

# Holographische Anwendungen in Virtuellen Umgebungen und zur Datenspeicherung

Ralph Pöllath  
ralph@poellath.org

Januar 2001

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Funktionsweise . . . . .	3
2.1.1	Aufnahme . . . . .	4
2.1.2	Speicherung . . . . .	4
2.1.3	Reproduktion . . . . .	5
2.2	Anwendungen . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Holographie in Virtuellen Umgebungen</b>	<b>6</b>
3.1	Elektronische Holographie . . . . .	6
3.2	Das MIT Holodisplay . . . . .	6
3.2.1	Rechenphase . . . . .	7
3.2.2	Modulationsphase . . . . .	8
3.3	Ausblick . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Hologramme als Datenspeicher</b>	<b>9</b>
4.1	Funktionsweise . . . . .	9
4.1.1	Aufnahme . . . . .	10
4.1.2	Speicherung . . . . .	10
4.1.3	Reproduktion . . . . .	11
4.2	Performance . . . . .	11
4.3	Ausblick . . . . .	11
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>12</b>

# 1 Einleitung

Mit dieser Arbeit möchte ich dem Leser einen aktuellen Überblick über zwei Anwendungsgebiete der Holographie bieten, die unseren Umgang mit Daten drastisch zu verändern versprechen. Dies sind zum einen die Anwendung von Holographie im Bereich von Virtuellen Umgebungen, zum anderen der Einsatz von Hologrammen als Datenspeicher. Zunächst werde ich dazu einige Grundlagen der Holographie erläutern, wobei ich auch auf die elektronische Holographie eingehen werde, die die beiden behandelten Anwendungen erst ermöglicht hat. Im Anschluss daran werde ich versuchen, den Stand der Forschung auf beiden Gebieten zu erläutern und heutige und zukünftige Einsatzgebiete anzusprechen, ohne dabei allzusehr ins Detail zu gehen.

## 2 Grundlagen

Holographie<sup>1</sup> ist eine Methode zur Reproduktion des dreidimensionalen Bildes eines Objekts durch Speicherung von Lichtwellen-Interferenzmustern. Dabei wird das gesamte vom Objekt ausgehende Wellenfeld auf ein holographisches Material abgebildet [6].

Die theoretischen Grundlagen der Holographie wurden schon 1948 vom britischen Wissenschaftler Dennis Gabor gelegt, der auf der Grundlage der Arbeiten von Christopher Huygens aus dem späten 17. Jahrhundert die Theorie der Lichtwellen beschrieb. Gabor gilt als der Vater der theoretischen Holographie.

Der praktische Einsatz der Holographie wurde allerdings erst in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts möglich, als durch die Erfindung des Laser erstmals das für die Holographie benötigte kohärente Licht zur Verfügung stand [1].

### 2.1 Funktionsweise

Unter Hologramm versteht man sowohl ein durch Überlagerung von Lichtwellen erzeugtes Interferenzmuster, das die zur Reproduktion eines dreidimensionalen Bildes benötigten Informationen enthält, als auch die dreidimensionale Reproduktion selbst.

---

<sup>1</sup>Holographie, von griech. “holos” - ganz, vollständig und “graphein” - schreiben, aufzeichnen

### 2.1.1 Aufnahme

Um ein Hologramm aufzunehmen, bedient man sich üblicherweise des in Abb. 1 dargestellten Aufbaus. Das kohärente Licht eines Lasers wird in einen Objektstrahl und einen Referenzstrahl aufgespalten und jeweils durch eine Linse auf die erforderliche Breite aufgeföhert. Der Objektstrahl wird (ggf. über einen Spiegel) auf das aufzunehmende Objekt gelenkt, welches die Lichtwellen teilweise auf die Hologrammfläche reflektiert. Der Referenzstrahl wird direkt auf die Hologrammfläche geleitet. Bei der Überlagerung der Lichtwellen beider Strahlen addieren sich diese entweder oder löschen sich gegenseitig aus. Durch diese Interferenz entsteht somit ein Muster - das Hologramm [5].

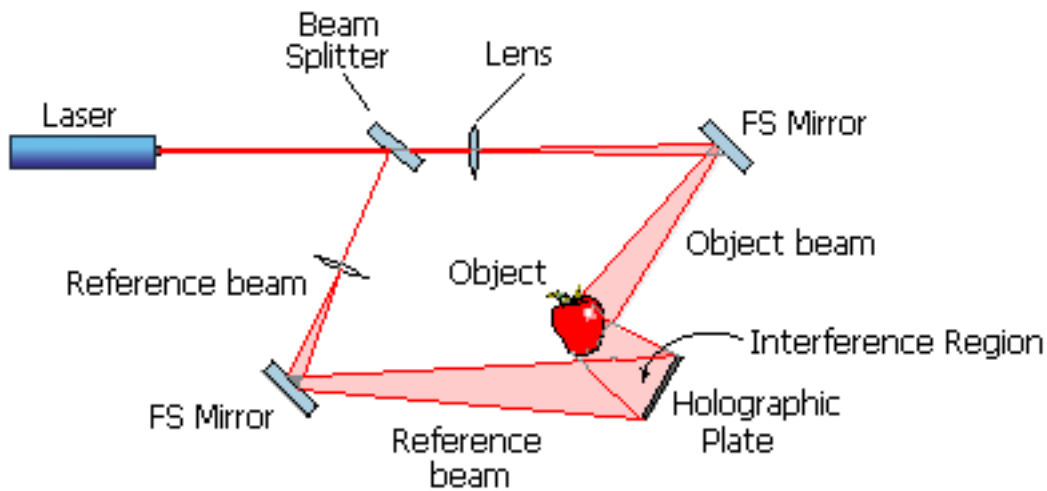


Abbildung 1: Aufnahme eines Hologramms, Quelle: [5]

### 2.1.2 Speicherung

Die in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts entwickelte klassische Holographie bedient sich zur Speicherung des Interferenzmusters eines fotografischen Hologfilms, der sich von handelsüblichen fotografischen Filmen in erster Linie durch seine sehr viel höhere Auflösung unterscheidet. Diese ist nötig, da das Interferenzmuster aus Punkten (Holopixeln) im Abstand der Wellenlänge des verwendeten Laserlichts besteht. Bei Aufnahmen mit sichtbarem Licht, d.h. bei Wellenlängen von 400 - 800nm, ist somit eine Auflösung von 1250-2500 Linien/mm nötig (Zum Vergleich: Fotografischer Film erlaubt Auflösungen in der Größenordnung von 100 Linien/mm)[2, Seite 85 ff.]. Neuere Verfahren verwenden statt Film fotorefraktive Kristalle, die auf Licht

mit Änderung ihres Brechungsindex reagieren.<sup>2</sup>

### 2.1.3 Reproduktion

Wird das auf der Hologrammfläche entstandene Interferenzmuster gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder mit dem Referenzstrahl beleuchtet, so entsteht durch Ablenkung anstelle des aufgenommenen Objekts ein dreidimensionales Abbild desselben [6].

## 2.2 Anwendungen

Hologramme werden bereits heute in verschiedensten Gebieten eingesetzt. Im Bereich der Datenvisualisierung gelten Hologramme als allen anderen Techniken überlegen, da sie ohne weitere Hilfsmittel Dreidimensionalität vermitteln. Sogenannte "Head Up Displays", die z.B. Kontrollinstrumente ins Gesichtsfeld eines Piloten projizieren, sind bereits im Einsatz. Zudem ist es möglich, Hologramme zu erzeugen, die ähnliche optische Eigenschaften wie Linsen besitzen und damit eine Fülle weiterer Anwendungen möglich machen. Auch in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung [2, S. 160 ff.] und in der linsenlosen Mikroskopie [2, S. 172 ff.] sind holographische Anwendungen an der Tagesordnung.

---

<sup>2</sup>Ähnlich den in CD-RW eingesetzten Materialien

## 3 Holographie in Virtuellen Umgebungen

Für den Einsatz in Virtuellen Umgebungen scheint Holographie geradezu prädestiniert zu sein. Der durch Holographie erzeugte 3D-Effekt ist anderen vergleichbaren Visualisierungstechniken, wie z.B. der Stereoskopie, überlegen, da er im Unterschied zu diesen dem menschlichen Auge alle relevanten Tiefeninformationen bietet [3, Kapitel 2.3].

Daher liegt es nahe, den Hologrammen “das Laufen beizubringen”, und sie um die 4. Dimension, die Zeit, zu erweitern. Die Idee des “HoloTV” und “Hologvideo” ist zwar (wohl nicht zuletzt Dank Cpt. Kirk & Co.) weit verbreitet, steht aber technologisch noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung. Speziell am Massachusetts Institute of Technology (MIT) Media Laboratory in Boston widmet man sich schon seit einigen Jahren der Entwicklung von holographischen 3D-Displays.

Den dabei verfolgten Ansatz und die technischen Voraussetzungen werde ich nun näher erläutern.

### 3.1 Elektronische Holographie

Für interaktive Anwendungen im Bereich Hologvideo ist es nahezu unabdingbar, die Hologramme nicht auf analogem Hologfilm, sondern digital zu speichern. Somit ergibt sich die Notwendigkeit von digitalen Hologdisplays, die aus vorliegenden Datensätzen in Echtzeit Hologramme reproduzieren.

Der derzeit vielversprechendste Ansatz besteht darin, anhand von gängigen 3D-Datensätzen das Interferenzmuster der darzustellenden Szene zu berechnen, welches von einem sogenannten Spatial Light Modulator (SLM) in sichtbares Licht umgesetzt wird. Die dafür benötigte Rechenleistung und Bandbreite stellt für die gegenwärtigen Systeme das grösste Problem dar.

Im Folgenden beschreibe ich ein prototypisches Hologdisplay, wie es am MIT bereits mehrfach erfolgreich eingesetzt wurde [3] [4].

### 3.2 Das MIT Hologdisplay

Die Darstellung eines Hologrammes mit Hilfe eines elektroholographischen Displays lässt sich in 2 Phasen unterteilen. In der Rechenphase muss aus 3D-Daten das entsprechende Interferenzmuster generiert werden, in der Modulationsphase wird anhand des Interferenzmusters Licht moduliert, so dass das eigentliche Hologramm sichtbar wird.

Beide Phasen stellen enorme Anforderungen bezüglich der benötigten Bandbreite: Ein typisches 2D-Display arbeitet mit einem Pixelabstand von ca. 100

micron, ein Holodisplay benötigt hingegen einen Abstand von nur 0,5 micron, um den gewünschten Modulationseffekt zu erzielen [4, Kapitel 2.0]. Somit ergeben sich für ein Hologramm von der Größe einer Handfläche Datenvolumen in der Größenordnung von 100 Gigasamples. Reduzieren lässt sich dies, indem man sich auf die horizontale Parallaxe der darzustellenden Szene beschränkt. Der Betrachter sieht dann unabhängig von seinem vertikalen Blickwinkel immer dasselbe Bild, was in vielen denkbaren Anwendungen jedoch kaum störend auffallen dürfte. Die erforderliche Datenmenge lässt sich so um den Faktor 100 reduzieren, was die Implementation auf (mehr oder weniger) erschwinglichen Grafikworkstations ermöglicht.

### 3.2.1 Rechenphase

In der Rechenphase gilt es, aus der dreidimensionalen Beschreibung eine Szene die Daten für ein Interferenzmuster (Fringe) zu erzeugen, welches im zweiten Schritt die 3D-Szene vor dem Auge des Betrachters entstehen lässt.

Die *Intefferenzmethode* verwendet hierzu einen Ansatz, der die optische Interferenz bei der Aufnahme eines Hologramms (siehe 2.1.1) simuliert. Für jedes Element des wiederzugebenden Objekts wird anhand der Gesetze der Wellenoptik das sich auf der imaginären Hologrammfläche ergebende Wellenmuster (entspricht dem Objektstrahl) errechnet, und zu einem Referenzmuster (entspricht dem Referenzstrahl) addiert. Die Komplexität und die schiere Menge der hierzu erforderlichen Rechenoperationen begrenzt den Einsatz dieser Methode auf Supercomputer und relativ einfache Objekte bzw. Szenen. Die mit der Interferenzmethode erzeugten Bilder sind üblicherweise weitaus schärfer, als das menschliche Auge es wahrzunehmen vermag.

Im Gegensatz dazu berechnet die sogenannte *Brechungsmethode* das Interferenzmuster Pixel für Pixel, indem vom 3D-Modell aus “rückwärts” gerechnet wird.<sup>3</sup> Die Brechungsmethode kann die Rechenphase um ein Vielfaches beschleunigen und ermöglicht ganz nebenbei eine Datenreduktion.[4, Kapitel 3.2] Durch die Wahl der Kompressionsrate lässt sich so ein Bild erzeugen, das in seiner Schärfe (bzw. Unschärfe) genau dem menschlichen Sehapparat entspricht.

---

<sup>3</sup>Dieser Ansatz sollte jedem bekannt vorkommen, der sich mit der Fourier-Transformation beschäftigt hat.

### 3.2.2 Modulationsphase

In der Modulationsphase werden die Informationsbits des errechneten Interferenzmusters mit Hilfe eines räumlichen Lichtmodulators (Spatial Light Modulator, SLM) in Photonen, also sichtbares Licht umgesetzt. Auch hier gibt es zwei verschiedene Ansätze:

Zum einen ist es möglich, gängige LCD-Displays als SLMs zu verwenden. Dagegen spricht allerdings nicht nur ihre geringe Auflösung (i.d.R. können sie ca. 1 Million Bildpunkte darstellen), sondern auch die vergleichsweise riesigen Kantenlängen der Pixel von ca. 50 micron. In der Praxis werden deshalb oft mehrere LCDs nebeneinander montiert, um ein Hologramm in der gewünschten Größe wiedergeben zu können. Dies zieht natürlich weitere Komplikationen mit sich.

Das weltweit erste echtzeitfähige Holodisplay wurde hingegen erst durch den Einsatz eines optoakustischen Modulators (AOM) möglich gemacht [4, Kapitel 4.2]. Hierbei wird das berechnete Interferenzmuster in Schallwellen umgesetzt, welche die Phase eines Lasers modulieren. Der Laser wird über zwei vertikal bzw. horizontal auslenkbare Spiegel auf die Ausgabelinse gelenkt, wo er dann zeilenweise das Hologramm ausgibt. Aufgrund der Latenzzeit des menschlichen Sehapparates von ca. 20ms ist dies für den Betrachter nicht wahrnehmbar. Ein großer Vorteil dieser Methode ist die Skalierbarkeit der entstehenden Hologramme, andererseits ist dieses Verfahren im Vergleich zu LCDs sehr teuer und anfällig.

### 3.3 Ausblick

Obwohl die Grundlagen für holographische Anwendungen in Virtuellen Umgebungen seit längerem gelegt und die nötigen Prozesse beherrschbar sind, steckt die Erforschung dieser Technik noch in den Kinderschuhen. Mark Lucette, der am MIT an der Entwicklung von Holodisplays beteiligt war, vergleicht den Entwicklungsstand holographischer Displays mit dem von 2D-Displays in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts [4, Kapitel 5.2]. Nichtsdestotrotz könnte die Technik sich rasch weiterentwickeln, da zukünftige Rechnergenerationen die Flaschenhalse Rechenpower und Bandbreite zu beseitigen versprechen. Unter Mangel an Nachfrage dürften holographische Displays sicherlich nicht leiden, sobald erste Geräte am Markt erscheinen.

## 4 Hologramme als Datenspeicher

Hologrammen wird praktisch seit ihrer Entdeckung eine Zukunft als Speichermedium prophezeit. Im Prinzip verfolgen alle bisher bekanntgewordenen Projekte dabei den selben Ansatz, den ich nun erläutern werde.

### 4.1 Funktionsweise

Auch in der Speichertechnologie bedient man sich zweier Laserbündel, Objekt- und Referenzstrahl genannt, um ein Interferenzmuster zu erzeugen und dieses dauerhaft zu speichern. Abbildung 2 stellt schematisch einen geeigneten Versuchsaufbau dar.

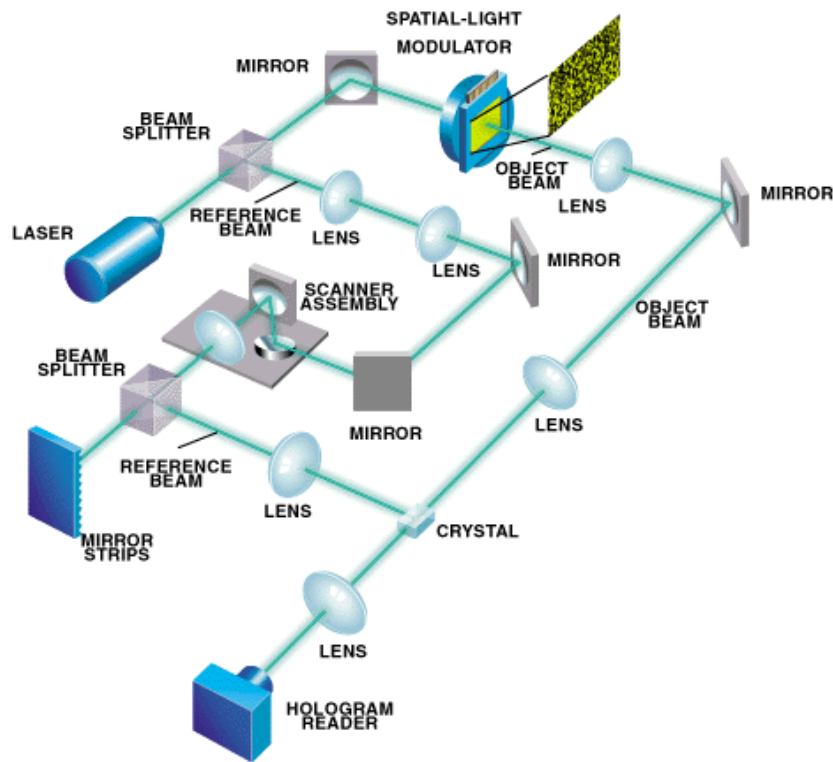


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines HoloSpeichers. Quelle: [5]

### 4.1.1 Aufnahme

Um dem Objektstrahl die zu speichernden Informationen aufzuprägen verwendet man die schon unter 3.2.2 erwähnten SLMs. Auch hier kommen modifizierte LCDs zum Einsatz. Sie stellen die Nutzdaten als Muster aus hellen und dunklen Pixeln dar. Die Größe der durch die Abmessungen der LCDs vorgegebenen Datenseiten liegt somit auch hier im Bereich von 1 MB. Indem der SLM vom Objektstrahl durchleuchtet wird, werden die in der Datenseite vorliegenden Informationen codiert.

### 4.1.2 Speicherung

Die eigentliche Herausforderung bei der Herstellung von Holo Speichern (Holographic Data Storage Systems, HDSS) liegt in der Wahl des geeigneten Materials für den Speicher. Prinzipiell kommen alle Materialien in Frage, die auf Lichteinfall mit Änderung eines optischen Parameters, wie z.B. Absorption oder Brechungsindex reagieren [6]. Ist dieser Prozess jedoch nicht reversibel, so lassen sich damit nur read-only Speicher herstellen. Bewährt haben sich in bisherigen Projekten vor allem fotorefraktive Kristalle, die in einem komplizierten Zucht- und Präparationsprozess hergestellt werden. Vorangetrieben wurde diese Entwicklung hauptsächlich vom PRISM (Photorefractive Information Storage Materials) Projekt, einem gemeinsamen Forschungsprojekt von u.a. IBM, Rockwell und GTE. Eher ein Newcomer unter den holographischen Speichermedien sind Fotopolymere - Kunststoffe, die bei ähnlichen optischen Eigenschaften ein um ein Vielfaches günstigeres Preis-Leistungsverhältnis bieten. Gemeinsam ist allen verwendeten Materialien, dass sie bei Bestrahlung mit den überlagerten Laserstrahlen das sich ergebende Interferenzmuster als "Muster" ihrer optischen Eigenschaften speichern. Die möglichen Datenvolumen wären allerdings alles andere als spektakulär, wenn man sich nicht eine besondere Eigenschaft der Kristalle zu nutze machen würde[6]. Die Reproduktion des gespeicherten Hologramms gelingt nämlich nur, wenn die Bedingungen beim Auslesen der Informationen denen beim Einspeichern exakt gleichen: Beleuchtungswinkel, Wellenlänge und Phase des Referenzstrahls müssen nahezu identisch sein. Was sich zuerst wie eine Einschränkung anhört, ist in Wirklichkeit das größte Potential der holographischen Speichertechnik. Speichert man nämlich mehrere Hologramme in ein und demselben Kristall unter anderen Bedingungen bezüglich dieser Parameter, so lassen sich diese auch wieder getrennt auslesen. In der Praxis verwendet man Winkel- oder Phasenmultiplexing, um einen Kristall mit möglichst vielen Datenseiten zu "füttern". Natürlich ist die Aufnahmekapazität eines Kristalls beschränkt, und zwar durch die Mindestqualität der wiederzuge-

benden Daten. Je mehr Datenseiten man abspeichert, desto “trüber” werden die sich ergebenden Hologramme.[7]

### **4.1.3 Reproduktion**

Im Ausleseprozess wird der Kristall mit einem Referenzstrahl beleuchtet. Das Laserlicht wird durch das im Kristall gespeicherte Interferenzmuster moduliert, und auf diesem Wege entsteht ein Hologramm der gespeicherten Daten (also i.d.R. das ursprünglich vom SLM erzeugte Pixelmuster). Durch die schon erwähnten Parameter lässt sich damit bestimmen, welche Datenseite abgerufen wird. Hier genügt ein hochauflösender CCD-Chip, um die nun optisch vorliegenden Daten wieder in Bits und Bytes zu wandeln.

## **4.2 Performance**

Im Vergleich zu anderen Speichertechnologien bieten holographische Datenspeicher Kapazitäten, die der zunehmenden Datenflut Herr zu werden versprechen. Zwar schwanken die für zukünftige Systeme vorhergesagten Speicherdichten zwischen 10GB [8] und 1TB [6] pro Kubikzentimeter Kristall, aber auch die schon erreichten Kapazitäten und Ausleseraten lassen aufhorchen. Die Speicherung von mehreren hundert Gigabyte bei Ausleseraten im Bereich von Gigabyte pro Sekunde [6] sind auf jeden Fall nicht zu verachten.

## **4.3 Ausblick**

Obwohl das alles in den Labors von Unternehmen und Forschungseinrichtungen schon jetzt recht gut zu funktionieren scheint, sind marktreife Produkte leider noch nicht in Sicht. Einige Hürden sind wohl noch zu nehmen, bis die allseits begehrten Holopeicher beim Fachhandel oder Lebensmitteldiscounter zu haben sein werden.

In der Tat könnten sie die Welt der Informationverarbeitung gehörig durcheinanderbringen. Schon wird spekuliert, ob die blitzschnellen Würfel nicht gar die Trennung zwischen primärem und sekundärem Speicher überflüssig machen würden.

Kritiker der Technologie hingegen sehen holographische Datenspeicher - wenn überhaupt - dann erst in etlichen Jahren am Markt erscheinen. In der Tat sind das holographische Prinzip und auch die Idee der Nutzung als Speichertechnologie seit Jahrzehnten bekannt.

Es bleibt zu hoffen, dass die rasche Entwicklung neuer Materialien, insbesondere billiger Fotopolymere, der holographischen Speichertechnik zum baldigen Durchbruch verhilft. Ich persönlich kann es nicht mehr erwarten...

## Literatur

- [1] The Columbia Electronic Encyclopedia, Columbia University Press 2000.
- [2] Hanskarl Treiber, Martin Treiber: Lasertechnik 2, Holographie. Frech-Verlag, Stuttgart 1987.
- [3] Mark Lucente, Tinsley A. Galyean: Rendering Interactive Holographic Images, MIT Media Laboratory 1995.
- [4] Mark Lucente: Interactive three-dimensional holographic displays - seeing the future in depth, MIT Media Laboratory 1997.
- [5] Tuan 'Solace' Nguyen: How Holographic Storage Works. Juni 2000.  
<http://www.tweak3d.net/articles/howholo/>
- [6] Cornelia Denz: 3D-Datenspeicher mit Potenzial.iX 1/2001, Heise Verlag.
- [7] Creating Holographic Storage. BYTE Magazine. April 1996.  
<http://www.byte.com/art/9604/sec7/art2.htm>
- [8] Edmund X. DeJesus: Infinite Space. BYTE Magazine. Februar 1998.  
<http://www.byte.com/art/9802/sec9/art9.htm>
- [9] Heise Newsticker vom 30.01.2001  
<http://www.heise.de/newsticker/data/wst-30.01.01-000/>