Universität Koblenz-Landau
Abteilung Koblenz
Fachbereich Informatik

Computergenerierte Aquarelleffekte

im Rahmen des Seminars
Computergraphik

SS 2001

Seminarleiter: Prof. Dr. H. Giesen

Anke Meurer

30. September 2001

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Zum Begriff **2**

3 Betrachtung aus der Sicht der Malerei **3**
3.1 Besonderheiten der Aquarellmalerei 3
3.2 Entwicklung der Aquarellmalerei in der Kunst 3
3.3 Eigenschaften der Aquarellfarben 3
3.3.1 Zusammensetzung und Eigenschaften des Materials 4
3.3.2 Aquarelltechniken und -effekte 4

4 Computergenerierte Aquarelleffekte **6**
4.1 Simulation unter Beachtung der physikalischen Eigenschaften 6
4.1.1 Flusssimulation 7
4.1.2 Rendern des Bildes 15
4.1.3 Applikationen 16
4.2 Filter „Aquarelleffekt“ in kommerziellen Produkten 17
4.2.1 Beschreibung der Filter 18
4.2.2 Kommentierung der Ergebnisbilder 18
4.2.3 Ein weiteres Malprogramm 21

5 Weiterführende und verwandte Entwicklungen **22**

Abbildungsverzeichnis

1 handgemalte Aquarelleffekte 4
2 computergenerierte Aquarelleffekte 7
3 Drei-Lagen-Modell zur Erstellung einer einzelnen Farbschicht 8
4 Beispiele für Papiertexturen 9
5 Beispiele für computergenerierte Aquarelleffekte 17
6 Bsp. Anwendung von Filtern, Motiv: Himmel 19
7 Bsp. Anwendung von Filtern, Motiv: Himmel; mit Hintergrundstruktur . . 19
8 Bsp. Anwendung von Filtern, Motiv: Person A 19
9 Bsp. Anwendung von Filtern, Motiv: Person B 20
10 Bsp. Anwendung von Filtern, Motiv: Wassertextur 20
11 Bsp. Anwendung von Filtern, Motiv: Pflanze 21
12 Beispielbild erstellt mit „Painter 7“ von Corel, Quelle: [1] 22

1 Einleitung

Es wurde von Computergraphikern viel Energie investiert, um photorealistische Szenen darzustellen. Hierzu wurden Methoden wie „Ray tracing“ und „Radiosity“ entwickelt, um eine wirklichkeitsgetreue Darstellung zu erzielen. Auch in der Kunst stellte der Realismus eine wichtige Richtung dar, der mit der Erfindung der Photografie an Bedeutung verlor. Daraufhin entwickelten sich mehr abstraktere Darstellungsweisen, wie z.B. der Impressionismus oder Expressionismus. Es ist nicht weiter erstaunlich, dass in der Computergrafik die Idee aufkam, diese unterschiedlichen Kunststile zu imitieren.
Aber nicht nur die unterschiedlichen Stile in der Kunst, sondern auch die verschiedenen Maltechniken, wie z.B. lasierende Malweise, pastose Pinselstriche oder Zeichnen, und Malmaterialien, wie z.B. Öl, Aquarell und Acryl haben unterschiedliche Merkmale und Erscheinungsbilder, die durch den Rechner simuliert werden können.
In vielen Fällen sind nicht-photorealistische Bilder eher angebracht als realistische. Durch den Einsatz künstlerischer Techniken können u.a. wichtige Teile fokussiert und andere ausgeblendet werden. Auch sind diese oft ästhetisch reizvoller und ansprechender als die sterilen photorealistischen Bilder, was z.B. in der Werbung genutzt werden kann.

In dieser Ausarbeitung wird ein solches Malverfahren, die Aquarellmalerei, herausgegriffen, dessen Entstehung sowie die Möglichkeiten und Besonderheiten in der Kunst näher betrachtet und die bestehenden Verfahren zur Umsetzung der speziellen Technik und deren Effekte am Rechner untersucht und vorgestellt.

2 Zum Begriff

Es gibt hierbei eine Diskrepanz zwischen dem Englischen und dem Deutschen. Im Englischen wird der Begriff „watercolor“ verwendet, um dieses Malverfahren zu bezeichnen. Bei der wortwörtlichen Übersetzung dieses Begriffs in die deutsche Sprache, erhält man den Begriff „Wasserfarben“. Das Ergebnis und das verwendete Material der Malerei mit „Wasserfarben“ ist nicht mit der Malerei mit „Aquarellfarben“ gleichzusetzen. Da es in diesem Aufsatz um die Technik der Aquarellmalerei geht, welche im Englischen mit „watercolor“ übersetzt wird, werde ich in dieser Ausarbeitung den Begriff Aquarell verwenden, auch wenn in deutschen Artikeln und Veröffentlichungen zu nicht-photorealistischem Rendern oft von „Wasserfarben“ die Rede ist.

3 Betrachtung aus der Sicht der Malerei

3.1 Besonderheiten der Aquarellmalerei

Um einen Einstieg in die Aquarellmalerei zu erhalten, wird im folgenden ein kurzen Eintrag aus einem Kunstlexikon vorgestellt:

> »Aquarellmalerei ist eine Maltechnik, bei der Farbe durchscheinend (lasierend) aufgetragen wird. Mischen mit deckendem Weiß wird vermieden. Helligkeit und Dunkelheit ergeben sich durch die Farbtöne und die Dichte des Farbauftrages. Die hellen Partien malt man zuerst. Meist wird mit Bleistift zart vorgezeichnet, diese Vorzeichnung bleibt oft stehen.« [2]

Eine wichtige Erweiterung dessen gibt folgender Satz aus [3]

> »Es gehört zum Wesen dieser Maltechnik, dass sie auf Zeichnung und Linie weitgehend verzichtet und den Malgrund als Form qualifiziert.«

3.2 Entwicklung der Aquarellmalerei in der Kunst

Im Zuge der Beschäftigung mit computergenerierten Aquarelleffekten sollte auch die Entstehung und geschichtliche Entwicklung der traditionellen Aquarellmalerei von Interesse sein. Deshalb wird nachfolgend ein kurzer geschichtlicher Überblick gegeben:
Am ehesten verbunden ist die Aquarellmalerei mit dem Namen Albrecht Dürer, mit der Kunst Englands und dem Expressionismus. Als selbständige Gattung entstand sie nach Vorstufen im frühen 16.Jh. erst Ende der Neuzeit. Als bekannteste Arbeiten aus dem 16.Jh. sind die Tier-, Pflanzen-, und Landschaftsdarstellungen von Albrecht Dürer zu nennen. Ein eigenständiger Bildtypus wurde die Aquarellmalerei erst im 19. Jh. durch die Kunst Englands. Hier traten vor allem William Turner und Paul Sandby hervor, bei denen nun auch die vollständige Effektpallette zum Einsatz kam. Im Expressionismus war es v.a. der „Blaue Reiter“, der die Gestaltungsmöglichkeiten des Aquarells nutzte. Als klassisches Beispiel sind hier die Aquarelle von Wassily Kandinsky zu nennen.

3.3 Eigenschaften der Aquarellfarben

Um Aquarellfarben effektiv und natürlich zu simulieren, ist es sowohl wichtig die physikalischen Eigenschaften des Mediums als auch die charakteristischen Phänomene zu studieren, wodurch sie bei den Künstlern beliebt sind. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 3.3.1 die Zusammensetzung des Materials, wobei sowohl das Papier und als auch die Farbe selbst untersucht werden muss, und in Abschnitt 3.3.2 werden die Effekte, die damit zu erzielen sind, detailliert beschrieben.

3.3.1 Zusammensetzung und Eigenschaften des Materials

Papier: Das Papier ist nicht aus Holz gemacht, sondern aus Leinen oder Baumwolle, die in Mikrofasern gepresst sind. Daher ist es lockerer als normales Papier und es ist mehr Luft darin enthalten. Es zeichnet sich aus durch eine hohe Saugfähigkeit. Diese ist so stark, dass das Papier zusätzlich imprägniert werden muss, um die Diffusion von Flüssigkeiten zu verringern. Eine charakteristische Eigenschaft des Papiers ist die raue Oberfläche.

Pigmente: Bei den Pigmenten handelt es sich um festes Material in Form von kleinen separaten Partikeln. Sie variieren in:

- *Dichte:* Leichtere Pigmente bleiben länger im Wasser als schwere, wobei sich diese weiter auf dem Papier ausbreiten.
- *Einfärbekraft:* So wird die Fähigkeit der Pigmente bezeichnet, an den Fasern des Papiers haften zu bleiben.
- *Körnigkeit:* Aufgrund dieser können sich manche Partikel in den Vertiefungen des rauen Papiers ablagern.
  Oder *Anhäufung:* Mehrere Partikel verklumpen miteinander, was für gewöhnlich durch elektrische Aufladungen verursacht wird.
  Beide Phänomene verursachen das gleiche äußere Erscheinungsbild.

Zusätzlich sind in der **Farbe** Bindemittel und Tenside enthalten. Das erstere macht es möglich, dass die Pigmente am Papier haften bleiben. Die Tenside ermöglichen es dem Wasser in das imprägnierte Papier einzudringen.

3.3.2 Aquarelltechniken und -effekte

Das Aussehen der Aquarellfarben ergibt sich aus dem Zusammenspiel zwischen der Bewegung der unterschiedlichen Pigmente in einer Flüssigkeit, der Adsorption dieser Pigmente durch das Papier und dem letztendlichen Eintrocknen der Flüssigkeit.
Diese Interaktionen führen zu einer breiten Vielfalt an Effekten.

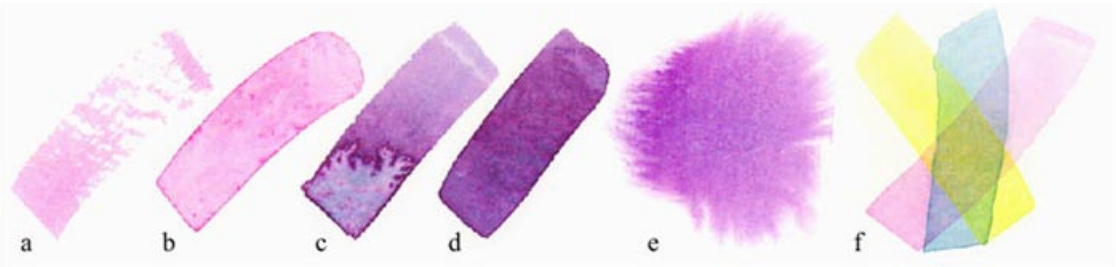


Abbildung 1: handgemalte Aquarelleffekte: (a)Trockenmaleffekt, (b)Abdunkelung der Kanten, (c)„Backruns“, (d)Granulation, (e)Flussmuster (f)Anwendung der Lasurtechnik

Grundsätzlich sind zwei Basistechniken zu unterscheiden:

- *Nassverfahren:* Das Papier ist vor dem eigentlichen Malvorgang schon mit Wasser vollgesogen, so dass der Farbauftrag sich nach allen Richtungen frei ausbreiten kann.
- *Trockenverfahren:* Es wird auf das trockene Papier gemalt. An der Flüssigkeit bildet sich eine Oberflächenspannung aus, die sie daran hindert sich frei auszubreiten.

Diese Basistechniken führen zu folgenden grundlegenden Effekten, die auch in Abb. 1 (a)-(e) dargestellt sind:

- *Trockenmaleffekte:* Die Farbe wird mit ganz wenig Wasser aufgetragen, so dass nur die Spitzen der rauen Papieroberfläche gefärbt werden. Auf diese Weise bekommt der Strich ausgefranste Kanten und eine unregelmäßige Füllung.
- *Abdunkelung der Kanten:* Wenn die Farbe auf eine trockene Oberfläche aufgetragen wird, kann sie sich durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit nicht frei ausbreiten. In einem allmählichen Prozess beginnen die Pigmente von innen nach außen zu wandern, bis die Flüssigkeit getrocknet ist. Auf diese Weise entstehen dunklere Ränder. (Erläuterung des physikalischen Vorgangs in Abschnitt 4.1.1 unter „Abunkelung der Ränder“)
- *„Backruns“:* Diese treten auf, wenn Wasser in eine feuchte Region eintritt, in der das Wasser vollständig aufgesogen ist, aber noch nicht vollständig eingetrocknet. Dort entstehen dann komplex verzweigte Strukturen.
- *Granulation und Separation:* Durch die raue, hügelige Papieroberfläche kann es vorkommen, dass sich Pigmente an bestimmten Stellen, vorzugsweise in den Tälern anhäufen. Dadurch entstehen dunklere Farbflecken auf dem Papier. Die Ausprägungsstärke der Granularität hängt von der Stärke der Pigmente ab und ist am auffälligsten, wenn das Papier nass ist.
- *Flussmuster:* Diese bilden sich unter Anwendung des Nassverfahrens aus. Kennzeichen hierfür sind ausgefranste Kanten.

Die Beschaffenheit der Aquarellfarben führt zu einer weiteren wichtigen Technik (vgl. Abb. 1 (f)):

- *Lasieren:* Hierbei werden verschiedene dünne Schichten der Aquarellfarbe übereinander gelegt. Jede Schicht wird aufgetragen, nachdem die darunter liegende getrocknet ist. Da die Schichten transparent sind, scheinen die unteren jeweils durch und es ergeben sich neue Farben.

4 Computergenerierte Aquarelleffekte

Nach der Analyse des zu verwendenden Materials und der Aufzählung der möglichen Effekte, kann damit begonnen werden, zu untersuchen wie es möglich ist, Aquarelleffekte per Computer zu generieren.

Hierfür gibt es zwei grundlegend unterschiedliche Ansätze:

1. Es kann versucht werden auf der Grundlage der physikalischen Eigenschaften des Materials, die traditionelle Maltechnik möglichst genau zu simulieren.

2. Eine zweite Herangehensweise ist eher von experimenteller Art. Es werden die möglichen optischen Ergebnisse betrachtet und davon ausgehend überlegt, wie diese so genau wie möglich nachzuahmen sind. Hierbei hat der Weg, der zum Ergebnis führt, in der Regel nichts mit der Maltechnik zu tun.

Zu *Punkt 1* sind vor allem wissenschaftliche Arbeiten bekannt, die aufeinander aufbauen. Dabei handelt es sich zum einen um einen Artikel von David Small mit dem Titel „Simulating watercolor by modeling diffusion, pigment and paper fibers“, der 1991 erschienen ist [4]. Das dort vorgestellte Verfahren wird von Cassidy J. Curtis et al. 1997 in dem Artikel „Computer-Generated Watercolor“ [5] erweitert. Aus diesem Grund wird nachfolgend nur der aktuellere Artikel betrachtet. Veröffentlichungen nach 1997 sind zu dem Thema Aquarelleffekte kaum zu finden. Die Tatsache, dass der Artikel von Cassidy J. Curtis et al. in jüngeren Arbeiten zu dem Thema „Nicht-photorealistisches Rendern“ oft zitiert wird, lässt den Schluss zu, dass es sich hierbei auch heute noch um die wichtigste Quelle handelt.

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass zum *Punkt 2* bis zum jetzigen Zeitpunkt keine wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema Aquarelleffekte vorliegen. Diese Herangehensweise liegt oft den Filtern der kommerziellen Produkten zugrunde. Es liegt natürlich nicht in deren Interesse etwas über das Zustandekommen der Effekte in die Öffentlichkeit zu tragen. Aus diesem Grund kann zu Punkt zwei nur ein Vergleich der Ergebnisse und Einstellungsmöglichkeiten einiger kommerzieller Produkte vorgenommen werden. Zu diesem Zweck wurden zwei Produkte exemplarisch ausgewählt.

4.1 Simulation unter Beachtung der physikalischen Eigenschaften

In diesem Abschnitt wird das Verfahren zur Generierung von Aquarelleffekten vorgestellt, dass Curtis et al. 1997 in dem Artikel „Computer-Generated Watercolor“ [5] veröffentlicht hat.

Dort wird versucht die in Abschnitt 3.3.2 aufgezeigten Effekte möglichst genau nachzustellen, indem der physische Prozess und das optische Verhalten so exakt simuliert werden,

wie es zum Erreichen der Effekte notwendig ist. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 gezeigt.

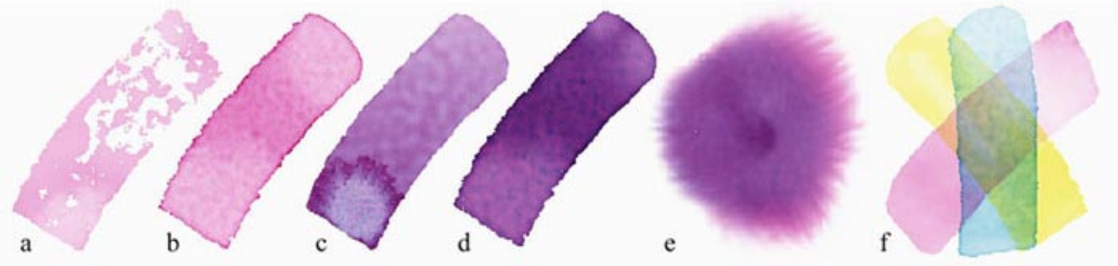


Abbildung 2: computergenerierte Aquarelleffekte: (a)Trockenmaleffekt, (b)Abdunkelung der Kanten, (c)„Backruns“, (d)Granulation, (e)Flussmuster (f)Anwendung der Lasurtechnik

Motiviert durch die Möglichkeit der lasierenden Maltechnik beim Aquarellieren, wird ein Bild zunächst in mehreren Schichten modelliert, die zum Schluss kombiniert werden. Jede Schicht wird unabhängig erstellt und kann beliebig viele Pigmente enthalten. Die zu den einzelnen Schichten gehörigen Größen werden in einer speziellen Datenstruktur gespeichert, die „Glasur“ genannt wird. Die einzelnen Glasuren werden durch eine Flusssimulation erstellt, welche das Ausbreiten der Flüssigkeit auf dem Papier simuliert. Dafür werden Parameter zur Kontrolle der physikalischen Eigenschaften jedes einzelnen Pigments, des Papiers und des Wasserfarben-Mediums benötigt. Darüber hinaus wird eine „wet-area“ Maske verwendet, die angibt, wo sich das Wasser ausbreiten darf. Um die Pigmente zur entgültigen Farbwirkung zu kombinieren, wird das Kubelka-Munk-Farbmodell verwendet.

4.1.1 Flusssimulation

Zur Erzeugung jeder einzelnen Schicht, bzw. Glasur wird ein Modell verwendet, dass aus drei Lagen besteht. Im folgenden sind diese von der obersten beginnend bis zur untersten Lage aufgeführt. Zur Anschauung kann auch Abb. 3 betrachtet werden.

1. *„Shallow-water layer“:* In dieser Lage wird simuliert auf welche Art und Weise sich das Wasser und die darin enthaltenen Pigmente über die Papieroberfläche bewegen.

2. *„Pigment-deposition layer“:* Solange eine Wasserschicht auf dem Papier existiert können sich Pigmente auf der Papieroberfläche ablagern und durch den Wasserfluss beeinflusst zu bestimmten Zeitpunkten wieder ins Wasser zurückgegeben werden. Dies wird in dieser Lage simuliert.

3. *„Capillary layer“:* Diese dritte Lage wird benötigt, um die Ausbreitung des Wassers im Papier zu simulieren, wodurch Kapillareffekte ausgelöst werden. Diese Lage wird allerdings nur benutzt, wenn „Backrun“-Effekte simuliert werden sollen.

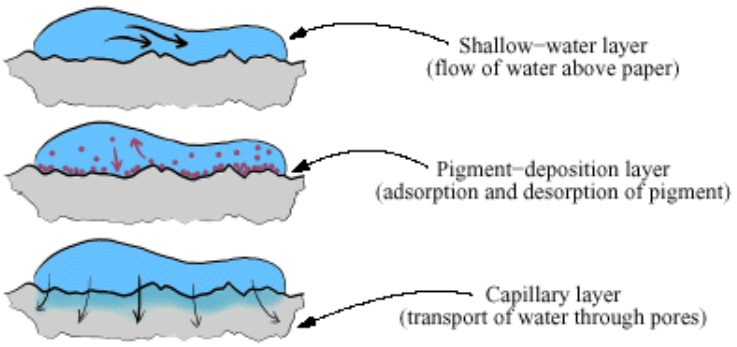


Abbildung 3: Drei-Lagen-Modell zur Erstellung einer einzelnen Farbschicht

Zur Umsetzung der verschiedenen Lagen sind eine Reihe von Parametern erforderlich. Folgende Größen werden verwendet:

- M: „wet-area“ Maske, wobei 1 bedeutet, dass das Papier nass ist und 0 trockenes Papier anzeigt.
- u, v: Geschwindigkeit, die in x und y Richtungsangegeben wird.
- p: Wasserdruck, welcher verwendet wird, um die Höhe des Wassers vernachlässigen zu können. Das Wasser wird als Fläche angenommen.
- g^k: Konzentration jedes Pigments k im Wasser. Diese Größe wird im *„Shallow-water layer“* verwendet.
- d^k: Konzentration jedes Pigments k auf dem Papier. Diese Größe entspricht g^k im *„pigment-deposition layer“*.
- ∇h: Gefälle der rauen Papieroberfläche, welches als Gradient über der Papierhöhe h berechnet wird.
- s: Sättigung des Papiers mit Wasser.
- c: Wasseraufnahmekapazität des Papiers.

Sowohl s als auch c sind Größen, die nur im *„Capillary Layer“* zum Einsatz kommen.

Des weiteren werden Eigenschaften der Aquarellfarben benötigt:

- m, k: „viscosity“ und „viscous drag“ sind Größen, die die Zähflüssigkeit bestimmen.
- r, w, g: Dichte, Färbekraft, Granularität sind Eigenschaften, die zu jedem einzelnen Pigment festgelegt werden müssen. Diese bestimmen Adsorption und Desorption von Pigmenten und beeinflussen somit die Werte g^k und d^k.

Generierung des Papiers: Im Vergleich zu anderen Malverfahren spielt bei Aquarellmalerei der Malgrund eine sehr wichtige Rolle. Denn die Struktur und das Material des Papiers bestimmen den Fluss und die Aufnahme des Wassers und beeinflussen dadurch die verschiedenen Effekte. Daher ist es notwendig auch bei der Simulation unterschiedliche Eigenschaften für das Papier festzulegen. Da der physikalisch korrekte Mechanismus sehr komplex ist, wird hier ein vereinfachtes Modell verwendet:
Die Papierstruktur wird durch ein Feld mit verschiedenen Höhen (h: „Höhenfeld“) und ein Flüssigkeitskapazitätsfeld (c) dargestellt. Das Höhenfeld h wird durch einen Pseudozufallsgenerator [6, 7] erzeugt und so skaliert, dass $0 < h < 1$. In Abb. 4 sind einige auf diese Weise entstandene Papiertexturen dargestellt.
Die zweite Größe, das Flüssigkeitskapazitätsfeld c, kann aus h berechnet werden:
$c = h * (c_{max} - c_{min}) + c_{min}$.

Abbildung 4: Beispiele für Papiertexturen

Hauptprozedur: Die verwendete Hauptprozedur setzt sich aus vier Methoden zusammen. Es wird jeweils eine Methode zur Simulation der Wasserbewegung (*MoveWater ()*) und der Pigmentbewegung (*MovePigment ()*) aufgerufen. Eine weitere Methode (*TransferPigment ()*) ist für die Ablagerung und Aufschwemmung der einzelnen Pigmente zuständig. Aus diesem Grund muss hier auch für jedes der n Pigmente die Konzentration im Wasser (g^k) und auf dem Papier (d^k) übergeben werden. Um den Kapillarfluss zu simulieren, wird noch eine weitere Methode (*SimulateCapillaryFlow()*) benötigt, die eine Erweiterung der „wet-area“ Maske M bewirken kann. Die Verdunstung des Wassers, durch die ein natürliches Endkriterium der Schleife bestünde, wird in diesem Modell nicht simuliert. Hier wird stark vereinfacht. Die Iteration findet über einer festen Anzahl vorgegebener Zeitstufen statt.

Demnach sieht die Hauptprozedur der Flusssimulation folgendermaßen aus:

proc MainLoop $(M, u, v, p, g^1, ..., g^n, d^1, ..., d^n, s)$:
    for each time step **do**:
        MoveWater (M, u, v, p)
        MovePigment $(M, u, v, g^1, ..., g^n)$
        TransferPigment $(g^1, ..., g^n, d^1, ..., d^n)$
        SimulateCapillaryFlow (M, s)
    end for
end proc

Bewegung des flachen Wassers im „Shallow water layer“: Um wirklichkeitsgetreue Effekte erzielen zu können, soll das Verhalten von Wasser folgenden Bedingungen genügen:

1. Der Fluss muss so eingeschränkt werden, dass das Wasser in der „wet-area“ Maske bleibt.
2. Ein überschuss an Wasser auf einer Fläche soll einen Fluss in anliegende Regionen verursachen.
3. Der Fluss muss gedämpft werden, um Wellen zu vermeiden.
4. Der Fluss muss durch die Texture des Papiers durcheinandergewirbelt werden, um Streifen parallel zur Flussrichtung zu verursachen.
5. Lokale Veränderungen sollen sich global auswirken.
6. Es sollte ein Fluss vom Inneren der Flüssigkeit zu den Ecken stattfinden, um den Abdunkelungseffekt der Kanten hervorzurufen.

Diese sechs Bedingungen sind in folgender Prozedur umgesetzt:

proc MoveWater (M, u, v, p):
  UpdateVelocities (M, u, v, p)
  RelaxDivergence (M, u, v, p)
  FlowOutward (M, p)
end proc

Aktualisieren der Wassergeschwindigkeiten: Die ersten beiden Bedingungen, die zu Beginn diese Abschnitts vorgestellt werden, können durch die Basisgleichungen für die Simulation des zweidimensionalen Flusses von flachem Wasser erfüllt werden. Es handelt sich dabei um partielle Differentialgleichungen, bekannt als das physikalische Moment oder Navier-Stokes Gleichungen. Sie sind direkt abgeleitet aus dem zweiten Newton'schen Gesetz[1]. Näheres hierzu kann in [8, 9, 10] gefunden werden.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(\frac{\partial u^2}{\partial x^2} + \frac{\partial uv}{\partial y^2}) + \mu \nabla^2 u - \frac{\partial p}{\partial x} \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -(\frac{\partial v^2}{\partial y^2} + \frac{\partial uv}{\partial x^2}) + \mu \nabla^2 v - \frac{\partial p}{\partial y} \tag{2}$$

[1] **2. Newton'sches Gesetz (Aktionsprinzip):** Wirkt auf einen Körper eine Kraft, so wird er in Richtung der Kraft beschleunigt. Die Beschleunigung ist der Kraft direkt, der Masse des Körpers umgekehrt proportional: $\overline{F} = m * \overline{a}$

Hinweis zu Gleichung 1, 2: Es werden die zu Beginn dieses Abschitts vorgestellten Größen verwendet. Als neue Größe kommt t, die Zeit, hinzu.

Diese Gleichungen werden bei Curtis et al. dazu verwendet, um die Wassergeschwindigkeiten zu aktualisieren. Dafür werden sie räumlich und zeitlich diskretisiert. Zur Speicherung wird ein sogenanntes versetztes Gitter (engl. „staggered grid“) verwendet. Ein Nachtteil dieser Diskretisierung ist, dass das Verfahren auflösungsabhängig wird. Dieses versetzte Gitter umfasst immer die Größe des gesamten Bildes. Charakteristisch für dieses Gitter ist die versetzte Speicherung. Hier werden die Werte innerhalb dieses Gitters folgendermaßen gespeichert: Die Geschwindigkeitswerte (u, v) werden im Zellinnern und alle anderen Werte, wie Druck p, Pigmentkonzentration g^k, usw. in den Knoten des Gitters abgelegt. Zugegriffen wird auf die Werte über gebrochene Indizes. Ein Beispiel hierfür: Um auf die Geschwindigkeit zwischen den Zellen (i, j) und $(i, j{+}1)$ zuzugreifen, gibt man $u_{i+.5,j}$ an. Der Wert wird durch Mittelwertbildung berechnet. Im Programm werden adaptive Zeitintervalle Δt verwendet, um sicherzustellen, dass zwischen zwei Iterationsdurchläufen kein Pixel übersprungen wird. Außerdem werden die Größen k (engl. „viscous drag“) und ∇h (Papierneigung) im Algorithmus mitberücksichtigt, wodurch die Bedingungen 3 und 4 erfüllt werden. Die Methode *EnforceBoundaryConditions ()* wird aufgerufen, um die Geschwindigkeit v aller Pixel auf 0 zu setzen, die nicht in der „wet-area“ Maske liegen.

proc UpdateVelocities (M, u, v, p):
  $(u, v) \leftarrow (u, v) - \nabla h$
  $\Delta t \leftarrow 1/\lceil max_{i,j}\{|u|, |v|\}\rceil$
  for $t \leftarrow 0$ to 1 **by** Δt **do**
    for all cells (i, j) **do**
      $A \leftarrow u_{i,j}^2 - u_{i+1,j}^2 + (uv)_{i+.5,j-.5} - (uv)_{i+.5,j+.5}$
      $B \leftarrow (u_{i+1.5,j} + u_{i-.5,j} + u_{i+.5,j+1} + u_{i+.5,j-1} - 4u_{i+.5,j})$
      $u'_{i+.5,j} \leftarrow u_{i+.5,j} + \Delta t(A - \mu B + p_{i,j} - p_{i+1,j} - \kappa u_{i+.5,j})$
      $A \leftarrow v_{i,j}^2 - v_{i,j+1}^2 + (uv)_{i-.5,j+.5} - (uv)_{i+.5,j+.5}$
      $B \leftarrow (v_{i+1,j+.5} + v_{i-1,j+.5} + v_{i,j+1.5} + v_{i,j-.5} - 4v_{i,j+.5})$
      $v'_{i,j+.5} \leftarrow v_{i,j+.5} + \Delta t(A - \mu B + p_{i,j} - p_{i,j+1} - \kappa v_{i,j+.5})$
    end for
    $(u, v) \leftarrow (u', v')$
    EnforceBoundaryConditions (M, u, v)
  end for
end proc

Umverteilung des Wassers: Je nach Richtung der Geschwindigkeit und Höhe der Flüssigkeit, wird ein Teil dieser in benachbarte Regionen abgegeben. Dazu wird die Prozedur *RelaxDivergence* (M, u, v, p)verwendet, welche Bedingung 5 der Flusssimulation erfüllt:

proc RelaxDivergence (u, v, p):
  $t \leftarrow 0$
  repeat
    $(u', v') \leftarrow (u, v)$
    $\delta_{max} \leftarrow 0$
    for all cells (i, j) **do**
      $\delta \leftarrow \xi(u_{i+1/2,j} - u_{i-1/2,j} + v_{i,j+1/2} - v_{i,j-1/2})$
      $p_{i,j} \leftarrow pi, j + \delta$
      $u'_{i+.5,j} \leftarrow u_{i+.5,j} + \delta$
      $u'_{i-.5,j} \leftarrow u_{i-.5,j} - \delta$
      $v'_{i,j+.5} \leftarrow v'_{i,j+.5} + \delta$
      $v'_{i,j-.5} \leftarrow v'_{i,j-.5} - \delta$
      $\delta_{max} \leftarrow max(|\delta|, \delta_{max})$
    end for
    $(u, v) \leftarrow (u', v')$
    $t \leftarrow t + 1$
  until $\delta_{max} \leq \tau$ **or** $t \geq N$
end proc

Die Methode funktioniert in der Art, dass nach jedem Zeitintervall die Abweichung des Geschwindigkeitsfeldes $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y$ gemessen wird. Wenn diese einen Toleranzwert τ überschreitet, wird die Flüssigkeit in benachbarte Regionen neu verteilt.

Abunkelung der Ränder: Folgende physikalische Erklärung steckt hinter dem Effekt der dunklen Ränder:
Wenn ein Tropfen einer Flüssigkeit auf eine trockene Fläche gegeben wird, zerfließt er nicht komplett, sondern bildet eine Kuppe aus. Dieser Tropfen wird durch eine Oberflächenspannung in Form gehalten. Die Flüssigkeit, die an den Rändern verdunstet, muss aus dem Zentrum ersetzt werden, um diese Spannung aufrecht zu erhalten. So ensteht ein Fluss vom Innern der Flüssigkeit zum Rand hin, mit welchem im Falle der Aquarellmalerei auch Pigmente mittransportiert werden. Wenn die Flüssigkeit vollständig getrocknet ist bleiben an den Rändern mehr Pigmente als in der Mitte zurück.
Da hier ein zwei-dimensionales Modell verwendet wird, wird der Fluss aus dem Innern insofern simuliert, dass der Druck am Rand der „wet-area“ Maske reduziert wird. Dies ist in der Prozedur *FlowOutward* (u, v, p) realisiert, welche Bedinging 6 erfüllt. In dieser Prozedur werden zuerst mit Hilfe eines Gaussion Blur-Filters die Ränder der nassen Fläche auf der „wet-area“ Maske bestimmt. Dann wird der Druck an diesen Stellen um einen bestimmten Wert vermindert.

Bewegung der Pigmente: Die Methoden, die bis jetzt vorgestellt wurden, bewegen die Flüssigkeit im „Shallow water Layer“. Natürlich müssen die Pigmente, die sich in der Flüssigkeit befinden entsprechend den in der Methode *MoveWater ()* berechneten Ge-

schwindigkeiten mitbewegt werden.
Dafür wird hier eine separate Methode eingesetzt:

proc MovePigment $(M, u, v, g^1, \ldots, g^n)$:
  $\Delta t \leftarrow 1/[max_{i,j}\{|u|, |v|\}]$
  for each pigment k **do**
    for $t \leftarrow 0$ **to** 1 **by** Δt **do**
      $g' \leftarrow g \leftarrow g^k$
      for all cells (i, j) **do**
        $g'_{i+1,j} \leftarrow g'_{i+1,j} + max(0, u_{i+.5,j}\, g_{i,j})$
        $g'_{i-1,j} \leftarrow g'_{i-1,j} + max(0, -u_{i-.5,j}\, g_{i,j})$
        $g'_{i,j+1} \leftarrow g'_{i,j+1} + max(0, v_{i,j+.5}\, g_{i,j})$
        $g'_{i,j-1} \leftarrow g'_{i,j-1} + max(0, -v_{i,j-.5}\, g_{i,j})$
        $g'_{i,j} \leftarrow g'_{i,j} - max(0, u_{i+.5,j} g_{i,j}) + max(0, -u_{i-.5,j} g_{i,j} +$
          $max(0, v_{i,j+.5}\, g_{i,j} + max(0, -v_{i,j-.5}\, g_{i,j})$
      end for
      $g^k \leftarrow g'$
    end for
  end for
end proc

Adsorption und Desorption der Pigmente: In jedem Iterationsdurchlauf werden bestimmte Pigmente in den „Pigment-deposition layer“ adsorbiert und andere Pigmente in das Wasser zurückgegeben. Wie oft und zu welchen Zeitpunkten dies bei den einzelnen Pigmenten geschieht, wird durch die Dichte, Färbekraft und Granularität bestimmt, was auch in der Methode *TransferPigment ()* nachvollzogen werden kann.

procTransferPigment$(g^1, \ldots, g^n, d^1, ..., d^n)$:
  for each pigment k **do**
    for all cells (i, j) **do**
      if $M_{i,j} = 1$ **then**
        $\delta_{down} \leftarrow g^k_{i,j}(1 - h_{i,j}\gamma^k) rho^k$
        $\delta_{up} \leftarrow d^k_{i,j}(1 + (h_{i,j} - 1)\gamma^k)\rho^k/\omega^k$
        if $(d^k_{i,j} + \delta_{down}) > 1$
          then $\delta_{down} \leftarrow max(0, 1 - d^k_{i,j})$
        if $(g^k_{i,j} + \delta_{up}) > 1$
          then $\delta_{up} \leftarrow max(0, 1 - g^k_{i,j})$
        $d^k_{i,j} \leftarrow d^k_{i,j} + \delta_{down} - \delta_{up}$
        $g^k_{i,j} \leftarrow g^k_{i,j} + \delta_{up} - \delta_{down}$
      end if
    end for
  end for
end proc

Kapillarflusssimulation: In feuchten Regionen, in denen das Wasser schon vom Papier aufgenommen wurde, jedoch noch nicht vollständig getrocknet ist, treten Kapillareffekte auf. Der Fluss wird von den Fasern des Papiers beeinflusst. Aus diesem Grund gelten hier nicht mehr die Basisgleichungen für den Fluss von flachem Wasser.
In dieser Methode wird eine Absorptionsrate α eingesetzt, über die bestimmt wird, wie viel Wasser vom „Shallow-water layer“ in das Papier aufgenommen wird. Bis ein Kapazitätswert c errreicht ist, wird Flüssigkeit von einer Zelle an die Nachbarn abgegeben. Wenn alle Zellen einen Schwellwert s überschreiten, wird die „wet-area“ Maske ausgedehnt. Aufgrund der verschiedenen Kapazitätswerte der einzelnen Pixel entstehen unregelmäßige verzweigte Muster.

proc SimulateCapillaryFlow(s, M):
  for all cells (i, j) **do**
    if $(M_{i,j} > 0)$ **then**
      $s_{i,j} \leftarrow s_{i,j} + max(0, min(\alpha, c_{i,j} - s_{i,j}))$
  end for
  $s' \leftarrow s$
  for all cells (i, j) **do**
    for each cell $(k, l) \in$ neighbors(i, j) **do**
      if $s_{i,j} > \epsilon$ **and** $s_{i,j} > s_{k,l}$ **and** $s_{k,l} > \delta$ **then**
        $\Delta s \leftarrow max(0, min(s_{i,j} - s_{k,l}, c_{k,l} - s_{k,l})/4)$
        $s'_{i,j} \leftarrow s'_{i,j} - \Delta s$
        $s'_{k,l} \leftarrow s'_{k,l} - \Delta s$
      end if
    end for
  end for
  $s \leftarrow s'$
  for all cells (i, j) **do**
    if $s_{i,j} > \sigma$ **then**
      $M_{i,j} \leftarrow 1$
  end for
end proc

Trockenmaleffekte: Trockenmaleffekte werden hier in der Weise realisiert, dass tiefer liegende Pixel durch einen vom Benutzer definierten Schwellwert ausgeschlossen werden können. Dieses Verfahren ist sehr vereinfacht und umfasst noch lange nicht alle möglichen Effekte, die mit der Methode des Trockenmalens erzielt werden können. Hier liegt ein Anknüpfpunkt für nachfolgende Entwicklungen.

4.1.2 Rendern des Bildes

Nachdem für jede Schicht die Flusssimulation durchlaufen wurde, müssen die einzelnen Pigmente zu einem Gesamtbild kombiniert werden, d.h. für jedes Pixel muss ein bestimmter Farbwert berechnet werden.

Festlegung der optischen Eigenschaften der Pigmente: Dazu wird hier eine Abwandlung des Kubelka-Munk Farbmodells [2] [11, 12] verwendet.
Dabei wird jedem Pigment eine Menge von Absorptionskoeffizienten K und eine Menge von Streuungskoeffizienten S zugewiesen. Diese Koeffizienten sind eine Funktion der Wellenlänge und kontrollieren die Brechung des Lichts, das absorbiert und gestreut wird. Im hier vorgestellten Verfahren werden drei Werte jeweils für S und K verwendet, die RGB repräsentieren.
Um die Bestimmung der Koeffizienten, die normalerweise über spektrale Messungen durch eine Lage von bekannter Dichte erfolgt, zu vereinfachen, werden diese durch Benutzereingaben bestimmt. Der Benutzer legt zwei Farbwerte für jedes verwendete Pigment fest, die angeben, wie die Erscheinung des Pigments über weißem und über schwarzem Hintergrund aussehen soll. Aus diesen zwei RGB-Werten, R_w und R_b, können mit Hilfe einer Inversion der Kubelka-Munk Gleichungen für jeden Farbkanal die Werte für K und S berechnet werden:

$$S = \frac{1}{b} * \coth^{-1}\left(\frac{b^2 - (a - R_w)(a-1)}{b(1-R_w)}\right), \qquad K = S(a-1) \tag{3}$$

$$mit \qquad a = \frac{1}{2}\left(R_w + \frac{R_b - R_w + 1}{R_b}\right),\ b = \sqrt{a^2 - 1} \tag{4}$$

Optisches Kombinieren der Pigmente: Mit Hilfe der Streuungs- und Absorptionskoeffizienten K und S und gegebenen Dichtewerten x können unter Verwendung des Kubelka-Munk Modells für jedes Pigment die Reflektionswerte R (engl. Reflectance) und T (engl. Transmittance) für die gesamte Fläche der einzelnen Glasuren berechnet werden. Dabei werden die Werte von g^k, welche die Konzentration der Pigmente im „Shallow water layer“ angeben und d^k, welche das gleiche im „Pigment deposition layer“ leisten, zu einem Dichteparameter x^k aufaddiert. Enthält eine Glasur an der gleichen Stelle mehrere Pigmente, so werden die Koeffizienten S und K eines Pigments k nach der relativen Dichte x^k dieses Pigments gewichtet und fließen so in die Berechnung von R und T für die gesamte Glasur mit ein. Die resultierende Dichte für die gesamte Glasur ist die Summe x der Dichten der einzelnen Pigmente.

[2] Die 1931 von Kubelka und Munk veröffentlichten Gleichungen geben den Zusammenhang zwischen Lichtabsorbtion (K), Lichtstreuung (S) und der Reflexion wieder. Die Lichtabsorption ist proportional der Konzentration der eingesetzten Farbmittel. Werden Pigmente als Farbmittel eingesetzt, ergibt sich die Lichtstreuung aus der Streuung des eingefärbten Materials und der konzentrationsabhängigen Streuung der eingesetzten Pigmente.

$$R = \sinh bsx/c \tag{5}$$

$$T = b/c, \qquad mit \qquad c = a \sinh bSx + b \cosh bSx \tag{6}$$

Darüber hinaus bietet das Kubelka-Munk Modell Gleichungen zur Bestimmung der resultierenden Reflektionswerten R und T für zwei angrenzende Schichten mit den Reflektionswerten R_1,R_2 und T_1,T_2. Diese Gleichungen werden für jede hinzukommende Schicht verwendet, um die endgültigen Refflektionswerte für das gesamte Bild zu erhalten. Aus diesen Werten können die Farbwerte für die einzelnen Pixel berechnet werden.

$$R = R_1 + \frac{T_1^2 R_2}{1 - R_1 R_2} \tag{7}$$

$$T = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2} \tag{8}$$

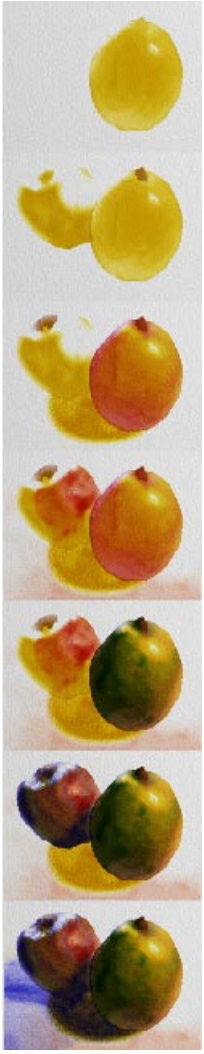
4.1.3 Applikationen

Umgesetzt wurde der Algorithmus in zwei vom Ansatz her unterschiedlichen Anwendungen. Die eine geht von einem leeren Papier aus und der Benutzer kann interaktiv, ähnlich einem traditionellen Maler, ein beliebiges Bild gestalten. Hier hat er die Möglichkeit mehrere Glasuren anzulegen, die nur ein Pigment oder direkt unterschiedliche Pigmente enthalten. Außerdem werden zu jeder Glasur Sublagen für Wasser und „wet-area“ Maske angelegt. Gemeinsam ist den einzelnen Glasuren eine schattierte Papiertextur. Natürlich können vielfältige Parameter wie Zähflüssigkeit der Farben, Abdunkelung der Kanten und Pinselgröße eingestellt werden.
Eine andere Anwendung erlaubt es ein gegebenes Bild in ein Aquarell umzuwandeln. Dabei wird so vorgegangen, dass zuerst Schlüsselelemente extrahiert werden. Danach läuft der Konvertierungsprozess ab, der zwei Schritte umfasst, die Farbseparation und die Planung der Pinselstriche. Im ersteren wird die Idealverteilung der unterschiedlichen Pigmente berechnet, um möglichst genau die Farben des Eingabebildes zu erhalten, d.h. es wird untersucht welche Kombination von verschiedenen Grundpigmenten genau die Zielfarbe ergibt. Hierzu müssen mit Hilfe des KM-Modells verschiedene Kombinationen von Pigmenten getestet werden. Im Anschluss werden Glasuren angelegt, die jeweils ein Pigment pro Glasur enthalten. Im zweitgenannten Prozess kann der Benutzer die Konzentration und den Fluss der Pigmente beeinflussen, indem er Pinselstriche zieht und Wasser hinzufügt oder Farbe hinwegnimmt.

Ergebnisse, die unter Verwendung der Applikationen entstanden sind, sind auf den Abbildungen 5 gezeigt.

(a)

(b)



(c)

Abbildung 5: Beispiele (a)Ausgangsbild, (b)computergenerierte Aquarellbild, (c)Stufen des Renderingrozesses

4.2 Filter „Aquarelleffekt“ in kommerziellen Produkten

Zum Vergleich der Resultate von Filtern in kommerziellen Produkten wurden zwei bekannte und weit verbreitete ausgewählt. Hierbei handelt es sich um „Adobe PhotoShop“ (Version 5.5) und „Corel PhotoPaint“ (Version 9). In beiden Softwareprodukten ist ein Filter zur automatischen Umwandlung eines beliebigen Ausgangsbildes in ein Bild mit Aquarelleffekt vorhanden. Dazu stehen dem Benutzer verschiedene Parameter zum Einstellen zur Verfügung. Zum Vergleich wurden verschiedene Ausgangsbilder mit unterschiedlichen Motiven ausgewählt, auf welche die Filter beider Produkte angewendet wurden. Bei beiden wurden unterschiedliche Parametereinstellungen getestet(s. Abb. 8- 11)

4.2.1 Beschreibung der Filter

Bei **„Corel Draw PhotoPaint“** ist der Filter unter „Effekte → Künstlerische Striche → Wasserfarben“ zu finden. Dort stehen fünf Schieberegler zum Einstellen der Parameter bereit:

- *Pinselgröße*: legt die Größe des Pinselstrichs fest
- *Körnung*: legt die Körnung des Papiers fest
- *Wassermenge*: legt die Wassermenge im Pinselstrich fest
- *Randanschnitt*: legt den Grad des Randanschnitts des Pinselstrichs fest
- *Helligkeit*: legt die Lichtmenge im Bild fest

Bei **„Adobe PhotoShop“** kann der Benutzer einen Aquarellfilter unter „Filter → Kunstfilter → Aquarell...“ auswählen. Mit Hilfe von drei Parametern kann er das Erscheinungsbild variieren: „Details“, „Abdunkelungsbereich“, „Struktur“. In der Hilfe von „Adobe Photo Shop“ wird der Filter folgendermaßen beschrieben:

> »Malt das Bild als Aquarell unter Verwendung einer mittleren Werkzeugspitze, die mit Wasser und Farbe getränkt ist, und vereinfacht dadurch die Details in dem Bild. Wo an Kanten bedeutende Tonwertänderungen auftreten, wird die Farbe vom Filter gesättigt.«

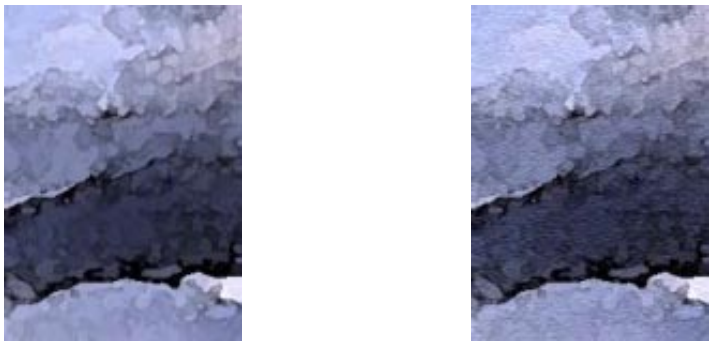
Das Gefühl ein echtes Aquarell vor sich zu haben kann man bei „Adobe Photo Shop“ dadurch verstärken, dass man eine Hintergrundstruktur hinzufügt (s. Abb. 7). Diese Option findet sich unter „Filter → Strukturierungsfilter → mit Struktur versehen“. Hier kann man zwischen mehreren vorgegebenen Strukturen wählen oder eine eigene Struktur laden. Für das Beispiel ist die Struktur „Sandstein“ gewählt worden, die den authentischsten Eindruck von Aquarellpapier erzeugt. Außerdem stehen als Parameter die Skalierung, das Relief und die Lichtposition zur Verfügung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit die Struktur umzukehren.

4.2.2 Kommentierung der Ergebnisbilder

Kommentar zu den Ergebnissen von „Adobe PhotoShop“(Abb.: 6 (c); 8 (c),(d); 9 (d); 10 (d)-(f); 11 (d)):
Bei Bildern mit einfachen Strukturen und hoher Helligkeit gelingt der typische Aquarelleffekt ganz gut. Bei Ausgangsbildern mit größerem Detailgrad und dunkleren Farben geht die Wirkung schnell verloren und die Bilder wirken fleckig. Die dunklen Flächen im Bild nehmen zu, während Feinheiten verloren gehen. Letzteres wird durch Mehrfachanwendung des Filters auf das gleiche Bild verstärkt. Es eignet sich bei Photoshop nicht jedes Bild dazu, wie ein Aquarell zu wirken. Es sind nur Bilder geeignet, die wenig Struktur, Feinheiten

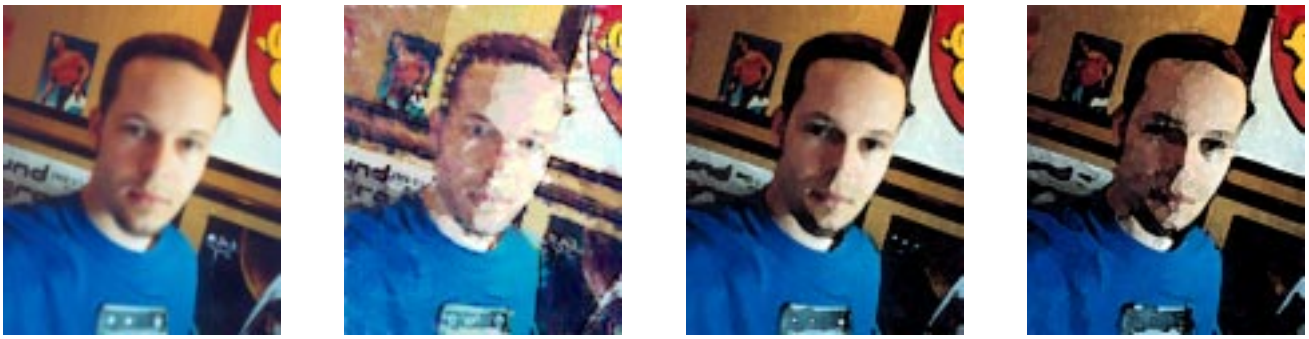
(a) (b) (c)

Abbildung 6: Motiv: Himmel; wenig Details, Struktur und Farbigkeit (a) Ausgangsbild, (b) verändert mit CD PhotoPaint, (c) verändert mit Adobe PhotoShop



(a) (b)

Abbildung 7: Motiv: Himmel; Hinzufügen einer Hintergrundstruktur (a) Ausgangsbild, (b) mit Hintergrundstruktur „Sandstein“

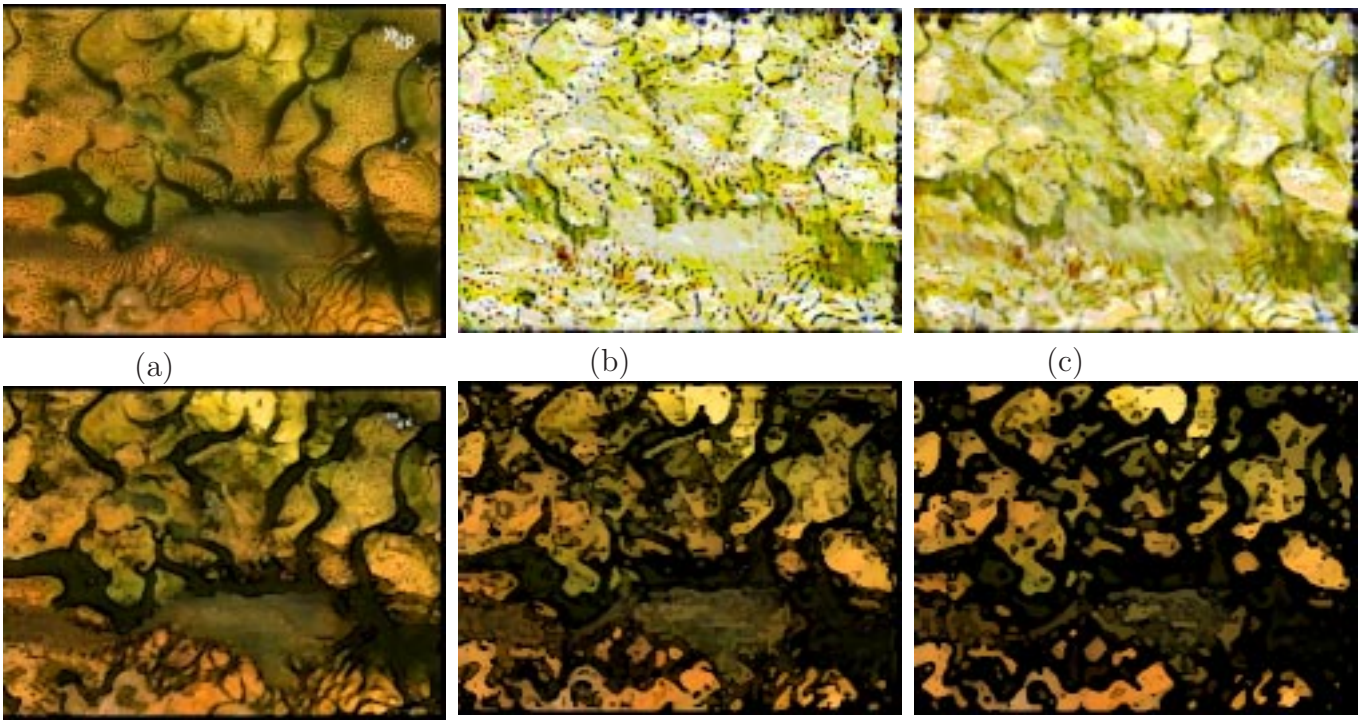


(a) (b) (c) (d)

Abbildung 8: Motiv: Person, unscharf, hell (a) Ausgangsbild, (b) verändert mit CD PhotoPaint, (c) verändert mit Adobe PhotoShop (einmalige Anwendung des Filters), (d) verändert mit Adobe PhotoShop (mehmalige Anwendung des Filters)

(a) (b) (c) (d)

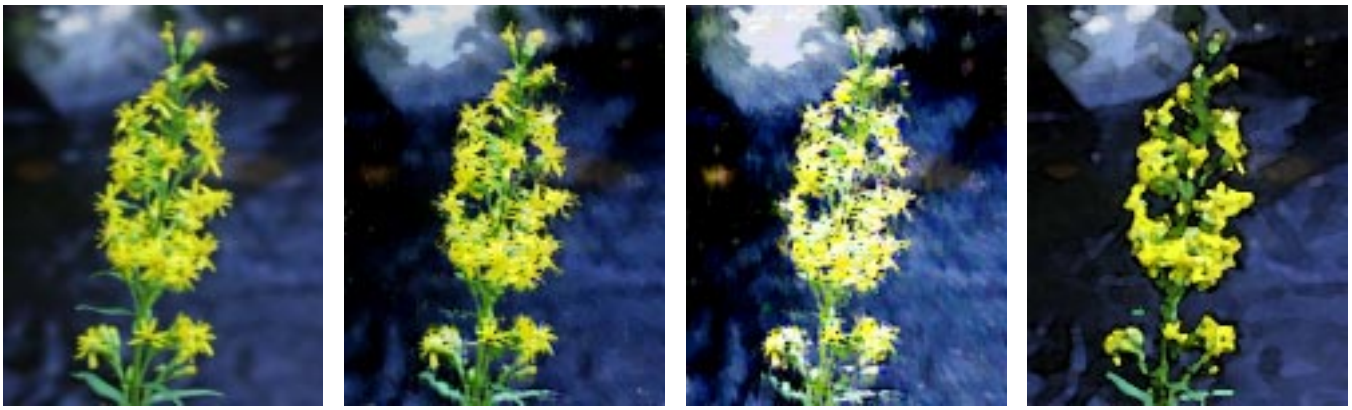
Abbildung 9: Motiv: Person, dunkel (a) Ausgangsbild, (b),(c) verändert mit CD PhotoPaint (unterschiedliche Parametereinstellungen), (d) verändert mit Adobe PhotoShop (einmalige Anwendung des Filters)



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Abbildung 10: Motiv: Wassertextur, einfache Strukturen (a) Ausgangsbild, (b) verändert mit CD PhotoPaint (kleiner Pinsel),(c) verändert mit CD PhotoPaint (großer Pinsel, mehr Wasser), (d)-(f) verändert mit Adobe PhotoShop (Anwendung des Filters: 1mal(bei (d))-3mal(bei (f))



(a) (b) (c) (d)

Abbildung 11: Motiv: Pflanze, viele Details, dunkler Hintergrund (a) Ausgangsbild, (b),(c) verändert mit CD PhotoPaint (unterschiedliche Parametereinstellungen), (d) verändert mit Adobe PhotoShop (einmalige Anwendung des Filters)

und Farbigkeit aufweisen. Darüber hinaus ist es notwendig, dass die Ausgangsbilder sehr hell sind.
Bei dem Filter „Wasserfarben“ von „Corel Draw“(Abb.: 6 (b); 8 (b); 9 (c),(d); 10 (b),(c); 11 (b),(c)) ist zu bemerken, dass zwar Bilder entstehen, die wie handgemalt wirken, diese mit einem Aquarell jedoch wenig zu tun haben. Es wird je nach Einstellung eher ein expressionistischer oder impressionistischer Effekt erzielt. Der Weißanteil in den entstandenen Bildern erscheint aufgetragen und nicht dadurch entstanden, dass der Malgrund durchscheit. Vielleicht hat „Corel Draw“ diesen Filter bewusst „Wasserfarben“ genannt und meint damit die Malerei mit „Wasserfarben“, wie wir sie im Deutschen verstehen. Hier ist ein Aufhellen der Farbe mit Deckweiß möglich und somit das Erzeugen solcher Bilder wie bei „Corel Draw“ realistisch.

4.2.3 Ein weiteres Malprogramm

Bessere Bilder mit Aquarelleffekt sollen mit folgendem Malprogramm erstellt werden können: Ein spezielles Malprogramm zur Simulation von realen Zeichen- und Malwerkzeugen stellt „Painter 7“ dar. Diese neue Version wurde unter Regie des Softwareherstellers „Corel“ entwickelt. Das neuartige an der Version 7 ist ein Wasserfarbensystem mit 40 Pinseln und zähflüssiger Tinte. Die Wasserfarben sind auf einer bel. Menge von Ebenen anwendbar. Beim Einsatz des Pinsels wird das Auseinanderlaufen der Farbe auf der Fläche realisiert. Als regulierbare Parameter sind Farb-, Wassermenge und Winkel vorhanden. Es sind Pinsel mit verschiedenen Funktionalitäten, wie Abtragen von Pigmenten, auftragen von Salz und Wasser vorhanden. Die Simulation der Aquarellfarben ist perfekt und die Ergebnisse sehr gut. Die Erstellung eines Bildes ist jedoch genauso schwer wie in der traditionellen Kunst [1].

Abbildung 12: Beispielbild erstellt mit „Painter 7“ von Corel, Quelle: [1]

5 Weiterführende und verwandte Entwicklungen

Zu „Aquarelleffekte“ selbst liegen keine weiterführenden oder direkt verwandten wissenschaftlichen Entwicklungen vor. Die jüngsten Entwicklungen zu nicht-photorealistischem Rendern beschäftigen sich u.a. mit der Anwendung der Verfahren für bewegte Bilder [13, 14] oder 3D-Szenen, bzw. virtuellen Umgebungen [15]. Hier wäre ein interessantes Ziel dies auch für Aquarelleffekte zu realisieren.
Es ist zu prüfen, ob die Verfahren, die dort für andere Malverfahren vorgestellt werden, und spezielle Probleme – hier ist im Zusammenhang mit Filmen und Animationen der „Shower door“-Effekt zu nennen –, die gelöst werden, auch für die Simulation von Aquarelleffekten in Frage kommen.
In dem Artikel „Painterly Rendering for Video and Interaction“ [14] wird z.B. eine Übermaltechnik vorgestellt. Diese ist zur Darstellung von Aquarelleffekten nicht sonderlich geeignet, da die einzelnen Schichten des Aquarellauftrags transparent sind. Ein Ansatzpunkt, der dem Herstellungsvorgang von Aquarellen näher kommt, wäre das Verlaufen der Farbe zu simulieren.

Literatur

[1] G. Himmelein. Wasserfarben mit undo. *C't Magazin für Computertechnik*, 17:66f, 2001.

[2] Hrsg.:J. Eucker. *Kunstlexikon: Kompaktwissen für Schüler und junge Erwachsene*. Cornelson Scriptor, Frankfurt am Main, 1995.

[3] Leitung: Wolf Stadtler. *Lexikon der Kunst*, volume 1. Herder, Freiburg, 1987.

[4] D. Small. Simulating watercolor by modfelling diffusion, pigment and paper fibres. *Proceedings of SPIE'91*, 1991.

[5] C. J. Curtis, S. E. Anderson, J. E. Seims, K. W. Fleischer, and D. H. Salesin. Computer-generated watercolor. In Turner Whitted, editor, *Siggraph 1997, Conference Proceedings*, pages 421–430. ACM Press / ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman, 1997.

[6] S. P. Worley. A cellular texturing basis finction. *SIGGRAPH'96 Proceedings*, pages 291–294, 1996.

[7] K. Perlin. An image sythesizer. *SIGGRAPH'85 Proceedings*, pages 287–296, 1995.

[8] N. Foster and D. Metaxas. Realistic animation of liquids. *Graphics Interface '96*, pages 204–212, 1996.

[9] J. A. Liggett. Basic equations of unsteady flow. In K. Mahmood and V. Yevjevich, editors, *Unsteady Flow in Open Channels*, pages 102–106, Fort Collins, Colorado, 1975. Water resources Publications.

[10] C. B. Vreudenhil. *Numerical Methods for Shallow-water Flow*. Kluwer Academis Publishers, 1994.

[11] C. S. Haase and G. W. Meyer. Modeling pigmented materials for realistic image sythesis. *ACM Trans. on Graphics*, 11(4):305, 1992.

[12] G. Kortum. *Reflectance Specttroscopy*. Springer, 1969.

[13] Aaron Hertzmann and Ken Perlin. Painterly rendering for video and interaction.

[14] B. J. Meier. Painterly rendering for animation. *SIGGRAPH'96 Proceedings*, pages 477–484, 1996.

[15] Allison W. Klein, Wilmot W. Li, Michael M. Kazhdan, Wagner T. Correa, Adam Finkelstein, and Thomas A. Funkhouser. Non-photorealistic virtual environments. In Kurt Akeley, editor, *Siggraph 2000, Computer Graphics Proceedings*, pages 527–534. ACM Press / ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman, 2000.