

# **Digitalisierung als Grundlage des Informationszeitalters**

Prof. Dr.-Ing. Eckehard Steinbach  
Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Fachgebiet Medientechnik  
Technische Universität München  
80290 München

Email: [Eckehard.Steinbach@tum.de](mailto:Eckehard.Steinbach@tum.de)  
WWW: <http://www.lkn.ei.tum.de/~steinb>

## **Einleitung**

Die Welt in der wir leben ist kontinuierlich (analog) und der Mensch als Informationssense ist mit seinen Sinnen auf eine kontinuierliche Wahrnehmung seiner Umgebung eingestellt. Sowohl die Zeit - auch wenn diese heute oft auf einer Digitaluhr angezeigt wird - als auch die Signale die vom Menschen wahrgenommen werden sind kontinuierlich. Dies gilt für Schalldrücke, die im Ohr und Gehirn als Sprache bzw. Musik wahrgenommen werden genauso wie z.B. für die Temperatur eines Körpers oder Raumes, die wir mit den entsprechenden Rezeptoren unserer Haut fühlen. Obwohl unsere Welt analog ist, ergeben sich aus einer Digitalisierung, also der Überführung von analogen Signalen in digitale Daten, grundlegende Vorteile hinsichtlich einer effizienten Informationsverarbeitung und -übertragung welche die Grundlage für das viel beschworene Informationszeitalter bilden.

## **Von analog nach digital**

Die Umwandlung von einem analogen Signal in digitale Daten umfasst zwei Schritte, die sich am besten an einem Beispiel erläutern lassen. Abbildung 1a zeigt ein analoges Signal (z.B. ein elektrischer Strom), hier mit  $y(t)$  bezeichnet, als Funktion der Zeit. Bei der Digitalisierung wird nun dieses analoge Signal entlang der Zeitachse in regelmäßigem Abstand abgetastet was zu der in Abbildung 1b gezeigten zeitdiskreten Wertefolge  $y[n]$  führt. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Abtastwerten wird als Abtastintervall  $T$  bezeichnet. Obwohl nach diesem Schritt das Signal schon zeitdiskret vorliegt, ist die Amplitude der Abtastwerte noch kontinuierlich. Im zweiten Schritt der Digitalisierung werden die möglichen Werte des Signals eingeschränkt und der kontinuierliche

Wertebereich in einen so genannten amplitudendiskreten Wertebereich überführt. Das Ergebnis dieser Amplituden- oder Wertediskretisierung  $\hat{y}(t)$  ist in Abbildung 1c gezeigt. Beide Schritte zusammen ergeben das digitale Signal  $\hat{y}[n]$ , das sowohl zeit- als auch amplitudendiskret und in Abbildung 1d dargestellt ist.

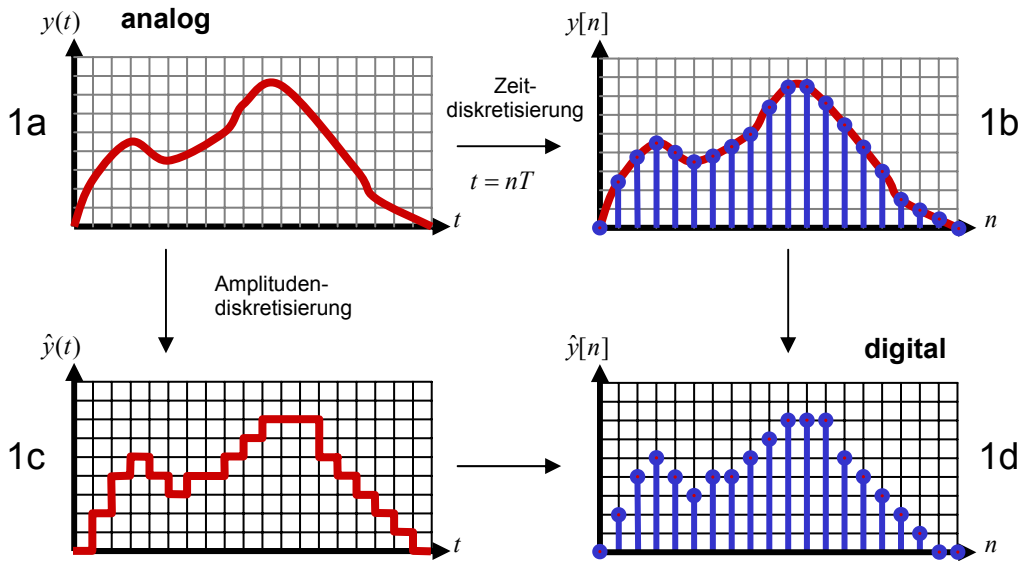


Abbildung 1: Digitalisierung eines zeit- und wertekontinuierlichen (analogen) Signals.

Beim Schritt der Codierung wird den diskreten Stufen ein Codewort zugewiesen, mit dem jede Stufe eindeutig identifiziert werden kann. Ein Codewort besteht üblicherweise aus einer festen Anzahl von Bits, also einer Sequenz von Nullen und Einsen. Nach der Codierung liegt das digitale Signal in einer Form vor, die sich für eine Verarbeitung auf einem Digitalrechner, für die Speicherung auf einem digitalen Datenträger bzw. für eine Übertragung mit einem digitalen Übertragungsverfahren eignet.

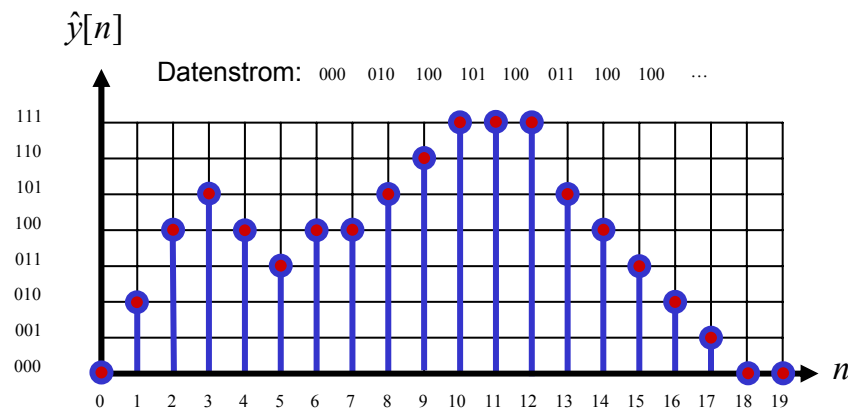


Abbildung 2: Codierung des digitalen Signals und resultierender Daten- oder Bitstrom.

Abbildung 2 zeigt den resultierenden Daten- oder Bitstrom der sich für das einfache Beispiel in Abbildung 1 ergibt. In diesem Beispiel gibt es insgesamt 8 unterschiedliche Werte, die binär mit 3 Bits repräsentiert werden können.

### **Warum digital?**

Die Verarbeitung von digitalen Signalen in digitalen Schaltungen oder mit dem Digitalrechner hat eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber der analogen Signalverarbeitung. Digitale Schaltungen sind gegenüber Alterung und Temperaturänderungen innerhalb eines gewissen Rahmens unempfindlich, während sich bei analogen Schaltungen eine Temperaturänderung bzw. ein Alterungsprozess direkt auf die Funktionsweise auswirkt. Hinzu kommt, dass unvermeidliche Bauteiltoleranzen bei analogen Schaltungen zu einem hohem Ausschuss bzw. variabler Funktion führen. Die zwei wichtigsten Vorteile der digitalen Welt sind allerdings, dass beim Kopieren digitaler Signale kein Qualitätsverlust entsteht und Digitalrechner bzw. digitale Signalverarbeitungsprozessoren durch Programmierung im Prinzip beliebige Funktionen erfüllen können. In der analogen Welt bedeutet normalerweise eine neue Funktion eine neue Schaltung und beim Kopieren entstehen signifikante Qualitätsverluste, wie sicher jeder schon mal beim Überspielen von Musik oder der Kopie eines Films auf dem Videorekorder beobachtet hat. Nicht zuletzt sind es die enormen Fortschritte der Mikroelektronik, die eine digitale Verarbeitung von Information so attraktiv machen. Klein, leicht und gleichzeitig preiswert. Digital macht's möglich!

### **Abtasttheorem**

Bei der Digitalisierung analoger Signale stellt sich die Frage nach der benötigten Abtastrate. Hier gilt das so genannte Nyquist-Abtasttheorem, welches besagt, dass die minimal notwendige Abtastrate der doppelten maximalen Frequenz des abzutastenden Signals entsprechen muss. Wird diese Bedingung nicht eingehalten, so kann aus dem digitalen Signal das analoge Signal nicht mehr exakt rekonstruiert werden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass durch die Wertediskretisierung per Definition eine exakte Rekonstruktion verhindert wird. Allerdings lässt sich durch Verkleinerung der

Stufenhöhe bei der Wertediskretisierung dieser Effekt beliebig verringern. Die Abbildungen 3, 4 und 5 illustrieren am Beispiel einer Sinusschwingung was passiert, wenn die Abtastrate zu gering gewählt wird.

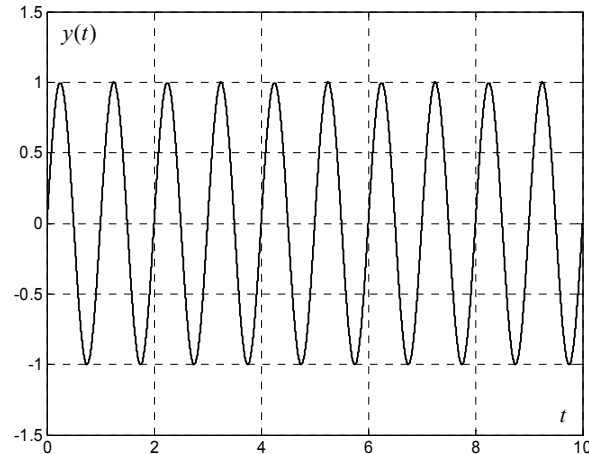


Abbildung 3: Analoges Signal mit einer Schwingung pro Sekunde.

Da das analoge Ausgangssignal in Abbildung 3 eine Schwingung pro Sekunde aufweist, ist eine Abtastung mit mindestens 2 Abtastwerten pro Sekunde erforderlich. In Abbildung 4 wird allerdings mit nur 11 Abtastwerten über einen Zeitraum von 10 Sekunden abgetastet und somit das Abtasttheorem verletzt.

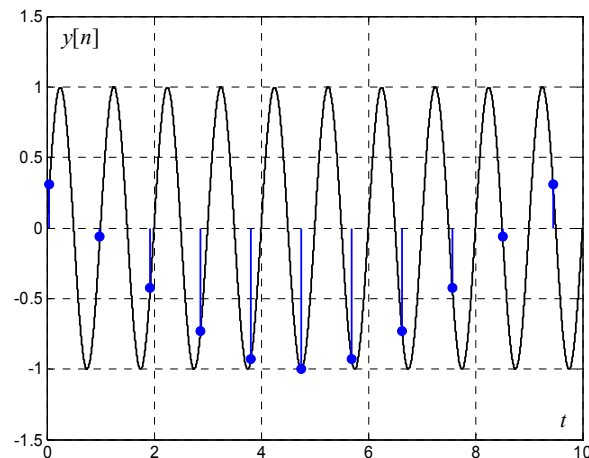


Abbildung 4: Abtastung mit 1,1 Abtastwerten pro Sekunde.

Das Ergebnis einer Rekonstruktion des analogen Signals aus dem digitalen Signal in Abbildung 4 zeigt Abbildung 5. Die ursprüngliche Sinusschwingung wird falsch rekonstruiert.

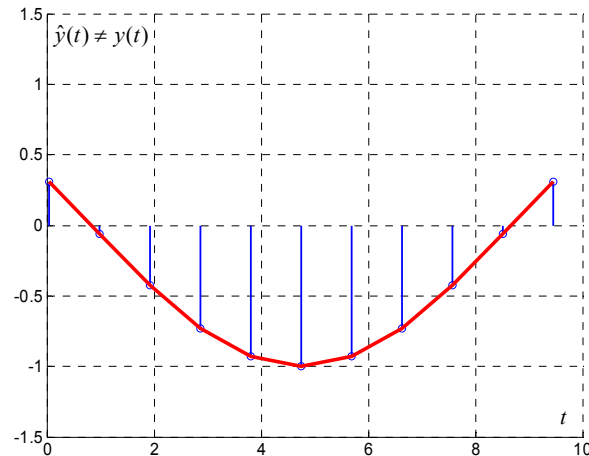


Abbildung 5: Rekonstruktion des analogen Signals aus der digitalen Datenfolge.

Die in der Praxis verwendeten Abtastraten orientieren sich an den maximal auftretenden bzw. wahrnehmbaren Frequenzen eines Signals. So findet man beispielsweise bei der Sprachsignalverarbeitung typischerweise eine Abtastrate von 8000 Abtastwerten pro Sekunde (8000 Hz) vor. Musik in CD-Qualität wird mit 44,1 kHz abgetastet. Beim digitalen Fernsehen wird das analoge Fernsehsignal mit 13,5 MHz abgetastet.

### **Benötigte Stufenweite bei der Amplitudendiskretisierung**

Welche Genauigkeit beim Schritt der Amplitudendiskretisierung notwendig ist hängt ebenfalls sehr stark vom zu verarbeitenden Signal und dem Auflösungsvermögen der menschlichen Sinnesorgane ab. Dies soll am Beispiel eines digitalen Bildes diskutiert werden. Abbildung 6 zeigt 4 Bilder, bei denen jeweils eine unterschiedliche aber feste Anzahl von Graustufen verwendet wurde. Oben links 256 unterschiedliche Grauwerte, oben rechts 16 Grauwerte, unten links 4 Grauwerte und unten rechts nur 2 Grauwerte, sprich schwarz und weiß. Wie man leicht erkennen kann, führt eine Verringerung der Anzahl von Werten zu einer wahrnehmbaren Verfälschung des Bildes.

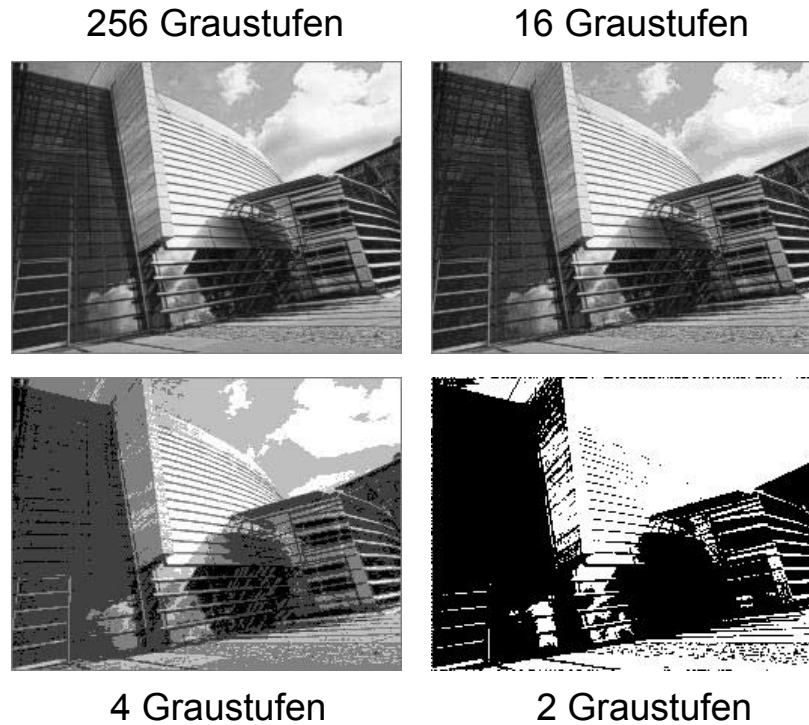


Abbildung 6: Wertediskretisierung eines Graubildes.

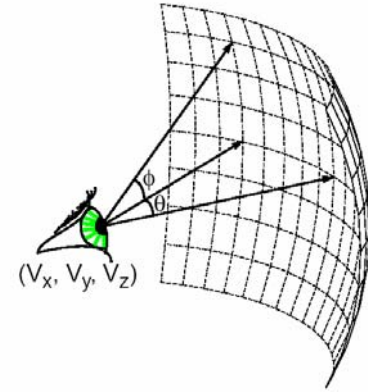
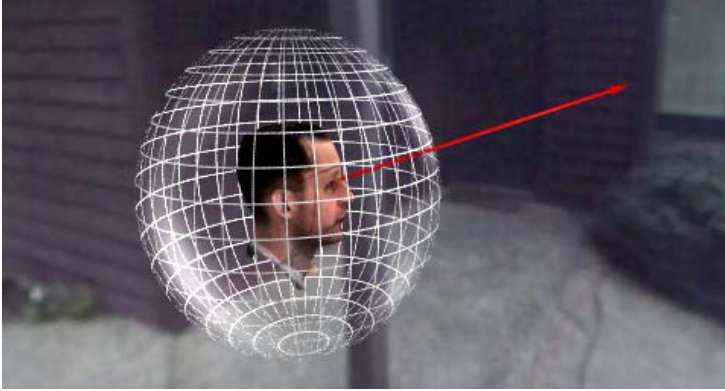
### **Datenkompression**

Die Digitalisierung analoger Signale führt je nach Medium zu sehr großen Datenmengen, die sich nur in komprimierter Form speichern bzw. übertragen lassen. Wie groß die Datenmengen sind lässt sich eindrucksvoll am Beispiel der Digitalisierung von analogen Fernsehsignalen veranschaulichen. Wird das in Deutschland verwendete PAL-Farbfernsehsignal nach der ITU-R Empfehlung 601 digitalisiert, so werden die Grauwertkomponente mit einer Abtastrate von 13,5 MHz und die beiden Farbdifferenzsignale mit jeweils 6,75 MHz abgetastet. Jeder Abtastwert wird im Zuge der Wertediskretisierung mit 8 Bit repräsentiert. Bei 25 Vollbildern pro Sekunde führt dies zu einer Rohdatenrate von etwa 166 Mbit/s. Betrachtet man nun typische Übertragungsraten die uns heute zur Verfügung stehen, wie z.B. DSL mit 1,5 Mbit/s, so stellt man schnell fest, dass hier eine Datenkompression um einen Faktor 100 notwendig ist, um Anwendungen wie beispielsweise Video-on-Demand über des Internet zu realisieren. Die Videokompression hat in den vergangenen Jahren enorme Fortschritte gemacht und mit

den Standards H.264 und MPEG-4 stehen heute leistungsfähige Kompressionsalgorithmen zur Verfügung die eine Kompression um etwa einen Faktor 100 bei akzeptablem Qualitätsverlust ermöglichen.

## **Neue digitale Anwendungen**

Interaktive 3D-Spiele zählen zu den populärsten Computeranwendungen überhaupt. Die Steuerung einer Spielfigur in einer virtuellen Welt und die Interaktion mit Objekten erfordert eine dreidimensionale Modellierung einer Szene im Rechner, so dass abhängig von einem interaktiv veränderbaren Wunschstandpunkt die entsprechende Ansicht dargestellt werden kann. Ein 3D-Modell der TU-München würde es beispielsweise erlauben, eine Besichtigung über das Internet durchzuführen, ohne dass eine Reise vor Ort notwendig wäre. Zusätzlich eingefügte interaktive Elemente wie Rätsel und Geschicklichkeitsaufgaben könnten die Besichtigung noch attraktiver gestalten. Damit die interaktive Navigation möglichst realistisch wirkt, bietet es sich an, die Modellierung der Szene rein bildbasiert im Rechner durchzuführen. Während virtuelle Welten in der Vergangenheit üblicherweise künstlich erstellt wurden und somit wenig echt wirkten, bieten rein bildbasierte Modellierungsansätze per Definition ein hohes Maß an Fotorealismus und kommen bei der Darstellung weitgehend ohne Hardwareunterstützung aus, so dass eine Visualisierung auch auf mobilen Endgeräten wie z.B. Laptops oder PocketPCs möglich wird. Die Grundidee einer rein bildbasierten Szenenrepräsentation ist es, das Lichtfeld einer Szene zu digitalisieren und diese Daten auf einem Rechner abzuspeichern und anschließend, je nach Benutzerinteraktion, neue beliebige Ansichten aus den digitalen Szenenbeschreibungen zusammensetzen. Abbildung 7 zeigt die grundlegende Aufgabe die hierbei zu lösen ist. Im allgemeinsten Fall benötigt man für eine vollständige Beschreibung einer Szene den Lichteinfall zu jedem Zeitpunkt in jedem Raumpunkt für jede Wellenlänge und in jede Blickrichtung, also eine 7-dimensionale Funktion, die üblicherweise als Plenoptische Funktion [1] bezeichnet wird.



Plenoptische Funktion  $I = P(\lambda, x, y, z, \phi, \theta, t)$

Abbildung 7: Das Lichtfeld einer Szene ist eine 7-dimensionale Funktion [1],[2].

Wäre es möglich diese Funktion zu messen und in digitaler Form zu speichern, so könnte man anschließend jede beliebige Ansicht der so aufgenommenen Szene am Rechner erzeugen. In der Praxis ist es jedoch nicht möglich, eine beliebig genaue Abtastung der plenoptischen Funktion durchzuführen. Üblicherweise werden daher Abtastwerte von einer endlichen Anzahl diskreter Positionen und Blickrichtungen aufgenommen und daraus Referenzbilder erzeugt. Man nimmt die Szene also aus vielen Blickrichtungen mit einer Kamera auf und speichert die so erhaltenen Bilder als Beschreibung der Szene. Für die Generierung von beliebigen neuen Ansichten werden die entsprechenden Bildpunkte aus Abtastwerten dieser Referenzbilder interpoliert.

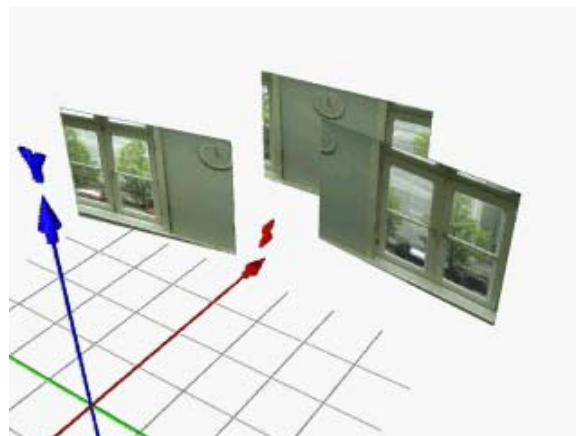


Abbildung 8: Plenoptische Funktion einer Szene repräsentiert durch drei Referenzbilder.



Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Positionierung von 3 Bildern in einer dreidimensionalen Szene, die zum Erzeugen beliebiger Ansichten der Szene dienen. Jedes Einzelbild stellt einen Teil der digitalisierten Plenoptischen Funktion dar. In der Praxis reichen drei Bilder bei weitem nicht. Mehrere Tausend Bilder sind üblicherweise erforderlich, um eine glatte interaktive Navigation durch die Szene zu ermöglichen. Abbildung 9 zeigt ein am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU München entwickeltes Aufnahmegerät.



Abbildung 9: An der TU München entwickeltes Akquisitionsgerät für die Plenoptische Funktion einer Szene.

Abbildung 10 zeigt drei neue Ansichten, die aus den aufgenommenen Referenzbildern durch Interpolation erzeugt wurden. In der unteren linken Ecke der Ansichten ist jeweils die Position und Blickrichtung der virtuellen Kamera in der Szene eingezeichnet.

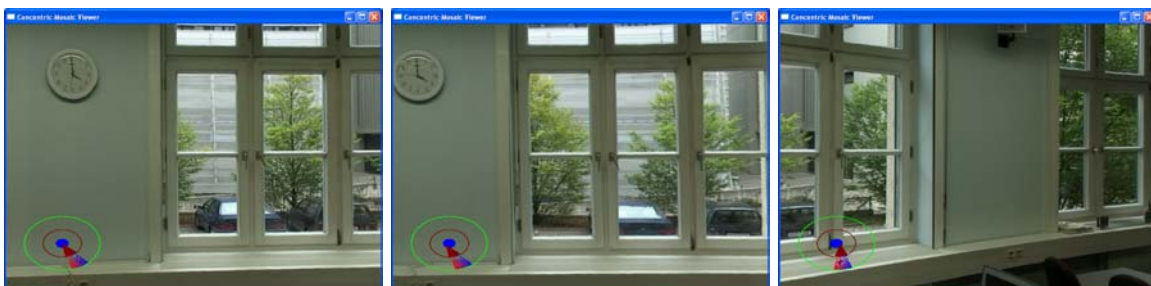


Abbildung 10: Neue Ansichten die aus den Referenzbildern interpoliert wurden.

Durch die Digitalisierung des Lichtfeldes einer Szene wird es möglich, visuell ansprechende interaktive Anwendungen in Wirtschaft, Architektur, Städteplanung, Tourismus, Navigation und Medizin zu realisieren, die ein hohes Maß an Wirklichkeitsnähe bieten. Beispiele sind neben Spielanwendungen unter anderem eine über das Internet begehbare Hotelanlage, ein virtueller Blumenladen, die virtuelle Besichtigung von Bauprojekten, eine die Diagnostik unterstützende Visualisierung in der Medizin oder virtuelle Museumsbesuche.

## Literatur

- [1] E. H. Adelson and J. Bergen, "The plenoptic function and the elements of early vision," *Computational Models of Visual Processing*, pp. 3–20, MIT Press, Cambridge, MA, 1991.
- [2] McMillan, L., and G. Bishop, "Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System", *Proceedings of SIGGRAPH 95*, pp. 39-46, Los Angeles, CA, 1995.