

# Nichtrealistische Computergraphik

## Algorithmen und Anwendungen

Oliver Deussen

**Die Computergraphik beschäftigt sich neben der Herstellung „echt“ wirkender Bilder neuerdings auch mit sog. nichtrealistischen Darstellungen.**

### 1 Einleitung

Seit Ende der 60er Jahre beschäftigen sich Computergraphiker mit der Herstellung von Bildern aus Computerdaten. Innerhalb der gut 30 Jahre sind

aus den anfänglichen Liniengraphiken durch immer komplexere Algorithmen Bilder geworden, die in vielen Fällen von Fotografien nicht mehr zu unterscheiden sind. Die Computergraphiker sprechen aus diesem Grund von fotorealistischen Bildern.

Betrachtet man aber traditionelle Printmedien, so fällt auf, dass die Bilder dort in den meisten Fällen keine Fotos sind, sondern abstraktere Darstellungen wie etwa Skizzen, Illustrationen oder Schemazeichnungen. Dies liegt nicht nur daran, dass es teurer wäre, Farbbilder zu drucken, sondern auch an der Art, wie solche Darstellungen ganz spezielle Informationen vermitteln.

Im Zuge der Digitalisierung wäre es also wünschenswert, die Erzeugung gezeichneter Darstellungen mit Computerhilfe durchzuführen, und das ist ein Grund, warum man in der Computergraphik nach über 30 Jahren wieder zu den Liniengraphiken zurückkehrt, mit denen alles anfang.

Freilich hat man heute einen höheren Anspruch. Ausgehend von der Heuristik, dass die traditionelle Zeichenkunst im Lauf der Jahrhunderte optimale Wege zur Erzeugung bildhafter Eindrücke mit so verschiedenen Techniken wie Kupferstichen oder Aquarellen schuf, versucht man in den letzten Jahren, solche Verfahren per Computer nachzubilden. Unter dem etwas missglückten Schlagwort

*Computergraphik, Bilderzeugung, Halftoning, nichtrealistische Bilderzeugung*

„nichtrealistische Computergraphik“ (NPR) werden diese Versuche zusammengefasst; besser spräche man von generalisierten graphischen Darstellungen, um anzudeuten, dass es sich um die Erweiterung der engen Fokussierung auf den Fotorealismus handelt.

Im Folgenden werden drei Verfahren vorgestellt, die auf der einen Seite demonstrieren, welche unterschiedliche Ansätze verwendet werden, um traditionelle Darstellungsmethoden nachzuempfinden, und wie man auf der anderen Seite versucht, sich von diesen Vorgaben zu lösen und Verfahren zu finden, die sich besonders für die teilweise oder vollständige Automatisierung generalisierter Darstellungen eignen.

Die beiden ersten Techniken sind Beispiele für die computergestützte Nachahmung traditioneller Techniken. Im ersten Beispiel wird die Erzeugung von kupferstichartigen Bildern beschrieben, im zweiten geht es um sog. punktierte Illustrationen, bei denen ein Bild aus einer Vielzahl sorgfältig platzierter Punkte zusammengesetzt wird. Beide Verfahren können zur Darstellung unterschiedlicher Objekte verwendet werden; das dritte Beispiel stellt eine Technik zur Darstellung von Pflanzen vor.

Bevor die Verfahren beschrieben werden, soll noch auf den Einwand eingegangen werden, computergestützte Zeichnungen und Illustrationen seien eigentlich gar nicht nötig, da ja Künstler hinreichend schnell (und auch billig) seien. Hierauf ist zu antworten, dass es nicht darum geht, Künstler zu erset-

Oliver Deussen  
Institut für Software- und Multimediatechnik,  
Fakultät für Informatik, TU Dresden, D-01062 Dresden  
E-Mail: deussen@inf.tu-dresden.de;  
<http://www.inf.tu-dresden.de/~od1>

## Nonrealistic rendering techniques

Since late eighties scientists in computer graphics elaborate nonrealistic rendering techniques in addition to realistic image generation. The present article gives an overview by describing three different techniques: computer generated copper plates as an example for the imitation of traditional printing techniques, synthetic stipple drawings for use in scientific illustration and pen-and-ink illustrations of plants with applications in landscaping.

zen, sondern vielmehr darum, ihnen neuartige Gestaltungswerkzeuge zur Hand zu geben. Der Einsatz der Techniken in multimedialen Dokumenten und insbesondere in Computeranimationen stellt eine Reihe von Anforderungen, denen ein traditionell hergestelltes einzelnes Bild nicht gerecht wird.

So sollten die Darstellungen räumliche Kohärenz aufweisen: Wird das abzubildende Objekt leicht verändert – beispielsweise im Raum gedreht –, so sollte sich das Bild des gedrehten Objekts nur minimal vom Ausgangsbild unterscheiden, andernfalls würden in einer Animation Flackereffekte auftauchen. Ferner sollten die Darstellungen für verschiedene Bildgrößen unterschiedlich ausfallen, sich aber kontinuierlich ineinander überführen lassen. Für die Realisierung beide Effekte benötigt man eine Vielzahl sorgfältig erzeugter einzelner Bilder, die sich von Hand nur äußerst schwer herstellen lassen.

Die Techniken stellen aus heutiger Sicht auch nur erste Schritte auf einem Weg zur Erzeugung besserer computergenerierter Darstellungen dar. Ist man momentan noch damit beschäftigt, eine Vielzahl verschiedener Darstellungsarten per Computer zu erzeugen, so sollten diese später in einer Art Werkzeugkasten zusammengefasst werden, aus dem der Benutzer die passende für eine bestimmte Abbildung und einen bestimmten Darstellungszweck auswählt. Hierbei können durchaus auch verschiedene Techniken in einem Bild kombiniert werden. Ziel ist es, für unterschiedliche Situationen die beste Darstellungsmethode zu finden und somit bildliche

Darstellungen, insbesondere auch in multimedialen Dokumenten, zu optimieren.

So gesehen ist die Beschäftigung mit nichtrealistischen Darstellungsmethoden nicht nur ein Steckenpferd unterbeschäftigter Computergraphiker, sondern soll die visuellen Ausdrucksmethoden am Rechner dem annähern, was in traditionellen Künsten seit Jahrhunderten verwendet wird.

## 2 Ausgewählte Forschungsarbeiten

Wie bereits erwähnt, stammen erste Algorithmen zur Herstellung von Liniengraphiken aus den Anfängen der Computergraphik, damals zur Darstellung geometrischer Daten auf den gebräuchlichen Vektorbildschirmen [1, 11]. Diese Verfahren wurden später verfeinert, als eigenständiges Thema wurde der Nichtrealismus aber erst Ende der 80er Jahre entdeckt. So stellte Strassmann ein Verfahren zur Simulation von Pinselstrichen vor, mit dem gemalt wirkende Bilder hergestellt werden konnten [20]. Diese Idee wurde später von Hsu und Lee [9] ausgebaut, so dass sich nun auch beliebige Muster erzeugen ließen.

Im Gegensatz zu den interaktiven Methoden entwickelten Saito und Takahashi [17] eine Methode zur Aufwertung von Computerbildern, in der konventionelle Farbdarstellungen durch Umrisslinien und Schraffuren verändert wurden. Das

Verfahren stellt einen der ersten Ansätze dar, bei der Abbildung von dreidimensionalen Objekten die anfallende Tiefeninformation zu nutzen. Diese Tiefenwerte werden pro Pixel gespeichert, mittels Bildverarbeitungsoperatoren werden daraus Umriss- und Schraffurlinien berechnet.

Die Gruppe um David Salesin an der University of Washington in Seattle erarbeitete Anfang der 90er Jahre verschiedene Verfahren zur Herstellung gezeichnet wirkender Bilder [18, 25, 26]. Ihr Konzept umfasste die Verwendung spezieller Texturen, die wie Schraffuren wirken (in der Computergraphik bezeichnen Texturen Bilder, die auf die Oberfläche von Objekten projiziert werden, um deren Erscheinung natürlicher wirken zu lassen). In den Arbeiten stehen nicht mehr die individuellen Linien im Vordergrund, sondern die Schraffuren werden als Ganzes erzeugt und behandelt.

Interessanterweise erschienen zur selben Zeit auch Arbeiten aus dem Gebiet des Image Science,

*Computer graphics,  
image generation,  
halftoning, nonrealistic  
rendering*

die sich mit künstlerischen Aspekten beim sog. Halftoning – der Abbildung von Computerbildern auf wenige Grundfarben für die Ausgabe auf Druckern – beschäftigen [14, 15]. Hier arbeitete man an der Erzeugung verschiedener Ausdrucksarten beim Drucken von Bildern. Aktuelle Arbeiten erweitern die Verfahren auf ornamentale Techniken und auf farbige nichtrealistische Bilddarstellungen.

In Deutschland wurde das Thema von Thomas Strothotte vorangetrieben. Sein noch weiter gehendes Interesse umfasst die Beziehung von bildlicher und textueller Information [21]. Untersuchungen zur Aussagekraft von Bildern führten ihn zu nichtrealistischen Darstellungen [22], deren Anwendung in Architektur und anderen Gebieten untersucht wurden [19]. Die mit Bildern und Texten verbundenen Fragen werden auch im Studiengang „Computervisualistik“ behandelt, der in Magdeburg und neuerdings auch in Koblenz belegt werden kann.

Ende der 90er Jahre explodierte die Anzahl Arbeiten zu nichtrealistischen Darstellungen. Im Jahre 1999 fand die erste internationale Konferenz zu diesem Thema statt, die ersten Bücher versuchen es methodisch zu fundieren [8, 23]. In Deutschland findet es zunehmend auch als Lehrgebiet innerhalb der konventionellen Computergraphik seinen Platz.

### 3 Synthetische Kupferstiche

Als erstes Beispiel für eine Technik zur Generierung einer nichtrealistischen Computergraphik dienen Kupferstiche. Ihre traditionelle Herstellung reicht in das 15. Jahrhundert zurück; seit dieser Zeit sind Kupferstiche zu einem Medium mit vielfältigen Ausdrucksformen geworden. Die Bilder zeichnen sich durch feine Schraffuren aus, die entlang der Bildkonturen geführt werden, und haben dementsprechend hohen Detailreichtum, der mit keiner anderen Technik früherer Jahre erreicht werden konnte.

Unser algorithmischer Ansatz zur Herstellung solcher Schraffuren interpretiert die Schraffurlinien als Schnitte zwischen der darzustellenden dreidimensionalen Geometrie und einer Schar von Ebenen [2]. Andere Verfahren verwenden Volumenfunktionen [12] oder Hauptkrümmungsrichtungen [10].

Die Verwendung von Schnittebenen hat den Vorteil, dass man die Ebenenschar auf eine Weise

spezifizieren kann, die den Linien ästhetisch ansprechende Formen verleiht. Hierzu wird das abzubildende Geometriemodell in einzeln zu schraffierende Teile zerlegt, für jedes dieser Teile wird eine Ebenenschar mittels eines graphischen Editors spezifiziert. Die Ebenen können hierbei parallel oder gegeneinander verkippt angeordnet sein. Anschließend werden die Schnittlinien berechnet; eine effiziente Implementierung unter Ausnutzung von Graphikhardware erlaubt hierbei hohe Geschwindigkeiten.

Die Schraffurlinien sollen durch ihre Form neben der Geometrie auch die Lichtverhältnisse wiedergeben. Dies wird bei Kupferstichen durch die Variation der Liniendicke erreicht. Algorithmisch gesprochen muss die Schwärzung durch die Linien derjenigen Schwärzung entsprechen, die ein konventionelles Abbild des Objekts erzeugt hätte. Jede Linie repräsentiert hierbei die Helligkeit in einem schmalen Band zwischen ihr und den angrenzenden Schraffurlinien.

Zur Herstellung des Kupferstiches wird daher ein konventionelles Bild des Objektes erzeugt und dessen Helligkeit auf die Dicke der Schnittlinien übertragen. Abbildung 1 zeigt ein Ergebnis dieser Vorgehensweise.

Im Zuge einer automatisierten Herstellung der Darstellungen wäre es freilich wünschenswert, die Lage der Ebenen durch den Rechner automatisch bestimmen zu lassen. Hierzu wurde ein Skelettierungsverfahren von Andreas Raab [16] verwendet, welches zu einem gegebenen Modell das Skelett in Form eines im Zentrum der Geometrie gelegenen Graphen ermittelt. Werden die Ebenen senkrecht zum Skelett ausgerichtet, so erhält man für viele Geometrien gute Schraffuren.

Allerdings sind bei stark gekrümmten Flächen die Schnittlinien an den Außenseiten so weit voneinander entfernt, dass die Verwendung von Zwischenlinien notwendig wird. Hierzu entwickelte Jörg Hamel [2] einen Algorithmus, der dies bei Beibehaltung der Gesamthelligkeit ermöglicht. Ein Ergebnis einer automatisch generierten Schraffur ist in Abb. 2 zu sehen.

Die bisher berechneten Bilder sind statisch, im nächsten Schritt müssen die Verfahren für dynamische Abbildungen erweitert werden. Hierbei ist zu beachten, dass es für jeden geschlossenen Körper und jede Ebenenschar Ansichten gibt, aus denen

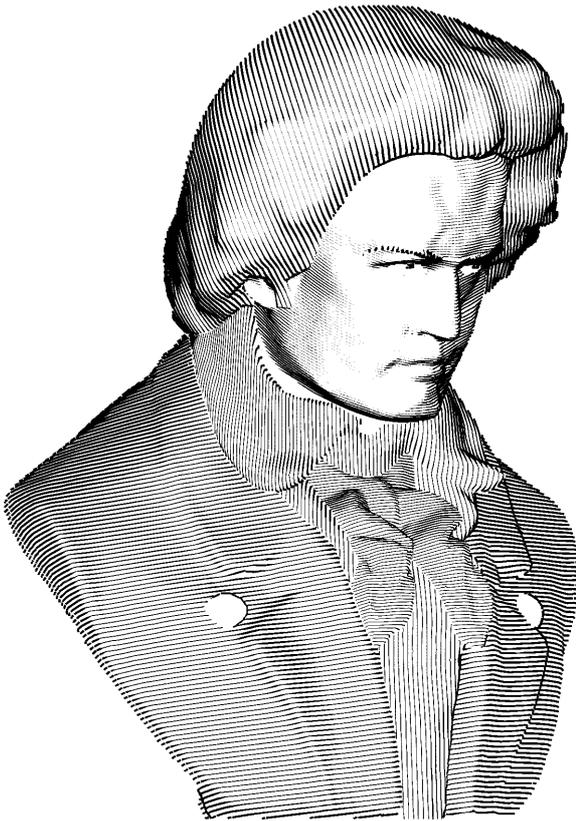


Abb. 1. Herstellung eines synthetischen Kupferstichs über Schnittlinien

man in sich geschlossene Schnittlinien sieht. Ein Schnitt einer Ebenenschar mit einer Kugel ergibt beispielsweise Kreise, die, wenn vollständig sichtbar, unschön aussehen. In realen wie synthetischen Kupferstichen lässt sich das durch geeignete Ausrichtung der Schraffurlinien vermeiden; in einer Animation mit Veränderung des Blickwinkels muss man den Effekt durch andere Methoden geeignet unterdrücken.

#### 4 Synthetische Punktierungen

Besonders in der wissenschaftlichen und technischen Illustration wird die Punktierung (engl.: stippling) für viele Darstellungen verwendet. Im Gegensatz zu Kupferstichen bilden jetzt anstelle von Linien feine Punkte die bildlichen Gestaltungselemente. Die Technik zeichnet sich durch eine außerordentliche Vielseitigkeit aus. Die Darstellungen sind aber schwer herzustellen, da viele tausend Punkte von Hand gesetzt werden müssen.

Die Punkte müssen gleichmäßig, aber ohne regelmäßige Muster platziert werden und, wie schon bei den Schraffurlinien in Kupferstichen, sowohl

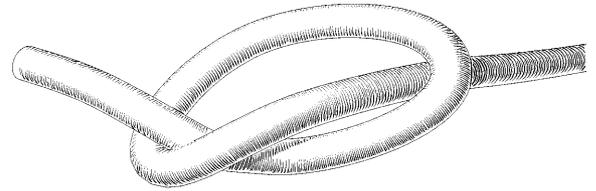


Abb. 2. Automatisch erzeugter Kupferstich mit Zwischenlinien. (Mit freundlicher Genehmigung von Jörg Hamel)

Geometrie als auch Helligkeit repräsentieren. Durch geeignete Wahl der Punktgröße und -form können ferner auch Materialeigenschaften angedeutet werden. So zeichnet man raue Materialien wie Stein mittels unrunder Punktformen, die durch geeignetes Papier oder spezielle Zeichenweisen entstehen.

In der algorithmischen Umsetzung dieses Verfahrens [4] analysierten wir die Punktverteilungen der Künstler und fanden heraus, dass es sich um sog. Poisson-Disc-Verteilungen handelt, Zufallsverteilungen, die einen garantierten Minimalabstand der Punkte zu ihren jeweils nächsten Nachbar besitzen. Über ein Relaxierungsverfahren auf der Grundlage von Voronoi-Gebieten war es uns möglich, ähnliche Verteilungen aus einer zufälligen Anfangspunktmenge zu erzeugen.

Das Voronoi-Gebiet eines Punktes enthält alle Punkte der Zeichenebene, die näher zum Punkt als zu einem seiner Nachbarn liegen. Für gängige Abstandsnormen sind die Grenzen der Voronoi-Gebiete in der Ebene konvexe Polygone. Wird der Punkt in einer Iteration fortgesetzt in den Schwerpunkt seines Voronoi-Gebietes verschoben (Lloyds Methode), so erhält man zentroidale Voronoi-Tessellierungen [7]; die zugehörigen Punkte entsprechen in diesem Fall einer Poisson-Disc-Verteilung.

Vorteilhaft an einem iterativen Vorgehen ist die Möglichkeit, die Relaxierung durch Randbedingun-

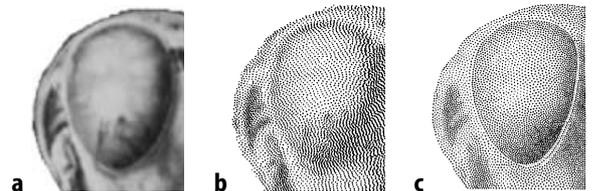
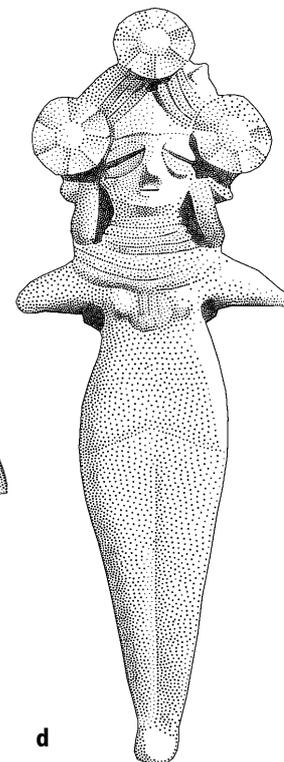
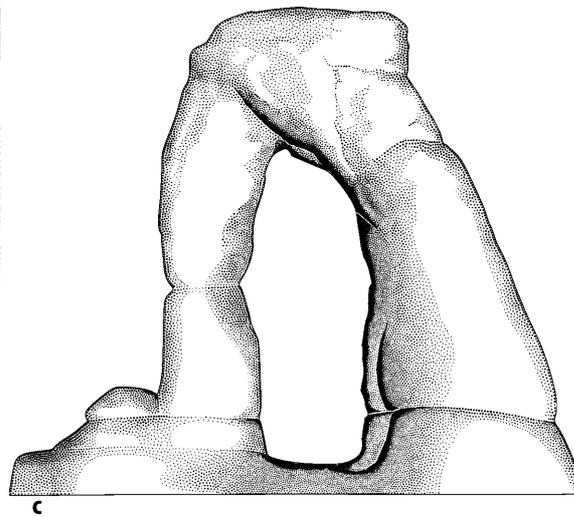
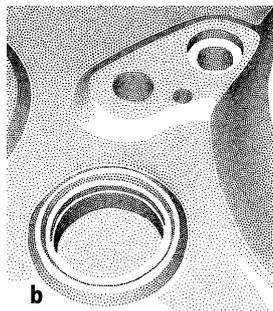
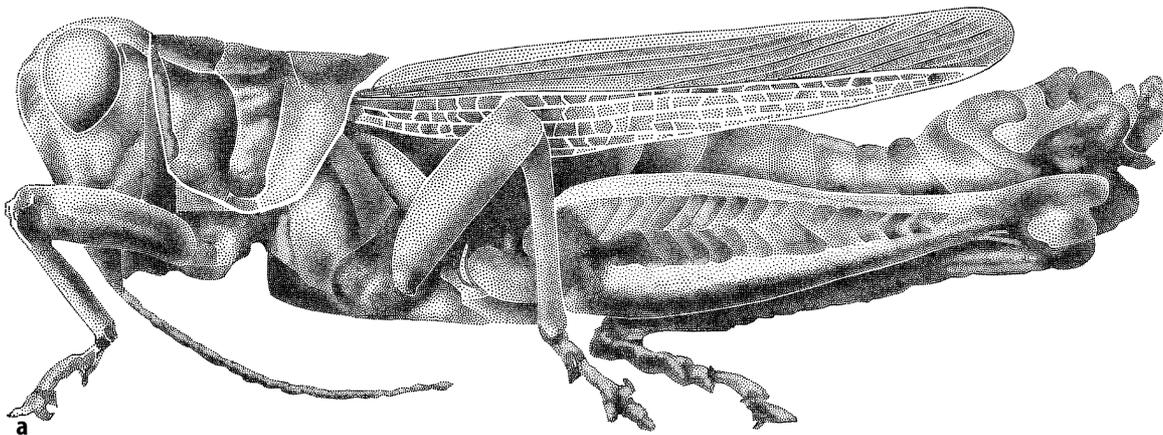


Abb. 3a–c. Herstellung von Punktierungen. a Ausgangsbild, b Punktverteilung nach Halftoning-Algorithmus, c fertige Punktmenge



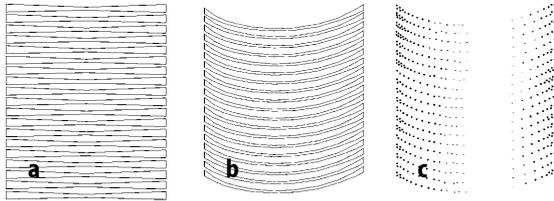
**Abb. 4a–c. Synthetische Punktierungen.** *a* Heuschrecke, hergestellt aus 60.000 Punkten, *b* Stippling als Halftoning-Methode bei einem Maschinenteil, *c* Steinbrücke, hergestellt aus 12.000 Punkten unterschiedlicher Größe und Form, *d* Terrakottastatue aus 6000 Punkten

gen fast beliebig beeinflussen zu können, ohne dass der Charakter der Punktmenge verloren geht. So entwickelte Stefan Hiller [4] einen graphischen Editor, bei dem der Benutzer durch „Pinsel“ verschiedene Operationen auf einer gegebenen Punktmenge ausführen kann. Die Punkte unter dem Pinsel wer-

den entweder relaxiert oder aber verwischt, verwackelt oder verklumpt.

Grundlage für die Erzeugung der synthetischen Punktierungen ist wieder ein konventionelles Bild, dessen Grauwerte später durch die Punkte der Illustration repräsentiert werden. Im Gegensatz zu den Schraffurlinien werden die dunkleren Stellen aber nur zum geringen Teil durch größere Punkte erzeugt, sondern meist durch eine höhere Punktdichte.

Solch eine Variation von Punktdichten wird auch mit den oben erwähnten Halftoning-Techniken erreicht, die man zum Drucken von Bildern auf konventionellen Druckern verwendet: Ein kontinu-



**Abb. 5a–c. Herstellung von Mustern. a Ausgangsregionen, b nachbearbeitete Regionen, c resultierende Punktmenge**

ierliches Bild wird in eine Menge von Punkten zerlegt, deren Dichte den Grauwert nachbildet [24]. Also modifizierten wir ein Halftoning-Verfahren und erzeugten auf diese Weise eine Ausgangsmenge von Punkten. Diese wird mit dem graphischen Editor so bearbeitet, dass der Eindruck einer Punktierung entsteht. In Abb. 3 ist der Vorgang dargestellt. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Möglichkeit für den Benutzer, die separat zu punktierenden Regionen nacheinander durch polygonale Umrandungen zu spezifizieren und die Relaxierung nur innerhalb der Umrandungen auszuführen. Die Punkte richten sich dann entlang der Ränder aus; auf diese Weise sind die charakteristischen scharfen Kanten einer punktierten Illustration zu erzeugen (Abb. 3c).

Mit dem Editor lassen sich selbst komplexe Punktierungen mit vielen tausend Punkten innerhalb weniger Stunden herstellen (Abb.4). Da man hierbei mit den Punktmengen spielen kann und nicht, wie bei der konventionellen Erzeugung, ein einmal gesetzter Punkt nur noch schwer zu entfernen ist, können neue Ideen ausprobiert und einmal gespeicherte Versionen zurückgeladen werden.

Das Verfahren zur Modellierung mit Punkten kann auch zur Positionierung von Pflanzen in Ökosystemen verwendet werden, wie von Deussen et al. [3] gezeigt wurde. Hierbei haben die Spezies unterschiedliche statistische Punktverteilungen, die man über die Voronoi-Relaxierung und geeignete „Verklumpungsantagonisten“ nachbildet.

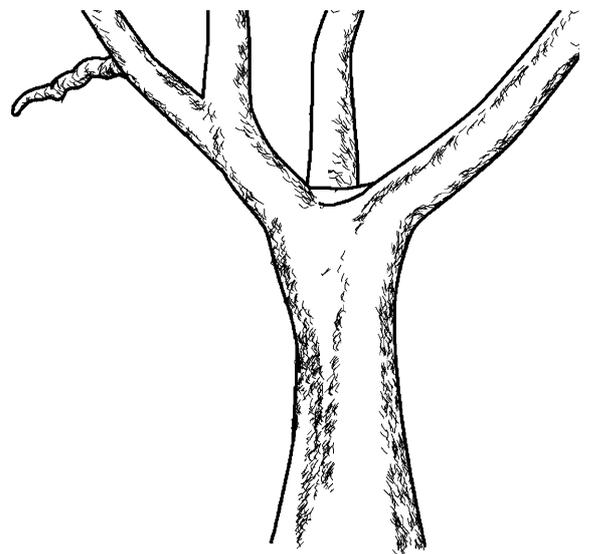
Solche Verklumpungen sind manchmal auch bei der Punktierung nötig, wenn die Punkte eben nicht gleichmäßig verteilt sein sollen. Dies wird bei Materialien wie Stein angewendet. Die gezielte Variation der Punktdichte erzeugt hier durch Kombination mit unrunder Punktformen ein natürliches Aussehen der rauen Oberfläche.

Insbesondere für anisotrope Stoffe werden die Punkte auch in Mustern gezeichnet. Um dies im Zusammenhang mit der Relaxierung zu erreichen, werden Polygone eingeführt, die die Bewegung der Punkte einschränken (Abb. 5 a,b). Werden die Punkte innerhalb der Polygone relaxiert, entstehen die gewünschten Muster (Abb. 5 c).

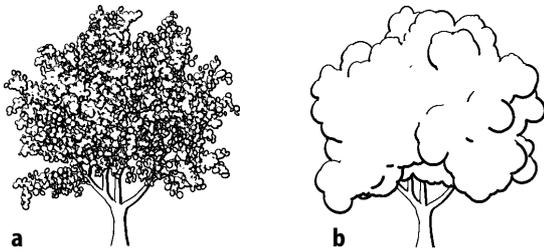
Auch für diese Methode ist die Animation der Ergebnisse aktuelle Forschungsarbeit. In einem ersten Schritt muss die Herstellung der Punktierung zumindest für eingeschränkte Modellklassen automatisiert werden. Später sind Verfahren zur Darstellung von Modelltransformationen und -vergrößerungen zu implementieren. Notwendig wird in diesem Zusammenhang eine Methode zum Einfügen und Löschen von Punkten einer Poisson-Disc-Verteilung sein, an der wir arbeiten.

## 5 Synthetische Pflanzenskizzen

Ausgehend von eigenen Arbeiten zur Erzeugung von dreidimensionalen Pflanzengeometrien [5, 13] stellte sich die Frage, ob auch für Pflanzen geeignete synthetische Zeichnungen erzeugt werden könnten. Einen Anstoß dafür gaben Landschaftsplaner, die als Partner in einem Projekt zur Visualisierung von Landschaften ihre traditionelle Präsentationsweise erzeugt haben wollten.



**Abb. 6. Skizzierung des Baumskeletts über Silhouette und Schraffurstriche**



**Abb. 7 a,b. Verschiedene Primitivgrößen und Tiefendifferenzwerte ergeben unterschiedliche Darstellungen**

Weiteres Nachfragen ergab den schon geschilderten Effekt: Die skizzenhafte Darstellung vermittelt eine andere Art von Information als die fotorealistic. Größenverhältnisse und die grobe Form der Landschaft werden wiedergegeben, der Betrachter hat aber den Eindruck, ein Modell einer Landschaft vor sich zu haben und nicht eine konkrete Ausprägung. Auf diese Weise können Planungsergebnisse besser visualisiert werden als mit Fotos. Der Betrachter tut sich auch leichter mit Änderungen, ein Effekt, den schon Schumann et al. bei architektonischen Planungen und deren Präsentation als Skizzen belegten [19].

Eine neue Qualität kommt hinzu, wenn ein Gang durch eine skizzierte Landschaft möglich wird. Beim Entwurf der Algorithmen wurde daher von vornherein die Animation in Betracht gezogen, und es wurden kohärente sowie effiziente Algorithmen gesucht. Durch die Einschränkung auf Pflanzen konnten diese auch gefunden werden [6].

Im Folgenden werden Bäume als Beispiele verwendet; andere Pflanzen sind durch kleine Veränderungen innerhalb der Methode ebenfalls darstellbar. Ein Baum wird durch zweierlei Arten von Geometrie beschrieben: dem Astwerk mit seiner relativ glatten Oberfläche und dem Blattwerk, das aus vielen tausend Einzelflächen besteht. Aufgrund dieser Verschiedenartigkeit müssen beide Teile mit separaten Algorithmen behandelt werden, um eine Skizze zu erzeugen.

Zur Darstellung des Baumstamms verwenden wir eine Technik ähnlich der von Kupferstichen: Es wird die Silhouette gezeichnet und Schraffurstriche an den Stellen, die wenig beleuchtet sind. Hierfür wird wieder eine Variante einer Halftoning-Methode eingesetzt, die diesmal aber keine Punkte, sondern

kurze Striche erzeugt. In Abb. 6 ist ein Beispiel zu sehen.

Bei der Darstellung des Blattwerkes stellte sich ein Problem: Es gibt unüberschaubar viele Zeichenstile für Bäume. Von sehr realistisch wirkenden Zeichnungen bis zu solchen, in denen die Form mit wenigen Strichen angedeutet wird, haben Künstler viele Methoden gefunden, das Charakteristische eines Baumes herauszuarbeiten. Ein Algorithmus zur Darstellung des Blattwerkes sollte daher Freiraum für viele dieser Techniken bereitstellen und darüber hinaus dem Benutzer die Wahl des Abstraktionsgrades ermöglichen.

Beide Forderungen werden durch die Kombination zweier Ideen umgesetzt. Einerseits werden die Blätter des Baums einzeln durch abstrakte Malprimitive dargestellt, die an den Blattpositionen im Baum platziert werden. Solche Primitive können Kreisflächen oder beliebig geformte Polygone sein, die jeweils durch ihren Umriss dargestellt werden. Zur Andeutung von Perspektive können sie auch verformt werden, man benötigt dazu in der Datenstruktur einzig die Position und Orientierung jedes Blattes.

Welcher Teil der so entstehenden Linien gezeichnet wird, wird durch die zweite Zutat, den Tiefendifferenz-Algorithmus bestimmt. Im in der Einleitung vorgestellten Papier von Saito und Takahashi [17] wurden erste und zweite Ableitungen der Tiefeninformation verwendet, um wichtige Linien auf glatten Oberflächen zu generieren. Für Ansammlungen von Einzelflächen wie etwa in einem Blattwerk – also für äußerst zerklüftete Objekte – kann die nullte Ableitung der Tiefe herangezogen werden, um wichtige Linien zu finden. Diese ist in diskretisierter Form die Tiefendifferenz zwischen auf dem Bildschirm benachbarten Pixeln. Diese Tiefeninformation fällt bei der Bilderzeugung pro Pixel an, durch einen Bildverarbeitungsoperator können hieraus die Differenzen bestimmt werden. Später werden alle Umrisslinien von Malprimitiven gezeichnet, deren Pixel in der Tiefe gegenüber ihren Nachbarn eine gegebene Schwelle überschreitet.

Durch Variation der Tiefendifferenz und auch der Größe der abstrakten Malprimitive können verschiedene Darstellungsarten erzeugt werden. Als Beispiel wird in Abb. 7 derselbe Baum mit zwei verschiedenen Primitivgrößen und Tiefendifferenzwerten gezeigt.

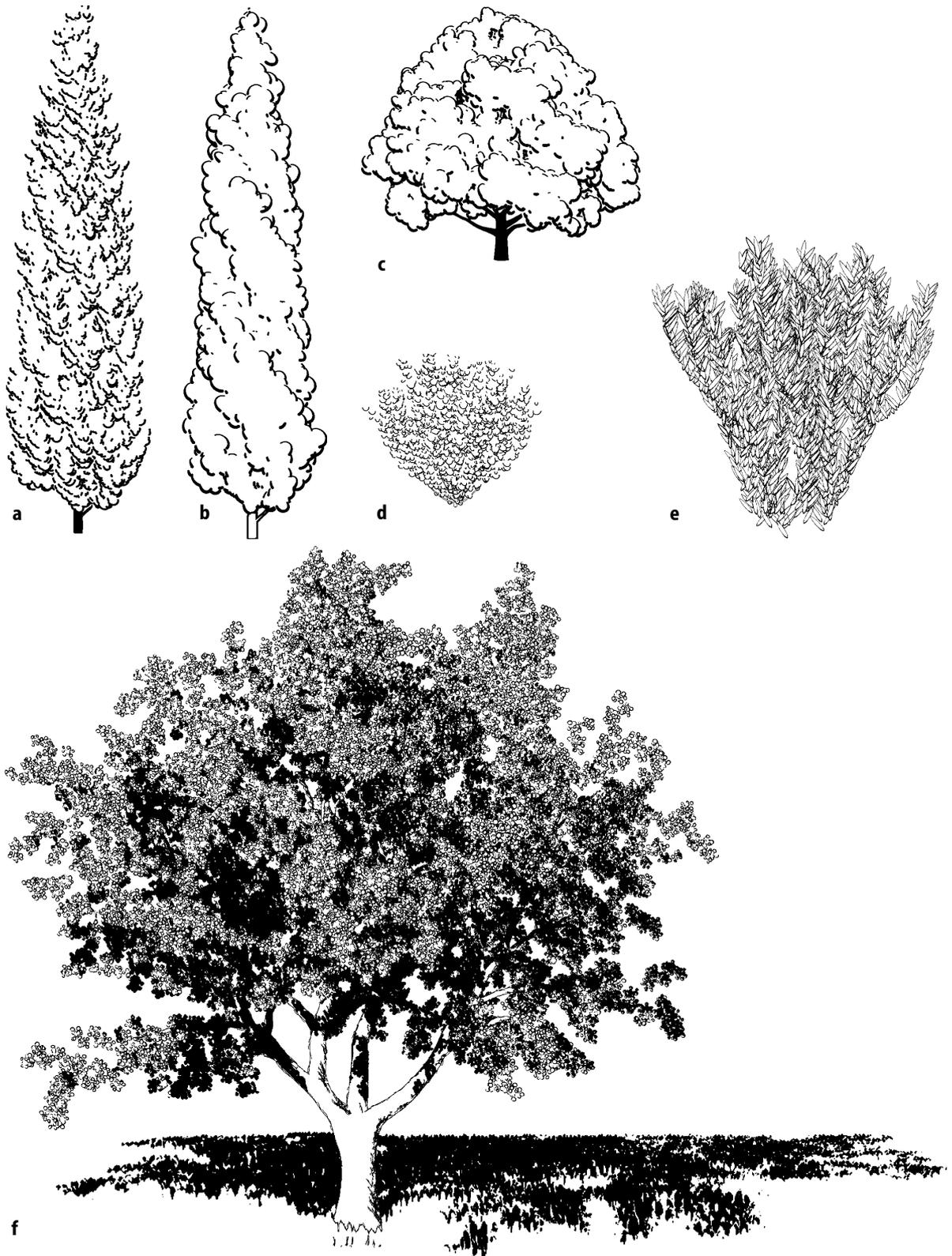


Abb. 8a-f. Verschiedene Pflanzen, dargestellt mit unterschiedlichen Zeichenstilen

In einer Animation können beide Parameter Schritt für Schritt variiert werden, um einen Baum im Aussehen zu verändern. Durch das Anbringen der Malprimitive an den Positionen der Blätter im Baum und ihr Ausrichten auf den Betrachter kann der Baum auch gedreht werden, ohne dass die Kohärenz darunter leidet. Durch Berechnen des Schattens und Veränderung der Dicke von Umrisslinien an den Unterseiten der Primitive können weitere räumliche Effekte erzielt werden. In Abb. 8 sind verschiedene Beispiele zu sehen.

In der Zukunft wird die Darstellung auf ganze Landschaften ausgedehnt werden, hierzu sind insbesondere auch bodenbedeckende Pflanzen wie Gras (Abb. 8 f) sowie Berge und künstliche Objekte wie etwa Häuser in die Zeichnungen mit einzubeziehen. Auch die Effizienz der Algorithmen muss weiter verbessert werden. Momentan benötigen wir pro Bild ein paar Sekunden – wird in den nächsten Jahren durch Optimierung der Algorithmen und Vorschreiten der Computertechnik wenigstens ein Faktor 30 in der Bearbeitungsgeschwindigkeit erzielt, scheinen interaktive Spaziergänge in skizzierten Landschaften möglich.

## 6 Quo vadis, NPR?

In den vorangehenden Abschnitten wurden exemplarisch drei Verfahren zur Erzeugung nichtrealistischer Computergraphiken beschrieben, jeweils mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Herangehensweisen.

Jedes stellt für sich eine Technik dar, die in der Zukunft als Teil des schon erwähnten Baukastens zur Gestaltung von Computerbildern ihren Platz finden wird. Zusammen mit den vielen weiteren Techniken, die in den letzten Jahren entwickelt wurden, steht schon jetzt ein beträchtliches Potential an Ausdrucksmöglichkeiten für die Gestaltung digitaler Bilder zur Verfügung. Dieses wird sich in den nächsten Jahren sicherlich erweitern; viele Grundfragen scheinen aber inzwischen gelöst und die Forschung wird sich zunehmend vom rein technischen Bereich der Herstellung der Bilder lösen.

So stellt sich im Rahmen der Zusammenführung der verschiedenen Techniken die Frage, wie man Benutzern hilft, für eine bestimmte Situation und konkrete Daten die richtige Form der Darstellung zu finden. Ist es möglich, Regeln für eine „gute“

Darstellung zu finden? Kann man den Prozess vielleicht automatisieren?

Oftmals soll auch dieselbe Information in verschiedenen Kontexten unter verschiedenen Rahmenbedingungen dargestellt werden. In heterogenen kollaborativen Arbeitsumgebungen könnten dynamische, situationsbezogene Darstellungsarten einmal eine wichtige Rolle spielen. Am Deutschen Forschungszentrum für künstliche Intelligenz (s. <http://www.dfki.de>) wurden hierzu im Rahmen von Projekten erste Lösungsansätze erarbeitet.

Auch das Zusammenspiel von Bildinhalten und simultan dargestelltem Text bzw. von Sprachausgaben muss weiter untersucht werden. Schon lange ist bekannt, dass sich unterschiedliche Inhalte mit Texten und Bildern transportieren lassen und demnach in ihrem Zusammenspiel ein Optimum zu finden ist. An der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg gibt es eine Reihe von Projekten zu verschiedenen Aspekten dieser Fragestellung (s. <http://isgwww.cs.uni-magdeburg.de>).

Werden die geschilderten Ziele erreicht, so ist zu hoffen, dass generalisierte graphische Darstellungen in den nächsten Jahren die Vielfalt, Attraktivität und vor allem Effektivität der Präsentation visueller Inhalte in elektronischen Dokumenten steigern und auf diese Weise den Computer ein Stück menschbezogener machen werden.

## Literatur

1. Appel, A., Rohlf, F.J., Stein, A.J.: The Haloed Line Effect for Hidden Line Elimination. *Computer Graphics* 13(3), 151–157 (Proceedings of SIGGRAPH '79)
2. Deussen, O., Hamel, J., Raab, A., Schlechtweg, S., Strothotte, T.: An Illustration Technique Using Hardware-based Intersections and Skeletons. *Proceedings of Graphics Interface 99*, 175–182 (Canadian Human-Computer Communications Society, 1999)
3. Deussen, O., Hanrahan, P., Pharr, M., Lintermann, B., Mech, R., Prusinkiewicz, P.: Realistic Modeling and Rendering of Plant Ecosystems. *Computer Graphics* 32(4) (SIGGRAPH '98 Conference Proceedings)
4. Deussen, O., Hiller, S., van Overveld, K., Strothotte, T.: Floating Points: A Method for Computing Stipple Drawings. *Computer Graphics Forum* 19(4), 40–51 (Eurographics 2000 Conference Proceedings)
5. Deussen, O., Lintermann, B.: Erzeugung komplexer botanischer Objekte in der Computergraphik. *Informatik Spektrum* 20(4), 1997
6. Deussen, O., Strothotte, T.: Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration of Trees. *Computer Graphics* 34(4), 13–18 (SIGGRAPH 2000 Conference Proceedings)
7. Du, Q., Faber, V., Gunzburger, M.: Centroidal Voronoi Tessellations. *Siam Review* 41(4), 637–676 (1999)
8. Gooch, A.: Non-Photorealistic Rendering. Wellesley/MA: Peters 2001 (in press)
9. Hsu, S., Lee, I.: Drawing and Animation Using Skeletal Strokes. *Computer Graphics* 28(4), 109–118 (SIGGRAPH '94 Conference Proceedings)
10. Interrante, V.: Illustrating Surface Shape in Volume Data via Principal Direction-Driven 3D Line Integral Convolution. *Computer Graphics* 31(4), 109–116 (Proceedings of SIGGRAPH '97)
11. Kamada, T., Kawai, S.: An Enhanced Treatment of Hidden Lines. *ACM Transactions on Graphics* 6(4), 309–323 (1987)

12. Leister, W.: Computer Generated Copper Plates. *Computer Graphics Forum* 13(1), 69–77 (1994)
13. Lintermann, B., Deussen, O.: Interactive Modeling of Plants. *IEEE Computer Graphics and Applications* 19(1), 56–65 (1999)
14. Ostromoukhov, V.: Digital Facial Engraving. *Computer Graphics* 33(4), 417–424 (SIGGRAPH '99 Conference Proceedings)
15. Ostromoukhov, V., Hersch, R.: Artistic Screening. *Computer Graphics* 29, 219–228 (SIGGRAPH '95 Conference Proceedings)
16. Raab, A.: Techniques for Interacting with and Visualization of Geometric Models. Doktorarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 1998
17. Saito, T., Takahashi, T.: Comprehensive Rendering of 3-D Shapes. *Computer Graphics* 24(4), 197–206 (SIGGRAPH '90 Conference Proceedings)
18. Salisbury, M., Anderson, S., Barzel, R., Salesin, D.: Interactive Pen-And-Ink Illustration. *Computer Graphics* 28(4), 101–108 (SIGGRAPH '94 Conference Proceedings)
19. Schumann, J., Strothotte, T., Raab, A., Laser, S.: Assessing the Effect of Non-Photorealistic Images in Computer-Aided Design. *ACM Human Factors in Computing Systems, SIGCHI '96*, 35–41 (April 13–15, 1996)
20. Strassmann, S.: Hairy Brushes. *Computer Graphics* 20(3), 225–232 (SIGGRAPH '86 Conference Proceedings)
21. Strothotte, C., Strothotte, T.: Seeing Between the Pixels: Pictures in Interactive Systems. Berlin Heidelberg New York: Springer 1997
22. Strothotte, T., Preim, B., Raab, A., Schumann, J., Forsey, D.R.: How to Render Frames and Influence People. *Computer Graphics Forum* 13(3), 455–466 (1994)
23. Strothotte, T., Schlechtweg, S.: Non-realistic Computer Graphics. (2001, in press)
24. Ulichney, R.: Digital Halftoning. Cambridge/MA: MIT Press 1987
25. Winkenbach, G., Salesin, D.: Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration. *Computer Graphics* 28(4), 91–100 (SIGGRAPH '94 Conference Proceedings)
26. Winkenbach, G., Salesin, D.: Rendering Parametric Surfaces in Pen and Ink. *Computer Graphics* 30(4), 469–476 (SIGGRAPH '96 Conference Proceedings)



Prof. Dr. Oliver Deussen studierte und promovierte an der Universität Karlsruhe. Von 1996 bis 2000 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Simulation und Graphik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Seit September 2000 ist er Professor für Computergraphik und Mediendesign an der Fakultät Informatik der TU Dresden. Er ist Sprecher der GI-Fachgruppe 4.1.4 „Graphische Simulation und Animation“.