Translation



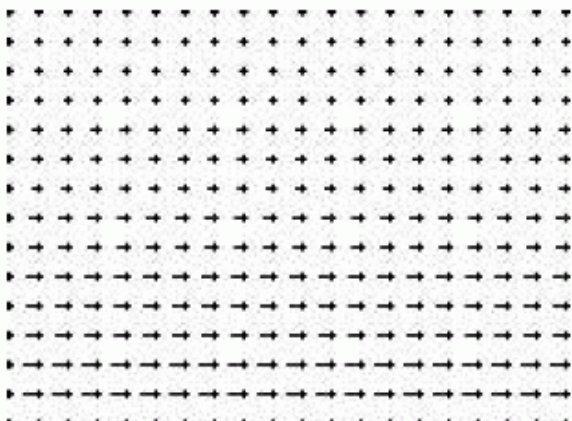
Rotation



Vorwärtsbewegung auf einer Ebene



Zoom-in



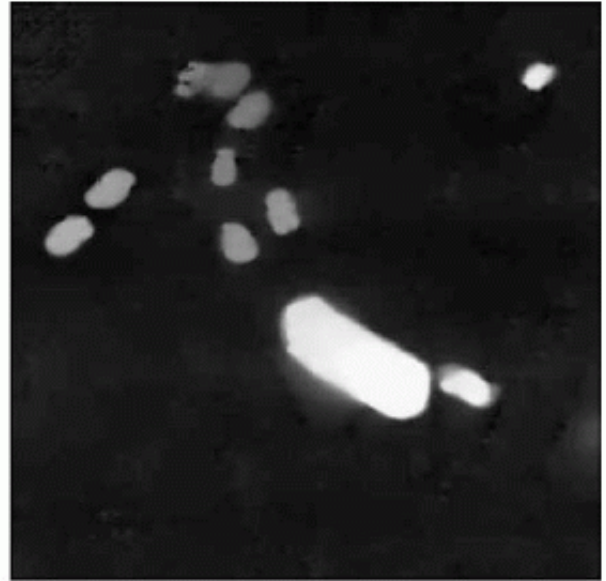
Seitwärtsbewegung



optischer Fluss in Realszenen (Verkehrsanalyse):



Optische Flüsse



Betrag der Flussvektoren

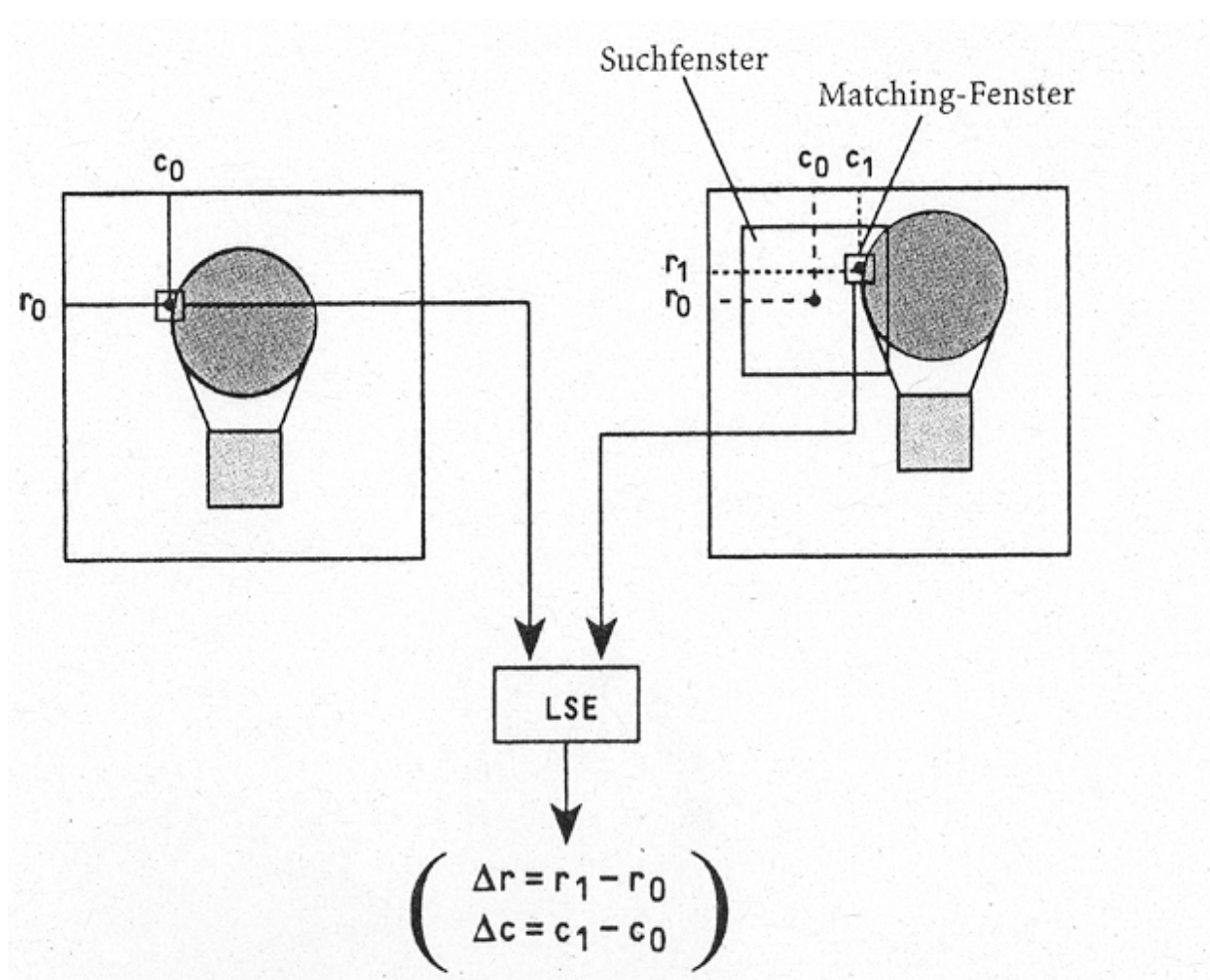
(aus Jiang 2006)

Bestimmung optischer Flüsse:

- lokale Verfahren
- globale Verfahren

## Korrelationsverfahren zur lokalen Bewegungskdetektion

- lege Matching-Fenster in Bild 1 um aktuelles Pixel
- suche mittels Matching-Fenster der gleichen Größe in Bild 2 Übereinstimmung innerhalb eines Suchfensters
- für jedes Pixel im Suchfenster werden die Grauwerte der beiden Matching-Fenster verglichen
- der Vergleich, der den kleinsten quadratischen Fehler (LSE) aufweist, liefert die Verschiebungsdaten
- nachfolgende Korrekturverfahren zum Ausgleich von Korrespondenz- und Aperturfehlern



klassisches Verfahren zur Bewegungsdetektion  
(beinhaltet initiale Verschiebungsdetektion und Korrektur):

### Verfahren von Horn und Schunk

- iteratives Verfahren
- wird auf das gesamte Bild  $E$  (zum Zeitpunkt  $t_0$  und  $t_1$ ) angewandt
- 1. Schritt: Berechnung der partiellen Ableitungen

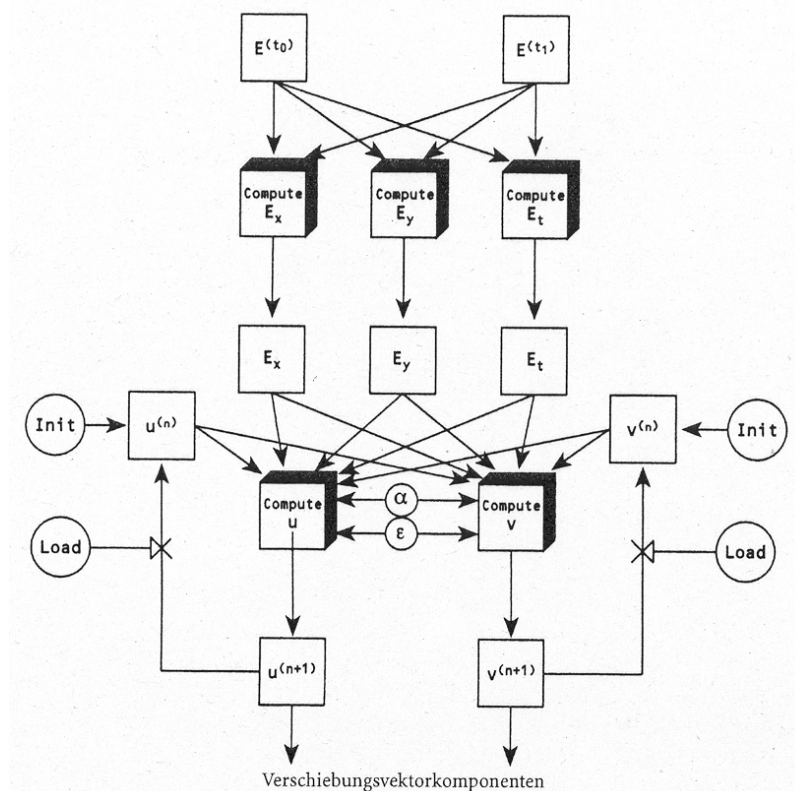
$$E_x = \frac{\partial E}{\partial x} \quad E_y = \frac{\partial E}{\partial y} \quad E_t = \frac{\partial E}{\partial t}$$

- Ziel: Komponenten  $u, v$  der Verschiebungsvektoren (Vektorfeld)

$$u = \frac{dx}{dt} \quad v = \frac{dy}{dt}$$

- werden nicht exakt bestimmt, sondern approximativ mit gegebener Fehlerschranke

Ablaufschema des Verfahrens:



Herleitung des Verfahrens:

$E(x, y, t)$  = Grauwert eines Pixels zum Zeitpunkt  $t$

zum nächsten Zeitpunkt  $t + \delta t$ :

$$E(x, y, t) = E(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$$

Taylor-Entwicklung des rechten Terms um den Punkt  $(x, y, t)$ :

$$E(x, y, t) = E(x, y, t) + \delta x \frac{\partial E}{\partial x} + \delta y \frac{\partial E}{\partial y} + \delta t \frac{\partial E}{\partial t} + R$$

Es folgt:

$$\delta x \frac{\partial E}{\partial x} + \delta y \frac{\partial E}{\partial y} + \delta t \frac{\partial E}{\partial t} + R = 0$$

Vernachlässigung des Restglieds  $R$  und Division durch  $\delta t$  liefert:

$$\frac{\delta x}{\delta t} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\delta y}{\delta t} \frac{\partial E}{\partial y} + \frac{\partial E}{\partial t} = 0$$

$\Rightarrow$  im Grenzübergang  $\delta t \rightarrow 0$ :

$$\frac{\partial E}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial E}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial E}{\partial t} = 0$$

oder kurz

$$E_x u + E_y v + E_t = 0$$

Dies ist eine Gleichung mit 2 Unbekannten ( $u, v$ ).

2. Bestimmungsgleichung: "Smoothness Constraint"; Annahme: benachbarte Punkte vollführen ähnliche Bewegungen ("glatte Bewegung").

Zur formalen Beschreibung dieser Bedingung wird gefordert, dass die beiden Terme

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \quad \text{und} \quad \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$$

bzw. ihre Summe = 0 werden soll.

Anstatt Gleichheit in beiden Bedingungen werden 2 Fehlerterme definiert, die die Abweichung von der Gleichheit quantifizieren:

$$\varepsilon_b = E_x u + E_y v + E_t$$

$$\varepsilon_c^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$$

Diese Fehler werden für jedes Pixel der Eingabebilder ermittelt; der Gesamtfehler

$$\varepsilon^2 = \iint (\varepsilon_b^2 + \alpha^2 \varepsilon_c^2) dx dy$$

soll minimiert werden.

Dabei steuert der Parameter  $\alpha$  das Verhältnis des Einflusses der Einzelfehler auf den Gesamtfehler.

Abhängigkeiten der zu minimierenden Funktion:

$$\iint F(x, y, u, v, u_x, u_y, v_x, v_y) dx dy$$

Approximative Lösung des Extremalproblems mit Mitteln der Variationsrechnung (kurze Einführung bei Bässmann & Kreyss 1998, S. 407 ff.):

2 Euler-Gleichungen

$$\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial F}{\partial u_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial F}{\partial u_y} \right) = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial v} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial F}{\partial v_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial F}{\partial v_y} \right) = 0$$

werden approximativ umgeformt zu

$$\left( \alpha^2 + E_x^2 \right) u + E_x E_y v = \alpha^2 \bar{u} - E_x E_t$$

$$E_x E_y u + \left( \alpha^2 + E_x^2 \right) v = \alpha^2 \bar{v} - E_y E_t$$

mit lokalen Mittelwerten  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ .

Iterative Lösung des linearen Gleichungssystems mit dem Gauß-Seidel-Verfahren möglich:

$$u^{(n+1)} = \frac{\alpha^2 \bar{u}^{(n)} - E_x E_t - E_x E_y v^{(n)}}{\alpha^2 + E_x^2}$$

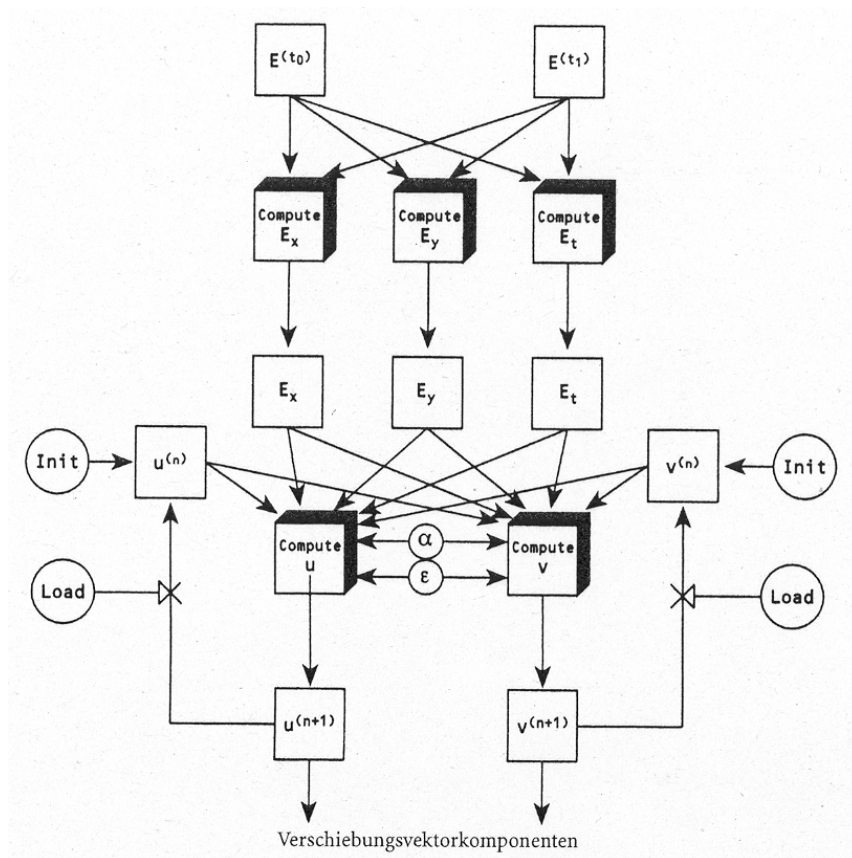
$$v^{(n+1)} = \frac{\alpha^2 \bar{v}^{(n)} - E_y E_t - E_x E_y u^{(n)}}{\alpha^2 + E_y^2}$$

kann noch so umgestellt werden, dass  $u$  und  $v$  isoliert auftreten (schnellere Berechenbarkeit, da Teile der rechten Seiten in beiden Iterationsgleichungen identisch sind):

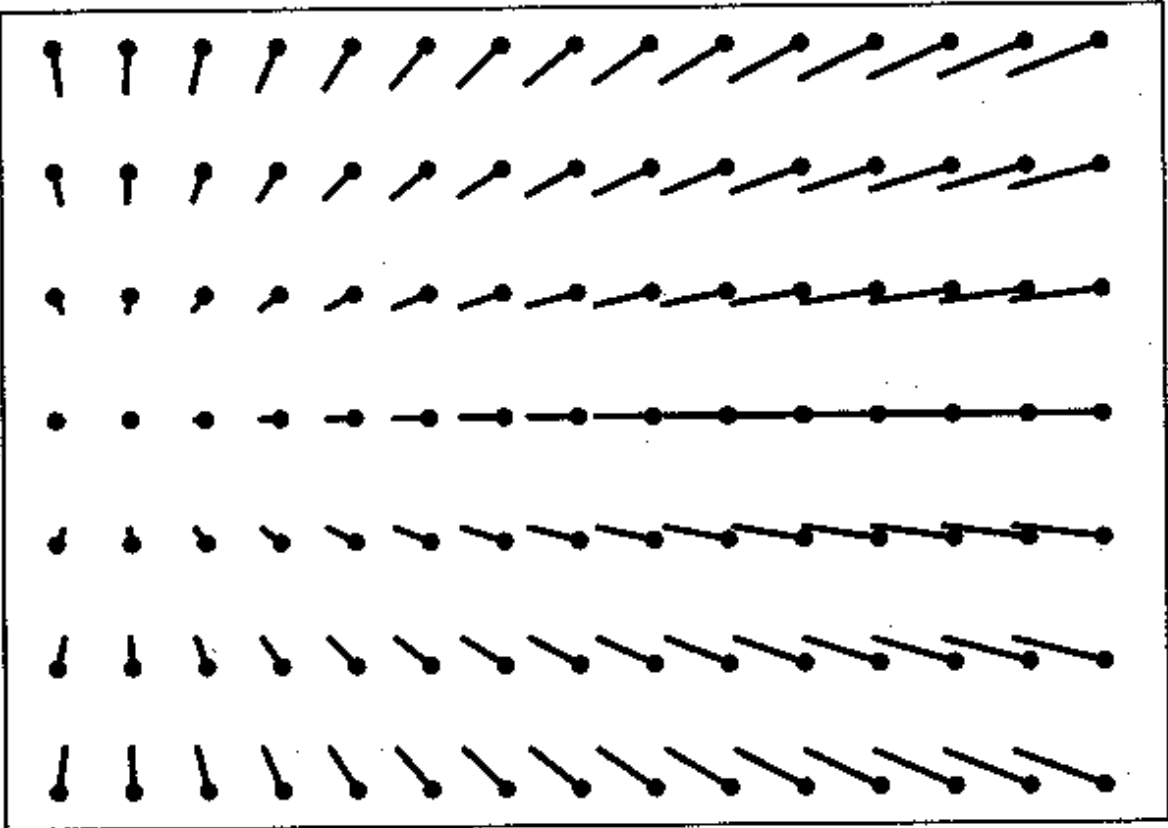
$$u^{(n+1)} = \bar{u}^{(n)} - \frac{E_x \left( E_x \bar{u}^{(n)} + E_y \bar{v}^{(n)} + E_t \right)}{\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2}$$

$$v^{(n+1)} = \bar{v}^{(n)} - \frac{E_y \left( E_x \bar{u}^{(n)} + E_y \bar{v}^{(n)} + E_t \right)}{\alpha^2 + E_x^2 + E_y^2}$$

Iteration, bis Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Werten vorgegebene Genauigkeitsschranke unterschreitet.



Ergebnis: "Nadelbild"





## Punktverfolgung in Bewegtbildern

**Ziel:** Anstatt eines dichten Feldes des optischen Flusses sollen lediglich einzelne Punkte über eine Bildsequenz verfolgt werden

**Prinzip:** Im ersten Bild sollen die Punkte (points of interest) manuell/automatisch bestimmt werden. Ihre Positionen in den Folgebildern werden mittels Template-Matching in einer Nachbarschaft gesucht.

Template  $t(i, j)$ : Bildbereich um einen zu verfolgenden Punkt

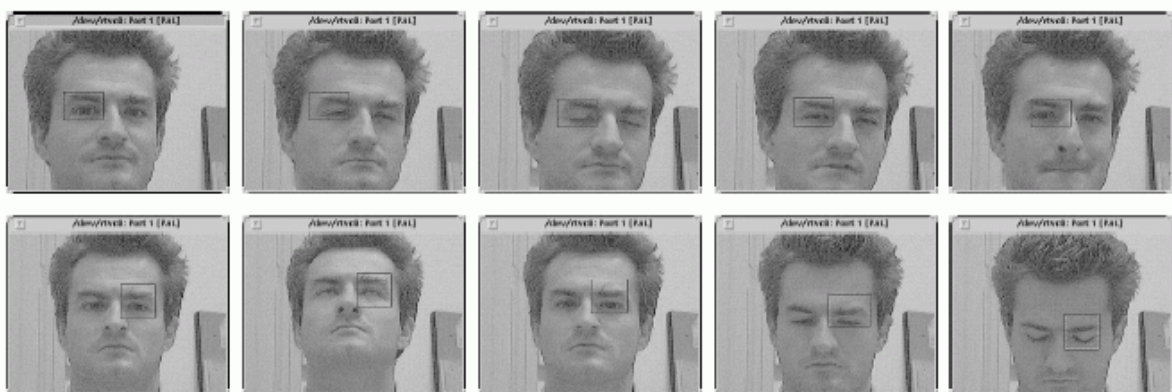
Suchbereich: Nachbarschaft um den zu verfolgenden Punkt im Folgebild

Ähnlichkeitsmaß:

- $d_1(t, g) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |g(i, j) - t(i, j)|$  (möglichst klein)
- $d_2(t, g) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (g(i, j) - t(i, j))^2$  (möglichst klein)
- $d_3(t, g) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g(i, j)t(i, j)$  (möglichst groß)

**Bemerkung:** Verbesserung durch Kalman-Filter im Rahmen der optimalen Schätztheorie

### Beispiel: Augenverfolgung



(aus Jiang 2006)